

# **Adaptación y viabilidad (consideraciones técnicas y legales) de una locomotora portuaria impulsada por GNL en Tarragona**

Trabajo entregable D3.4

Autoritat Portuària de Tarragona



**CORE LNGas**  
**hive**



Core Network Corridors and and Liquefied Natural Gas

2014-EU-TM-0732-S

## **D3.4– Adaptación y viabilidad (consideraciones técnicas y legales) de una locomotora portuaria impulsada por GNL en Tarragona**

Fecha prevista de entrega: febrero 2018

Fecha de entrega real: enero 2018

Comienzo de la actividad: octubre 2015

Duración: 26 meses

Contratista principal del trabajo entregable: Autoritat Portuària de Tarragona

*Revisión: 0*

 <b>Co-financed by the European Union</b> Connecting Europe Facility		
<b>Nivel de difusión</b>		
<b>PU</b>	Público	
<b>CO</b>	Confidencial, solo para miembros del consorcio (incluido los Servicios de la Comisión)	<b>X</b>

## Historial de revisión

<b>Administración e informe del trabajo entregable</b>		
Acrónimo proyecto: CORE LNGas Hive		INEA/CEF/TRAN/M2014/1026196
<b>Identificador Documento:</b> D3.4		
Socio principal: Autoritat Portuària de Tarragona		
Versión del informe: 0		
Fecha de preparación del informe: Diciembre 2017		
Clasificación: [classification]		
<b>Naturaleza:</b> Estudio		
<b>Autor(s) and contribuyentes:</b> Autoritat Portuària de Tarragona		
<b>Estado</b>		Planificación
		Borrador
		Trabajando
	<b>X</b>	Final
		Entregado
		Aprobado

El Consorcio de Core LNGas Hive ha abordado todos los comentarios recibidos, haciendo cambios donde era necesario. Los cambios en el documento están detallados en la tabla siguiente.

<b>Fecha</b>	<b>Editado por</b>	<b>Estado</b>	<b>Cambios hechos</b>

## Copyright

This report is © CORE LNGas Hive Consortium 2015. Its duplication is allowed only in the integral form for personal use or for the purposes of research and education.

## Citation

Autoritat Portuària de Tarragona, 2016, Deliverable [D252] – [Estudio de viabilidad para gasificar los servicios de maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona]. CORE LNGas Hive consortium, [www.corelngashive.eu](http://www.corelngashive.eu)

## Acknowledgements

The work presented in this document has been conducted in the context of the action INEA/CEF/TRAN/M2014/1026196 CORE LNGas Hive. CORE LNGas HIVE is a 60 months project started on January 1st, 2014.

The project consortium is composed by: Enagás Transporte, S.A.U. (Enagás), Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR), Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidade de Santiago de Compostela (USC), ENTE VASCO DE LA ENERGÍA (EVE), Autoridad Portuaria de Barcelona - Port de Barcelona (APB), Port Authority of Cartagena (PAC), AUTORIDAD PORTUARIA DE FERROL-SAN CIBRAO (APF), Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (APBA), Port Authority of Huelva (PAH), COMPAÑÍA ESPAÑOLA DE PETRÓLEOS S.A.U. (CEPSA), Regasificadora del Noroeste, S.A. (RdN), HAM CRIOGENICA, S.L. (HAM), BUREAU VERITAS IBERIA SLU (BVI), GUASCOR POWER SA (GP), IDIADA AUTOMOTIVE TECHNOLOGY S.A (IAT), FLOTA SUARDIAZ, S.L. (Suardiaz), ITSAS GAS BUNKER SUPPLY SL (ITSAS), COMPAÑIA DE REMOLCADORES IBAIZABAL, S.A. (IBAI), TERMINAL DE CONTENIDORS DE BARCELONA, S.L. (TCB), Terminal Catalunya, S.A. (TC), UTE REMOLCADORES DE BARCELONA-SAR, UNION TEMPORAL DEEMPRESAS, LEY 18/1982 (URB), ASTILLEROS ARMON, S.A. (AA), GAS NATURAL SDG, S.A. (GN), INSTITUTO ENERXÉTICO DE GALICIA (IEG), Fundación de la Comunidad Valenciana para la Investigación, Promoción y Estudios Comerciales de Valenciaport (Fundación Valenciaport) (FV), Planta de Regasificación de Sagunto, S.A. (PRS), MOLGAS ENERGÍA, SAU (ME), Autoridad Portuaria de Valencia (APV), SEAPLACE SL (Seaplace), BOLUDA CORPORACION MARITIMA S.L. (BCM), Autoridad Portuaria de Bilbao (APBi), RENFE MERANCÍAS S.A. (Renfe), Puertos del Estado (PdE), Dirección General de la Marina Mercante (DGMM), PORT AUTHORITY OF GIJON (PAG), Port Authority of Melilla (PAM), Santander Port Authority (SPA), Port Authority of Tarragona (PAT), Port Authority of Vigo (PAV), Port Authority of Santa Cruz de Tenerife (PASCT) and REN Gasoductos, S.A. (RENG).

## More Information

Public CORE LNGas HIVE reports and additional information related with the project execution and results are available through CORE LNGas Hive public website at [www.corelngashive.eu](http://www.corelngashive.eu)

## Tabla de contenidos

1.	Sumario del informe .....	20
1.1.	Objetivos de la subactividad y resultados conseguidos .....	20
1.2.	Desviaciones del programa de trabajo .....	22
1.3.	Riesgos y problemas anticipados .....	23
2.	Estructura actividad EV3.....	25
3.	Introducción del estudio realizado: Fase 1.....	26
4.	Contexto actual: Los servicios de maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona .....	27
4.1.	Caracterización de la red ferroviaria en el Puerto de Tarragona .....	27
4.2.	Instalaciones de suministro de diésel .....	28
4.3.	Parque actual de locomotoras .....	29
4.4.	Mapa de Agentes.....	30
4.5.	Caracterización de los agentes .....	33
4.5.1	Agentes .....	33
4.5.2	Intereses de cada agente .....	37
5.	Posibles barreras técnicas y legales de la gasificación de los servicios de maniobras .....	38
5.1.	Fase 1: Adaptación tecnológica .....	38
5.2.	Fase 2: Implantación de la infraestructura de suministro.....	48
5.3.	Fase 3: Operación y mantenimiento .....	49
5.4.	Conclusiones sobre las barreras técnicas y legales.....	50
6.	Análisis de viabilidad Económico-Financiero.....	51
6.1.	Datos e hipótesis para el cálculo .....	51
6.1.1	Descripción de las variables .....	52
6.2.	Escenario base.....	60
6.2.1	Rentabilidad en el escenario base .....	60
6.3.	Análisis de sensibilidad.....	65
6.3.1	Identificación de las variables clave para el operador ferroviario.....	66
6.3.2	Identificación de las variables con mayor influencia .....	81
6.3.3	Análisis de sensibilidad: Escenario óptimo .....	82
6.3.4	Análisis de sensibilidad de escenarios posibilistas .....	84

6.3.5	Análisis de sensibilidad para el operador gasista .....	87
6.3.6	Análisis de sensibilidad global.....	89
6.4.	Conclusiones sobre la rentabilidad .....	90
7.	Cuantificación del impacto ambiental.....	92
7.1.	Beneficios medioambientales .....	92
7.2.	Impacto medioambiental esperado .....	93
8.	Conclusiones y consideraciones Fase 1 .....	95
8.1.	Conclusiones .....	95
8.2.	Consideraciones .....	97
8.2.1	Consideraciones sobre la viabilidad técnica.....	97
8.2.2	Consideraciones sobre la viabilidad legal.....	98
8.2.3	Consideraciones sobre la viabilidad económica.....	101
9.	Introducción del estudio de la Fase 2 y antecedentes .....	102
10.	Ingeniería .....	103
10.1.	Definición de los requerimientos técnicos del proyecto .....	103
10.1.1	Descripción General de las Locomotoras .....	105
10.1.2	Características de los actuales Motores Diesel a transformar.....	107
10.1.3	Nuevas soluciones a considerar .....	108
10.1.4	Criterios para la elección de la locomotora a transformar .....	109
10.1.5	Análisis .....	111
10.1.6	Conclusión .....	112
10.2.	Análisis de los posibles motores GNL y duales para el proyecto .....	113
10.2.1	Descripción General.....	113
10.2.2	Motores de Gas Natural .....	116
10.2.3	Motores Duales .....	117
10.2.4	Benchmarking motores de GN dedicados y Duales.....	118
10.2.5	Selección del motor .....	133
10.3.	Definición de las características del depósito de GNL.....	140
10.3.1	Definiciones previas.....	141
10.3.2	Características técnicas .....	142
10.3.3	Benchmarking de depósitos criogénicos .....	144
10.3.4	Capacidad de los depósitos .....	145
10.3.5	Integración de los depósitos.....	152

10.4.	Identificación fabricantes y proveedores interesados .....	153
10.4.1	Conversión del motor.....	153
10.4.2	Depósito de combustible .....	154
10.4.3	Empresa integradora .....	155
10.4.4	Acreditación de la locomotora .....	156
10.5.	Análisis de la transformación y su afectación en peso y centro de gravedad .....	157
10.5.1	Situación actual, antes de la transformación.....	157
10.5.2	Impacto de las modificaciones en la distribución de masas y posición del CDG	158
10.6.	Redacción de planes .....	162
10.6.1	Plan de mantenimiento y operatividad .....	162
10.6.2	Plan de formación.....	182
10.7.	Definición de las pruebas necesarias a realizar.....	187
10.7.1	Pruebas de estanqueidad del circuito de GNL.....	187
10.7.2	Pruebas estáticas de puesta en marcha y aceleración en banco de ensayos	189
10.7.3	Definición e identificación de las pruebas necesarias solicitadas por Adif	205
11.	Integración.....	215
11.1.	Análisis del mercado de empresas integradoras .....	215
11.1.1	Antecedentes.....	215
11.1.2	Empresas Integradoras .....	216
11.2.	Definición de los trabajos y materiales necesarios para la integración	218
11.2.1	Descripción General .....	218
11.2.2	Conversión del motor diésel a gas natural .....	219
12.	Validación .....	274
12.1.	Seguimiento, monitorización y evaluación de la locomotora modificada	274
12.1.1	Monitorización de la locomotora.....	274
12.1.2	Evaluación del funcionamiento de la locomotora transformada a GNL	276
12.1.3	Comparativa entre la locomotora transformada (GNL) y la original (diésel)	278

12.2.	Definición de la instrumentación adicional recomendable.....	278
12.2.1	Engine Control Display (ECD) .....	278
12.2.2	Nivel de combustible.....	281
12.2.3	Sistema de detección de fugas de gas .....	282
12.3.	Modificaciones en los manuales .....	283
13.	Conclusiones generales del estudio: Fase 1 y Fase 2.....	284
14.	ANEXO 1 -Plan de mantenimiento EMD 8-645-E GNL .....	289
15.	ANEXO 2- Listado de componentes y equipos .....	293
16.	ANEXO 3 -Planificación del proceso de transformación .....	297
17.	ANEXO 4 -Presupuesto del proceso de transformación .....	299
18.	ANEXO 5 -Análisis de riesgos (Automotor Serie 2600) .....	301
19.	Referencias .....	304
20.	Lista de Acrónimos y Abreviaciones.....	306

## Índice de figuras

Figura 1. Evolución del proyecto. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	26
Figura 2. Red ferroviaria del Puerto de Tarragona. Fuente: Institut Cerdà (2015). 27	
Figura 3. Ubicación del punto de suministro de diésel. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	28
Figura 4. Mapa de agentes. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	31
Figura 5. Empresas ferroviarias con licencia. Fuente: Adif (2015). .....	34
Figura 6. Puertos con conexión a la RFIG gestionada por Adif. Fuente: Adif (2015). .....	35
Figura 7. Puntos de subministro de combustible e instalaciones técnicas y logísticas. Fuente: Adif (2015). .....	36
Figura 8. Fase 1: Proceso de adaptación tecnológica. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	38
Figura 9. Lista de agentes contactados. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	39
Figura 10. Proceso de acreditación. Solicitud y autorización provisional. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	44
Figura 11. Proceso de acreditación. En rojo aparecen los Organismos de certificación y en verde los Documentos expedidos. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	45
Figura 12. Proceso de acreditación. Solicitud de modificación de material móvil ferroviario. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	46
Figura 13. Variables para el análisis de viabilidad económico-financiera. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	52
Figura 14. Evolución de la demanda ferroviaria de maniobras. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de FMI (2015). .....	57
Figura 15. Reparto de usos de combustible. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	58
Figura 16. Resumen de las variables del escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	60
Figura 17. Cálculo del coste de aprovisionamiento para una locomotora. Fuente: Institut Cerdà. .....	62
Figura 18. Cálculo del beneficio medioambiental. Fuente: Institut Cerdà. ....	63
Figura 19. Gráfica de la evolución del VAN sobre el escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	64
Figura 20. Gráfica de la evolución del payback en el escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	65

Figura 21. Variables clave para el operador ferroviario. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	66
Figura 22. Tipo y coste del motor como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	67
Figura 23 Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el tipo y coste del motor. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	68
Figura 24. Nº de locomotoras transformadas y velocidad de transformación como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	69
Figura 25. Evolución en el payback para el escenario con valor ajustable en el nº de locomotoras transformadas y la velocidad de transformación. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	69
Figura 26. Velocidad de transformación como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	70
Figura 27. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la velocidad de transformación. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	71
Figura 28. Coste de acreditación 1ª unidad y 2ª unidad como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	72
Figura 29. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de acreditación de la 1ª y 2ª unidad. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	72
Figura 30. Coste de diésel como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	74
Figura 31. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de diésel. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	74
Figura 32. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de diésel en función de los márgenes de venta. Fuente: Institut Cerdà (2015). ...	75
Figura 33. Evolución de la demanda como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	76
Figura 34. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la evolución de la demanda. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	77
Figura 35. Nº de locomotoras transformadas y el reparto de los usos de GNL como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	78
Figura 36. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el Nº de locomotoras transformadas y el reparto de los usos de GNL. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	79
Figura 37. La internalización de las emisiones como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	80

Figura 38. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la internalización de las emisiones. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	80
Figura 39. Variables con mayor influencia. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	81
Figura 40. Proceso para el análisis de sensibilidad del escenario más favorable. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	82
Figura 41. Variables modificadas respecto al escenario base para resultar en el escenario más favorable. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	83
Figura 42. Evolución del payback para el escenario más favorable. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	83
Figura 43. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	84
Figura 44. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas ABCD. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	85
Figura 45. Evolución payback para las variables con mayor afectación en los escenarios posibilistas ABCD. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	85
Figura 46. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas EFGH. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	86
Figura 47. Evolución payback para las variables con mayor afectación en los escenarios posibilistas EFGH. Fuente: Institut Cerdà (2015). .....	86
Figura 48. Variables influyentes para el agente gasista. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	87
Figura 49. Evolución del payback para el agente gasista. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	88
Figura 50. Evolución del payback para el operador ferroviario. ....	89
Figura 51. Ahorro de emisiones. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	94
Figura 52 Diagrama de los bloques de actividad a realizar en la Fase 2 .....	103
Figura 53 Fotografías de las locomotoras de maniobras en el Puerto de Tarragona (Adif 311, Adif 310). ....	104
Figura 54 Esquema de las series 311 (arriba) y 310 (abajo). ....	105
Figura 55 Detalle del esquema de las medidas obtenidas en taller para ambos tipos de locomotoras (Adif 311, Adif 310). ....	110
Figura 56. Motor GUASCOR SFGD360.....	119
Figura 57. Motor MAN E3262.....	120
Figura 58. Motor MWM TCG 2016 V16 C .....	121
Figura 59. Motor CATERPILLAR CG170-12.....	122
Figura 60. Motor FG Wilson PG1250B2.....	123

Figura 61. Motor PERKINS 4012TESI .....	124
Figura 62. Motor MITSUBISHI GS12R-MPTK .....	125
Figura 63. Motor EMD 12-645-E .....	127
Figura 64. Motor MTU 12V 4000 S83 .....	128
Figura 65. Motor WÄRTSILÄ 6L20DF.....	129
Figura 66. Motores Caterpillar 3406E y Mercedes Benz OM904LA.....	130
Figura 67. Sistema Dual desarrollado por EVARM .....	131
Figura 68. Sistema Dual desarrollado por ECI .....	131
Figura 69. Sistema Dual con GNL desarrollado por General Electric (NextFuel™ Natural Gas Retrofit).....	132
Figura 70. Locomotora Tipo 310 .....	134
Figura 71. Locomotora Tipo 311 .....	135
Figura 72. Dimensiones de un motor .....	136
Figura 73. Dimensiones de un conjunto motor-generador.....	136
Figura 74. Motor Dual con inyección de gas mediante mezclador (Fuente: Artemis) .....	137
Figura 75. Fases de un motor Dual de 4 tiempos.....	137
Figure 76. Inyector de alta presión (gas/diésel) de Westport .....	138
Figura 77. Depósito criogénico GNL (Fuente: Chart) .....	142
Figura 78 Depósito de GNL .....	143
Figura 79 Esquema de un depósito GNL .....	144
Figura 80 Densidad energética comparada con el gasóleo.....	146
Figura 81. Ubicación del depósito de combustible (gasóleo) .....	148
Figura 82. Locomotora Tipo 310 – Vista general.....	148
Figura 83. Locomotora Tipo 310 – Detalle depósito de combustible.....	148
Figura 84. Depósitos de GNL de CHART, Serie HNLG R110.....	149
Figura 85. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 171 .....	150
Figura 86. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 100.....	151
Figura 87. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 86.....	151
Figura 88 Esquema de integración de depósitos GNL.....	152
Figura 89 Elementos a modificar .....	158
Figura 90 Planos de la ubicación de los elementos modificados.....	159

Figura 91 Representación gráfica de los valores considerados añadiendo los depósitos superiores adicionales .....	160
Figura 92 Variaciones del CDG tras la transformación a GNL (G1) y con la adición de los depósitos adicionales superiores (G2) .....	161
Figura 93 Disposición de los conjuntos considerados.....	167
Figura 94 Ciclo del motor transformado a GNL.....	168
Figura 95 Sección del motor.....	169
Figura 96 Vista lateral del motor modificado a GNL (izquierda) y situación de componentes (derecha).....	170
Figura 97 Detalle de los componentes .....	170
Figura 98 Diagrama de transformación equivalente .....	171
Figura 99 Diagrama de la identificación de los componentes .....	171
Figura 100 Circuito de GNL alrededor del motor .....	172
Figura 101 Pantallas de la EDC y su ubicación y cajas de conexiones .....	173
Figura 102 Vista posterior del chasis de la ECU y ubicación de sus componentes.	174
Figura 103 Instalación de termopares para la medida de temperatura en el colector de escape.....	174
Figura 104 Esquema del circuito hidráulico y componentes .....	176
Figura 105 Sistema de refrigeración .....	177
Figura 106 Ejemplo de grafico de localización y reparación de averías .....	178
Figura 107 Ejemplo de diagrama de decisión .....	179
Figura 108 Ejemplo datos generales de mantenimiento .....	179
Figura 109 Localización de los sensores de control .....	180
Figura 110 Visión general de los sistemas transformados .....	183
Figura 111 Ciclo del motor a GNL.....	184
Figura 112 Esquema del sistema de gas natural.....	192
Figura 113 Pantalla del sistema de control del motor .....	193
Figura 114 Conjunto de bloque y válvula de carga.....	194
Figura 115 Localización de los termómetros para el ensayo de potencia .....	196
Figura 116 Nomógrafos de factores de corrección barométrica por modelos (1/2) .....	201
Figura 117 Nomógrafos de factores de corrección barométrica por modelos (2/2) .....	202
Figura 118 Gráfico para la carga del generador de 1000 HP .....	203

Figura 119 Localización de los sensores de gas .....	204
Figura 120 Proceso obtención autorización (uso prototipo) .....	213
Figura 121 Proceso obtención autorización (para uso de explotación comercial)..	213
Figura 122 Empresas homologadas por la AESF .....	216
Figura 123. Plantilla para los taladros de anclaje de los load blocks.....	219
Figura 124. Detalle de la instalación de la plantilla .....	220
Figura 125. Detalle de la instalación del load block .....	221
Figura 126. Localización de los anclajes .....	221
Figura 127. Dimensiones y ubicación de los taladros.....	222
Figura 128. Válvula de inyección de gas (GIV) .....	223
Figura 129. Pistón del motor de gas natural .....	223
Figura 130. Esquema del circuito de gas .....	225
Figura 131. Enrutamiento del circuito de gas .....	226
Figura 132. Válvula manual de cierre del suministro de gas .....	227
Figura 133. Soportes para sujetar la tubería.....	228
Figura 134. Instalación de los bloques de carga .....	229
Figura 135. Sujeción del rail a las bombas de agua .....	230
Figura 136. Detalles de la instalación de los raíles de gas .....	230
Figura 137. Gas Flow Control Valve – GFCV.....	231
Figura 138. Localización de la Gas Flow Control Valve - GFCV .....	232
Figura 139. Conexionado de la Gas Flow Control Valve – GFCV .....	232
Figura 140. Vista de los bloques de carga y los colectores de gas. ....	233
Figura 141. Sección del ECI Power Pack.....	234
Figura 142. Válvula de alivio de presión .....	235
Figura 143. Detalle de la instalación de la válvula de alivio .....	236
Figura 144. Gas Inlet Valve.....	237
Figura 145. Detalle montaje GIV.....	238
Figura 146. Detalle montaje manguera de gas.....	238
Figura 147. Instalación de la manguera hidráulica .....	239
Figura 148. Componentes eléctricos del kit .....	240
Figura 149. Ubicación de los cuadros eléctricos.....	242
Figura 150. Caja de la ECU .....	243
Figura 151. Despiece del colector de escape y la canaleta metálica .....	245

Figura 152. Colector de escape y canaleta metálica montados.....	245
Figura 153. Tubería hidráulica y soportes.....	246
Figura 154. Sistema hidráulico - racores .....	247
Figura 155. Conexión del sistema hidráulico .....	247
Figura 156. Detalles del circuito hidráulico .....	248
Figura 157. Bridas de sujeción de aluminio de los tubos hidráulicos .....	248
Figura 158. Ubicación de los sensores .....	249
Figura 159. Termopares del colector de escape.....	250
Figura 160. Detalle de instalación de termopares del colector de escape.....	250
Figura 161. Colector de escape con termopares instalados .....	251
Figura 162. Estanqueidad de la canaleta metálica .....	251
Figura 163. Sensor de temperatura de agua.....	252
Figura 164. Sensor de temperatura de la caja de aire .....	252
Figura 165. Sensor de presión de la caja de aire .....	253
Figura 166. Ubicación de los sensores de gas .....	255
Figura 167. Sensor de detonación instalado en la culata.....	255
Figura 168. Soporte de los sensores de vueltas y sincronización del motor.....	256
Figura 169. Vista del soporte de los sensores instalado .....	256
Figura 170. Ajuste del puntero del volante motor .....	257
Figura 171. Taladro del volante motor .....	258
Figura 172. Inserción del pasador .....	258
Figura 173. Ajuste del sensor de vueltas.....	259
Figura 174. Tolerancia del sensor de sincronización: 0.100-0.125.....	260
Figura 175. Ubicación del sensor de presión de gas .....	261
Figura 176. Sensor de presión de gas con adaptador .....	261
Figura 177. Cableado general del motor.....	262
Figura 178. Caja de conexiones eléctricas analógicas y digitales.....	263
Figura 179. Manipulación del cableado.....	264
Figura 180. Cableado de las GVI´s.....	264
Figura 181. Detalle del cableado de las GVI´s.....	265
Figura 182. Detalle del cableado de las GVI´s en el interior de la culata .....	265
Figura 183. Vista general del cableado de las GVI´s .....	266
Figura 184. Sistema de detección de fugas de gas.....	267

Figura 185. Ubicación de los depósitos de GNL .....	268
Figura 186. Esquema de instalación del intercambiador.....	270
Figura 187. Válvula automática .....	271
Figura 188. Esquema del indicador de nivel de combustible .....	272
Figura 189. Esquema de integración de depósitos de combustible (R110) .....	273
Figura 190 Gráficos de operatividad (horas), recorrido (km) y consumos (kg/km y kg/h) ordenado de arriba abajo) para facilitar el seguimiento de los principales parámetros de la operatividad de la locomotora. ....	277
Figura 191 Pantalla principal de la ECD (Control del Motor).....	279
Figura 192 Pantalla de selección del ECD (Control del Motor) .....	279
Figura 193 Sistema de encendido y diagnosis .....	280
Figura 194 Pantalla de comprobación de encendido .....	280
Figura 195 Pantalla de comprobación de detonación .....	281
Figura 196 Reloj indicador y transmisor del nivel de combustible.....	282
Figura 197 Central de alarmas del AMGasDS III.....	282

## Índice de tablas

Tabla 1. Sumario del informe. ....	20
Tabla 2. Objetivo general. ....	20
Tabla 3. Objetivo dentro del proyecto de CORE LNGas hive.....	20
Tabla 4. Objetivos específicos y progreso hacia el logro del objetivo. ....	22
Tabla 5. Desviaciones del programa de trabajo. ....	22
Tabla 6. Riesgos y problemas anticipados. ....	24
Tabla 7. Características locomotora 311. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	29
Tabla 8. Características locomotora 310. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	30
Tabla 9. Características técnicas de los motores diésel de las locomotoras 311/310. Fuente: Institut Cerdà (2015). ....	40
Tabla 10. Características del motor de GNL de la empresa GUASCOR. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de Guascor (2013). ....	40
Tabla 11. Características de los depósitos en las locomotoras 311/310. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	41
Tabla 12 Características de los depósitos de CHART, ENRIC GROUP e INGESIC. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de Chart (2015), Enric Group (2015) e INGESIC (2015). ....	42
Tabla 13. Descripción de los costes de acreditación. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de datos de Bureau Veritas & AESF (2015). ....	54
Tabla 14. . Datos históricos de servicios ferroviarios de maniobras servidos por locomotoras de la serie 311 en el Puerto de Tarragona. Fuente: Adif (2015) .....	56
Tabla 16. Tabla resumen de los resultados obtenidos en los diversos escenarios evaluados. Fuente: Institut Cerdà (2015).....	89
Tabla 17. Reducción de contaminantes en el transporte por carretera. Fuente: Encana (2015). ....	92
Tabla 17 Principales parámetros de las locomotoras existentes en el Port de Tarragona. ....	106
Tabla 18 Principales parámetros de los motores diésel actuales de las locomotoras existentes en el Port de Tarragona. ....	107
Tabla 19 Comparativo de tecnologías .....	115
Tabla 20 Variantes desarrolladas sobre el motor EMD 645 .....	126
Tabla 21 Variantes desarrolladas sobre el motor EMD 645i <b>Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 22 Comparativo de dimensiones de motores .....	136

Tabla 23. Composición del gas natural.....	141
Tabla 24 Consumo de combustible locomotoras Puerto de Tarragona (2015) .....	146
Tabla 25 Depósitos GNL – CHART HLNG R110.....	149
Tabla 26 Variaciones de peso por la modificaciones .....	158
Tabla 27 Curso Básico Inicial (Operadores y Mantenedores).....	184
Tabla 28 Curso para Operadores.....	185
Tabla 29 Curso para Mantenedores .....	186
Tabla 30. Especificaciones de los motores diésel y GNL .....	199
Tabla 31 Potencias de los elementos auxiliares .....	200
Tabla 32 Documentos de referencia y normativa de aplicación .....	206
Tabla 33 Par de apriete para en conexionado de la válvula GIV .....	239
Tabla 34 Tabla de registro de operatividad .....	274
Tabla 35 Registro de mantenimiento preventivo y reparaciones.....	275
Tabla 36 KPI propuestos para evaluar la rentabilidad de la transformación y su buen funcionamiento .....	276

# 1. Sumario del informe

<b>Número de subactividad y nombre:</b>	EV3 – Servicios de maniobras ferroviarias propulsados por GNL
<b>Autor del informe:</b>	Autoritat Portuària de Tarragona
<b>Fecha informe:</b>	Diciembre 2017

**Tabla 1. Sumario del informe.**

## 1.1. Objetivos de la subactividad y resultados conseguidos

Los objetivos de esta subactividad y los resultados obtenidos se pueden sintetizar en las siguientes tablas:

<b>Objetivo general (por acuerdo de subvención)</b>
Retroadaptación de los servicios de maniobras ferroviarias en Tarragona.

**Tabla 2. Objetivo general.**

<b>Objetivo dentro del Proyecto de CORE LNGas hive</b>
Estudio de viabilidad para gasificar los servicios de transportes ferroviarios en el Puerto de Tarragona.

**Tabla 3. Objetivo dentro del proyecto de CORE LNGas hive.**

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Progreso hacia la consecución del objetivo</b>
El objetivo de la primera parte del estudio era <b>evaluar la viabilidad técnica, legal y financiera</b> de la implementación de GNL (Gas Natural Licuado) en tracción ferroviaria dentro de los dominios del puerto (locomotoras de maniobras) para preparar el camino hacia la	Este estudio está finalizado. A continuación, se muestran los principales resultados: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se han identificado las barreras <b>técnicas y legales</b>, como también las soluciones para superarlas: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Técnica:</i> Disponibilidad no</li> </ul> </li> </ul>

<p>introducción de una alternativa más sostenible que la tecnología diésel actual, debido a una reglamentación medioambiental cada vez más estricta.</p>	<p>normalizada de motores de GNL en el mercado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Legal:</i> Es necesario un proceso de acreditación del material móvil debido a que el GNL no se considera como un combustible actualmente en el ámbito ferroviario.</li> <li>▪ <b>Viabilidad económica</b> e impacto <b>ambiental</b> de la gasificación del servicio de maniobras ferroviarias del puerto de Tarragona:             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Económica:</i> Se ha calculado la rentabilidad para el operador ferroviario y para el agente gasista y la del proyecto en global. Para un escenario base y se ha realizado un análisis de sensibilidad según las variables clave identificadas. A pesar de no presentar un escenario base viable económicamente, la Autoridad Portuaria de Tarragona tiene la capacidad de favorecer escenarios posibilistas que ante un aumento del coste del diésel (a un valor aproximado de 0,800 €/l) supongan paybacks inferiores a los 13-14 años para el operador ferroviario.</li> <li>▪ <i>Medioambiental:</i> Reducción acumulada en 30 años de 551.2 Tn de CO<sub>2</sub>, 14 Tn de NO<sub>x</sub> y 480.0 Kg de PM y un ahorro de 3.451€ procedente de la internalización de las emisiones de CO<sub>2</sub>.</li> </ul> </li> <li>▪ <b>Recomendaciones</b> para la gasificación de los servicios de maniobras ferroviarias.</li> </ul>
<p>La segunda parte del estudio se basa en la realización de un estudio de transformación considerando todas las modificaciones técnicas necesarias</p>	<p>Este estudio está finalizado. A continuación se muestran los principales resultados obtenidos, agrupados según los tres bloques de estudio considerados:</p>

<p>para convertir locomotoras diésel de maniobras a GNL. Los resultados del análisis de viabilidad obtenidos en la primera fase alimentarán esta segunda parte del estudio, en la que se <b>detallarán todos los pasos a realizar para la transformación de la locomotora</b> con el objetivo de una posible futura implementación de los trabajos necesarios identificados en una prueba piloto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Ingeniería:</b> se han definido los requerimientos técnicos y características técnicas del motor y depósitos a implantar, así como su afectación a diferentes ámbitos: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A la distribución de pesos y centro de gravedad del vehículo.</li> <li>▪ Planes de mantenimiento.</li> <li>▪ Planes de formación.</li> <li>▪ Pruebas necesarias para su puesta en marcha.</li> </ul> </li> <li>▪ <b>Integración:</b> se ha llevado a cabo un análisis para definir los trabajos necesarios a realizar por un integrador para sustituir el sistema alimentado por diésel por uno nuevo con GNL en la locomotora actual.</li> <li>▪ <b>Validación:</b> en caso de una prueba piloto, se ha definido la metodología y los datos a registrar durante una futura monitorización con el fin de evaluar la locomotora modificada.</li> </ul>
---	---

**Tabla 4. Objetivos específicos y progreso hacia el logro del objetivo.**

## 1.2. Desviaciones del programa de trabajo

<b>Causas y descripción</b>	<b>Acciones de corrección<sup>1</sup></b>
No hay desviaciones.	No se han considerado correcciones.

**Tabla 5. Desviaciones del programa de trabajo.**

<sup>1</sup> Acciones de corrección previstas o llevadas a cabo por el Proyecto para superar el problema con el impacto en términos de retrasos, cualidad y cantidad de trabajo.

### 1.3. Riesgos y problemas anticipados

Tipología <sup>2</sup>	Descripción del problema	Acciones previstas
T	El <b>motor GNL</b> para tracción ferroviaria no se encuentra todavía de forma normalizada en el mercado (en catálogo). Los tiempos y costes de suministro son más elevados.	Contactar con los fabricantes de motores para conocer su interés en el proyecto y para saber su predisposición a adaptar sus productos en catálogo a las necesidades específicas del mismo.
R	Necesidad de un <b>proceso de acreditación</b> (en el que se requiere que una entidad certificadora independiente realice un proceso de evaluación y un análisis de riesgos sobre la modificación) para que Adif y la AESF concedan la autorización para la circulación (en caso de que la infraestructura ferroviaria sea propiedad del administrador). A día de hoy el GNL no tiene consideración de combustible en el ámbito ferroviario, por lo que es necesario elaborar la documentación sin disponer de un marco de referencia en el tema del gas.	Los costes de acreditación son muy elevados para la transformación de una primera unidad tipo. Este hecho hace necesario potenciar y promocionar la necesidad sobre la elaboración de un marco legal para la evaluación de la conformidad de la seguridad del GNL como combustible para la tracción ferroviaria. En este sentido se mantendrá el seguimiento sobre las actualizaciones y avances de la prueba piloto que se está realizando sobre el uso de GNL en el ámbito ferroviario de viajeros que aportará avances importantes en este campo.
T	La densidad de energía del GNL es del 60% de la del gasóleo, por lo que se <b>necesitará disponer de mayor cantidad de combustible líquido almacenado para obtener la misma energía</b> y por lo tanto mantener la autonomía disponible	Se selecciona la configuración considerando ambas variables: optimizando el espacio disponible y seleccionando las dimensiones de los depósitos en el catálogo que maximicen la capacidad. En caso de que la autonomía sea insuficiente se propone completar

<sup>2</sup> T Técnico, C Comercial y R Regulatorio.

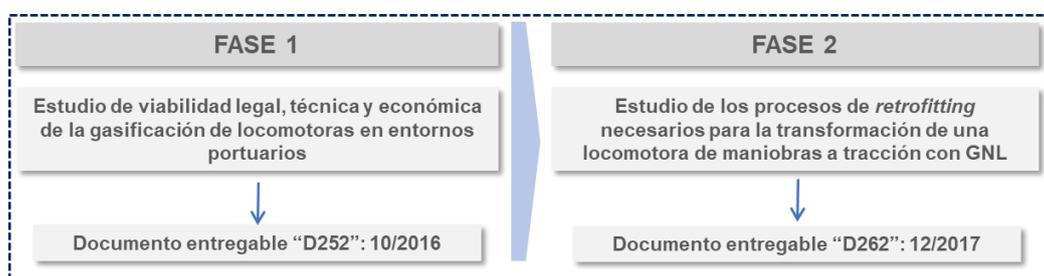
	<p>con el diésel antes de la transformación. La capacidad y configuración de los depósitos de GNL viene limitado por el fabricante, pero sobre todo por el espacio disponible para ubicar los tanques de gas en la locomotora. Esto significa que, si el espacio disponible no es suficiente, la autonomía podría verse reducida.</p>	<p>estos depósitos con la instalación en la cubierta del motor de una serie de depósitos adicionales.</p>
--	---	---

**Tabla 6. Riesgos y problemas anticipados.**

## 2. Estructura actividad EV3

El Puerto de Tarragona como socio del proyecto CORE-LNGas hive, se plantea la posibilidad de gasificar los servicios ferroviarios en su entorno portuario por lo que considera necesaria la realización de un estudio de viabilidad que indique cuales son los procesos necesarios para la integración de las soluciones tecnológicas con el objetivo final de establecer las bases para materializarlo en una futura prueba piloto.

Para lograr este objetivo el estudio se ha estructurado en dos fases con los siguientes sub-objetivos correspondientes:



### ***Fase 1 "Estudio de viabilidad legal, técnica y económica sobre la gasificación de locomotoras en entornos portuarios"***

- Caracterización de los agentes ferroviarios, el material móvil, la infraestructura ferroviaria y los servicios ferroviarios en el Puerto de Tarragona.
- Análisis de la viabilidad técnica, legal y económica de la transformación, y cuantificación del impacto ambiental.
- Conclusiones y recomendaciones para materializar la gasificación de los servicios ferroviarios en el Puerto de Tarragona.

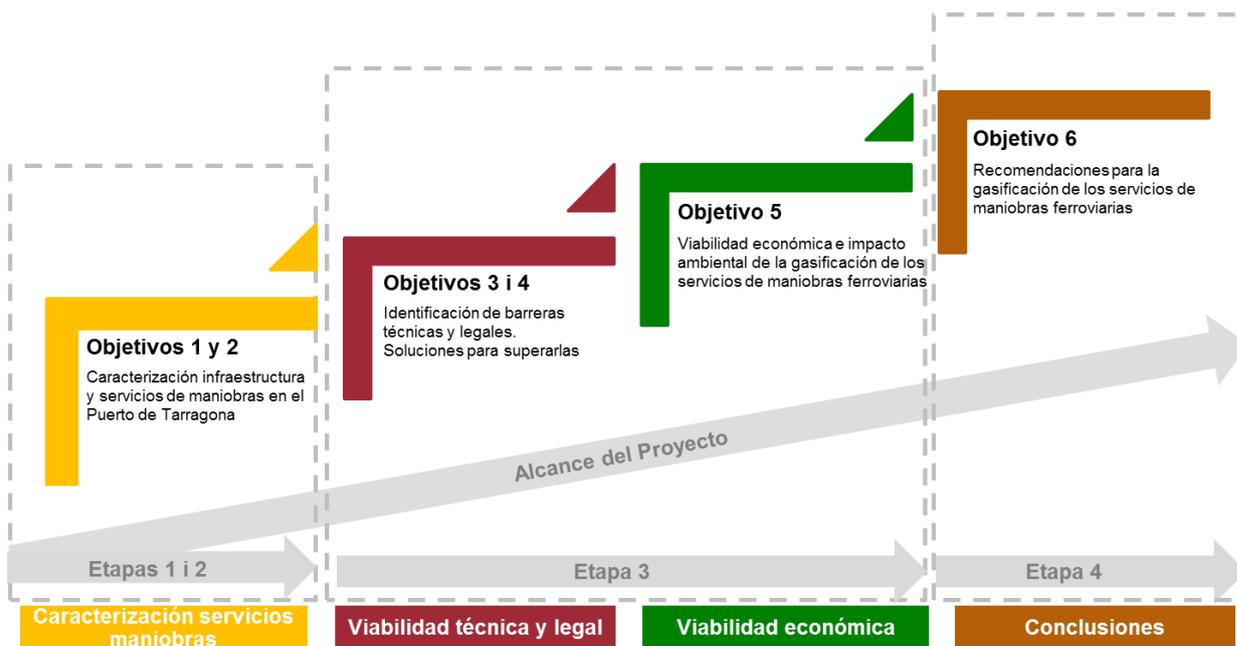
### ***Fase 2 "Estudio de los procesos de retrofitting necesarios para la transformación de una locomotora de maniobras a tracción con GNL"***

- Análisis al detalle de las soluciones tecnológicas (motor y depósito) planificadas en el análisis de viabilidad.
- Realizar un estudio de ingeniería para definir el proceso de integración de los nuevos elementos (motor, depósito, conexión de los diferentes componentes, pruebas a realizar).
- Definición de los aspectos necesarios relativos a la integración tecnológica y necesidades de monitorización en relación a considerar la monitorización de una prueba piloto.

### 3. Introducción del estudio realizado: Fase 1

En este estudio se pretende concluir sobre la viabilidad técnica, legal y económica de gasificar los servicios de maniobras ferroviarias en el puerto de Tarragona y definir los pasos a seguir para que sea implementada, si es posible.

El proyecto se ha desarrollado en cuatro etapas en las que se han marcado unos objetivos a cumplir en cada una de estas.



**Figura 1. Evolución del proyecto. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En la Figura 1 se puede ver cómo se ha organizado el estudio:

- En una **primera etapa** se ha caracterizado la infraestructura y los servicios de maniobras ferroviarios existentes en el puerto de Tarragona. Esto ha permitido conocer el estado, características y particularidades de la infraestructura y los servicios ferroviarios en la que se desarrolla el proyecto.
- En una **segunda etapa**, se han identificado las barreras tanto técnicas como legales que pueden llegar a comprometer el proyecto y la potencialidad de ser superadas.
- En la **tercera etapa** se ha analizado la viabilidad económica del proyecto para todos los agentes implicados en su explotación y el impacto ambiental que supondría cambiar de una propulsión de diésel a una de Gas Natural Licuado, en adelante denominado GNL.
- Finalmente en la **cuarta etapa** se exponen las conclusiones referentes a los resultados obtenidos del estudio realizado a lo largo de las anteriores fases,

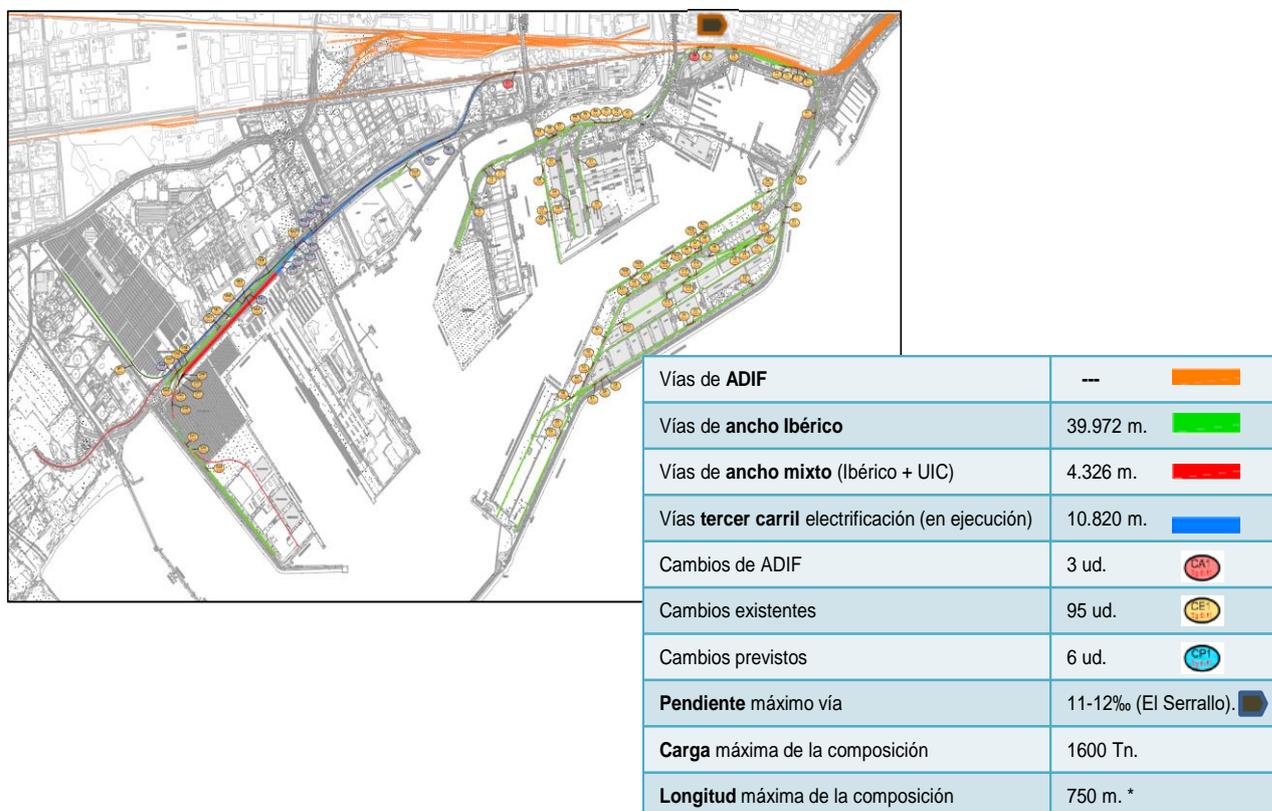
así como las recomendaciones o próximos pasos para la Autoridad Portuaria de Tarragona, para la gasificación de los servicios de maniobras ferroviarias.

## 4. Contexto actual: Los servicios de maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona

### 4.1. Caracterización de la red ferroviaria en el Puerto de Tarragona

La red ferroviaria del puerto de Tarragona está en su gran mayoría no electrificada por lo que es tan solo transitable por locomotoras cuyo sistema de propulsión no se base en la conexión con catenaria. Actualmente los servicios de maniobras ferroviarias se ejecutan con **locomotoras de tracción diésel**. Sin embargo cabe mencionar que parte de esta red está actualmente en pleno proceso de transformación, ya que se está incorporando tendido eléctrico en algunos tramos de la misma.

La Autoridad Portuaria del Puerto de Tarragona, en adelante denominada APT, está interesada en sustituir el sistema de propulsión de las locomotoras basado en diésel por motores menos contaminantes que se alimenten de GNL.



\*Apartador ferroviario de acceso al puerto de 800m previsto.

**Figura 2. Red ferroviaria del Puerto de Tarragona. Fuente: Institut Cerda (2015).**

Como se observa en la Figura 2, en el puerto de Tarragona coexisten vías de ancho ibérico con vías de ancho mixto (ibérico + internacional). Además se constata que la conexión de la red ferroviaria interna del puerto de Tarragona con la red de Adif se hace mediante las vías que están en proceso de electrificación.

## 4.2. Instalaciones de suministro de diésel

En el Puerto de Tarragona existe un único punto de suministro de combustible diésel que se encuentra en un punto de la zona de clasificación. Este punto consiste en una pequeña explanada, en la que aparca el camión cisterna (ya que se dispone de un punto móvil de suministro).



**Figura 3. Ubicación del punto de suministro de diésel. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En la anterior figura se muestra la explanada de la zona de clasificación dentro de las premisas del puerto de Tarragona y donde en principio se podría ubicar el punto de suministro de GNL.

### 4.3. Parque actual de locomotoras

Actualmente la APT cuenta con cuatro locomotoras que pertenecen a Adif para realizar todas las maniobras ferroviarias dentro del Puerto de Tarragona. Estas cuatro locomotoras pertenecen a dos series distintas: tres unidades son de la serie 311 que están operativas simultáneamente y una unidad corresponde a la serie 310 que está disponible como repuesto cuando una de las otras se encuentra en reparaciones. A continuación se exponen sus respectivas características técnicas:

#### **Serie 311:**

Como se ha dicho antes, la APT cuenta con tres modelos de esta serie. Sus especificaciones técnicas son las siguientes.

MOTOR Y PRESTACIONES:	SISTEMAS DE FRENADO:
<p><b>Motor:</b> De 4T Diésel MTU V8 396TC 13 (sobrealimentado)</p> <p><b>Potencia nominal:</b> 1.065 CV / 785 kW</p> <p><b>Velocidad máxima:</b> 92 km/h</p> <p><b>Revoluciones a potencia máxima:</b> 1.800 r.p.m</p> <p><b>Mínimo de revoluciones:</b> 600 r.p.m</p> <p><b>Número de motores de tracción:</b> 4 motores eléctricos trifásicos Siemens (1 por eje)</p>	<p><b>Tipo de freno:</b> aire comprimido</p> <p><b>Sistema de freno:</b> automático de tubería</p> <p><b>Mandos de freno:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Freno de servicio (palillo)</li> <li>• Freno directo (mando aislado)</li> <li>• Freno eléctrico (regulador "F + ")</li> <li>• Freno de auxilio (llave de 4 vías)</li> <li>• Freno de urgencia (seta)</li> <li>• Freno de estacionamiento (interruptor)</li> </ul>
DIMENSIONES Y OTROS:	SISTEMAS DE SEGURIDAD:
<p><b>Distancia entre topes:</b> 14.200 mm</p> <p><b>Peso en servicio:</b> 80 t</p> <p><b>Ancho de vía:</b> 1.668 mm</p> <p><b>Disposición de ejes (UIC):</b> Bo'Bo'</p> <p><b>Capacidad depósito:</b> 2.200 litros</p>	<p><b>Sistema de seguridad:</b> ASFA y dispositivo de vigilancia (hombre muerto). La actuación del ASFA o del dispositivo de vigilancia provoca:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frenado de urgencia máxima en tren y locomotora.</li> <li>• Supresión del esfuerzo de tracción.</li> <li>• Supresión de alimentación a la tubería de freno automático.</li> </ul>

**Tabla 7. Características locomotora 311. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

### **Serie 310:**

Existe tan solo 1 locomotora de esta serie con base en el puerto de Tarragona. Esta se emplea para sustituir a las de la serie 311 cuando una de estas se encuentra fuera de servicio. Sus características técnicas son las siguientes.

<b>MOTOR Y PRESTACIONES:</b>	<b>SISTEMAS DE FRENADO:</b>
<p><b>Motor:</b> De 2T Diésel GM 8-645-E (atmosférico)</p> <p><b>Potencia nominal:</b> 930 CV / 684 kW.</p> <p><b>Velocidad máxima:</b> 114 km/h</p> <p><b>Revoluciones a potencia máxima:</b> 900 r.p.m.</p> <p><b>Número de motores de tracción:</b> 4 motores eléctricos D29 (1 por eje)</p>	<p><b>Tipo de freno:</b> aire comprimido</p> <p><b>Sistema de freno:</b> automático de tubería</p> <p><b>Mandos de freno:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Freno de servicio TFA (tren y locomotora)</li> <li>• Freno directo (freno independiente de la locomotora)</li> <li>• Freno de auxilio (llave de 4 vías)</li> <li>• Freno de urgencia (seta)</li> <li>• Freno de estacionamiento (de cadena)</li> </ul>
<b>DIMENSIONES Y OTROS:</b>	<b>SISTEMAS DE SEGURIDAD:</b>
<p><b>Distancia entre topes:</b> 12.550 mm</p> <p><b>Peso en servicio:</b> 78 t</p> <p><b>Ancho de vía:</b> 1.668 mm</p> <p><b>Disposición de ejes (UIC):</b> Bo'Bo'</p> <p><b>Capacidad depósito:</b> 2.770 litros</p>	<p><b>Sistema de seguridad:</b> ASFA y dispositivo de vigilancia (hombre muerto). La actuación del ASFA o del dispositivo de vigilancia provoca:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frenado de urgencia máxima en tren y locomotora.</li> <li>• Supresión del esfuerzo de tracción.</li> <li>• Supresión de alimentación a la tubería de freno automático.</li> </ul>

**Tabla 8. Características locomotora 310. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

## **4.4. Mapa de Agentes**

En este proyecto debido a sus dimensiones intervienen una cantidad sustancial de organismos y agentes. Para representarlos a todos y ver su influencia e interrelaciones entre ellos se ha realizado un árbol en el que se representan todos los agentes.

D 3.4 – Adaptación y viabilidad (consideraciones técnicas y legales) de una locomotora portuaria impulsada por GNL en Tarragona

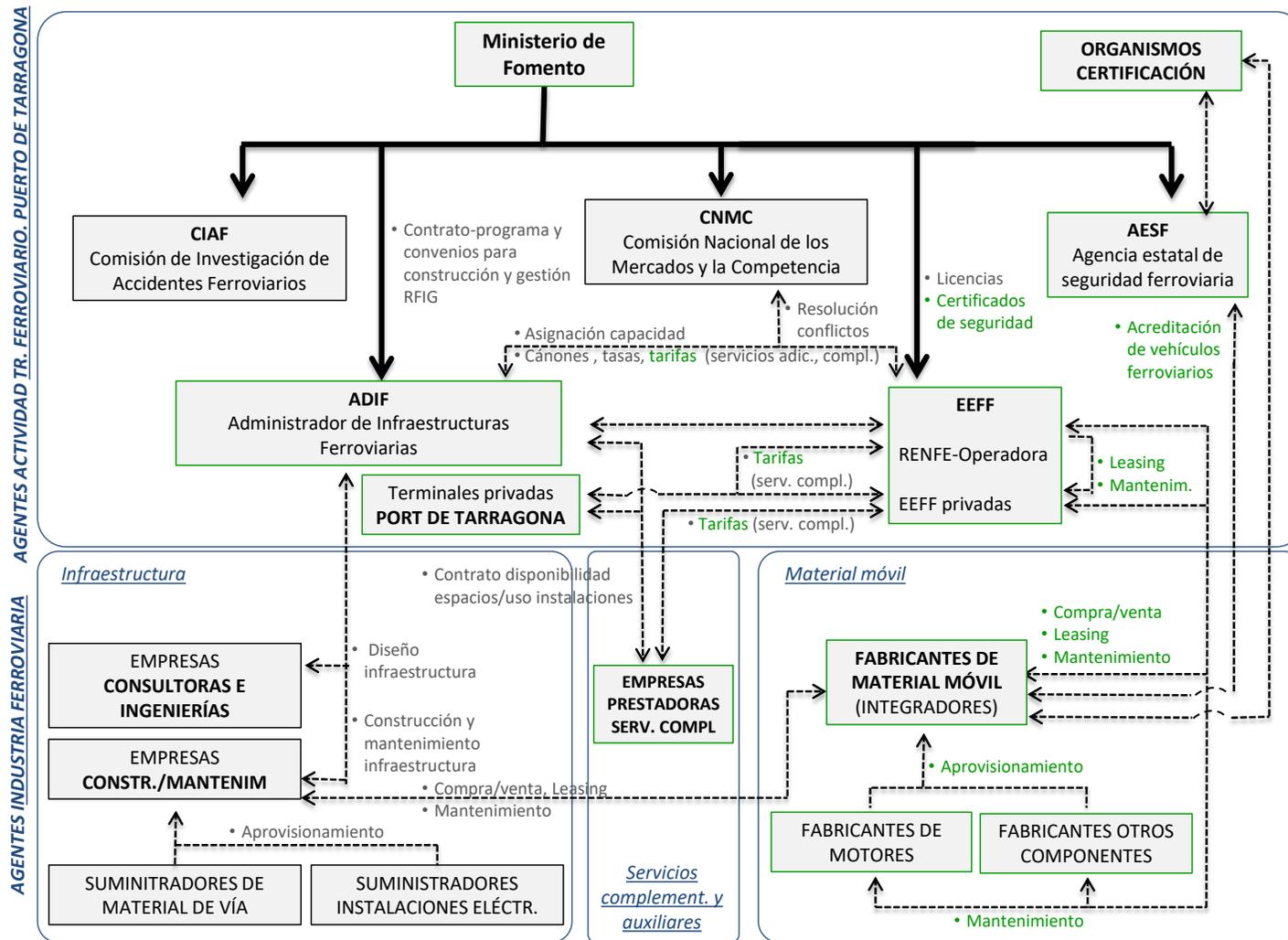


Figura 4. Mapa de agentes. Fuente: Institut Cerdà (2015).

El mapa de agentes presentado en la anterior figura, incluye tanto agentes dedicados a la actividad del transporte ferroviario como agentes de la industria ferroviaria. Asimismo, dentro de los agentes de la industria ferroviaria, se puede discernir entre los agentes en relación a la infraestructura, los relacionados con servicios complementarios y auxiliares y los relacionados con el material móvil.

- De todos los agentes presentes en el diagrama, se concluye que los **principales agentes potencialmente concernidos por la implementación del GNL** a la propulsión ferroviaria son los siguientes:
  - Los proveedores/construtores/integradores de material móvil:
    - **Fabricantes/integradores de material móvil.**
    - **Fabricantes de motores.**
    - **Fabricantes de depósitos criogénicos.**
  - Los usuarios/propietarios del material móvil:
    - **EEFF: Servicios comerciales.**
    - **ADIF: Tareas de mantenimiento e inspección.**
    - **Autoridad Portuaria de Tarragona.**
  - Las **empresas prestadoras de servicios complementarios**: se encargan principalmente de la provisión de combustible.
  - El **Ministerio de Fomento/AESF** (Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria): Autorización de la entrada en servicio de los subsistemas estructurales que constituyen el sistema ferroviario, así como comprobar que mantienen sus requisitos.

## 4.5. Caracterización de los agentes

A continuación se presenta un resumen general de los agentes implicados y de sus respectivos intereses:

### 4.5.1 Agentes

Como se ha visto en el anterior diagrama son muchos los agentes que participan o influyen de la puesta en servicio de la propulsión con GNL en el puerto de Tarragona. A continuación se caracterizará a cada uno de estos, especificando su rol concreto en el ámbito del proyecto:

#### Ministerio de Fomento (AESF):



Este organismo se encarga de autorizar la **entrada en servicio de los subsistemas estructurales** que constituyen el sistema ferroviario y comprobar que mantienen sus requisitos. También autoriza la **puesta en servicio** de vehículos, propone, elabora y desarrolla el **marco normativo de seguridad y supervisa su cumplimiento por los agentes del sistema ferroviario**. A su vez, se encarga de **proponer** nuevas fórmulas, **directrices** y **recomendaciones normativas**, incluidas las especificaciones técnicas de los subsistemas ferroviarios. Finalmente también tiene las **competencias** en materia de **transporte de mercancías peligrosas** por ferrocarril.

#### Organismos de certificación:

En el siguiente grupo se incluyen todos los agentes encargados de las labores de certificación del nuevo material rodante. Según sus características los *Organismos de certificación* son los siguientes:

##### ✓ *Los Organismos Notificados:*



Encargados de efectuar el **procedimiento de verificación CE** de la **interoperabilidad** de los subsistemas y de evaluar la conformidad o idoneidad para el uso de los componentes. En este estudio se ha identificado la empresa Cetren cuyo ámbito de notificación será sobre todos los subsistemas.

##### ✓ *Los Organismos Designados:*



Estos son los encargados de efectuar el **procedimiento de verificación** de subsistemas en el caso de **normas nacionales**. Belgorail, Cetren, ECA Bureau Veritas y Lloyds Register España serán los organismos elegidos cuyo ámbito de designación será sobre el material rodante.

**Adif:**



Es el organismo público adscrito al Ministerio de Fomento a través de la Secretaria General de Infraestructura encargado generalmente de la **administración, control e inspección de la infraestructura ferroviaria**, además de la **explotación** de los bienes de su titularidad.

Por otro lado se hace cargo de la elaboración y publicación de la **Declaración sobre la Red**, según los términos previsto en la LSF y de sus normas de desarrollo. También se compromete a la **adjudicación de Capacidad** de infraestructura a las EEFF y otros Candidatos que lo soliciten. También es encargado de la emisión de **informes con carácter previo al otorgamiento** por el Ministerio de Fomento de las licencias de EF y de las autorizaciones para prestar servicios que se hayan declarado de interés público.

Por último, se encarga de la **aprobación de los proyectos básicos y de construcción de infraestructuras** ferroviarias que deban formar parte de la RFIG juntamente de la construcción de infraestructuras ferroviarias con recursos del Estado o de un tercero.



**Empresas Ferroviarias**

Estas se encargan de la **operación de servicios** de transporte ferroviario. Sin embargo, para ello es muy importante contar con la **licencia de EF/Habilitación** específica y de **certificado de seguridad** que son los que se habilitan para la circulación por la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG).

Cabe destacar que tan solo Renfe-Operadora dispone de Licencia para el transporte ferroviario de viajeros y mercancías. El resto de EEFF sólo dispone de Licencia de EF para el transporte ferroviario de mercancías. A continuación se expone el listado de empresas con dicho certificado.

Empresas Ferroviarias con Licencia sin Certificado de Seguridad	Empresas Ferroviarias con Licencia y Certificado de Seguridad
<ul style="list-style-type: none"> <li>• EUSKO TRENBIDEAK FERROCARRILES VASCOS S.A. (Mercancías)</li> <li>• ARCELORMITTAL SIDERAIL, S.A. (Mercancías)</li> <li>• FESUR, FERROCARRILES DEL SUROESTE S.A. (Mercancías)</li> <li>• FGC MOBILITAT S.A. (Mercancías)</li> <li>• LOGIBÉRICA RAIL, S.A.U. (Mercancías)</li> <li>• MONBUS RAIL, S.A. (Mercancías)</li> <li>• ASTURMASA RAIL, S.A.U. (Mercancías)</li> <li>• ARRAMELE SIGLO XXI, S.A. (Mercancías)</li> <li>• AVANZA TREN, S.A.U. (Viajeros)</li> <li>• VECTALIA RAIL, S.A. (Viajeros)</li> <li>• LA SEPULVEDANA, S.A.U. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• TRAMESA, TRANSPORTES MIXTOS ESPECIALES S.A. (Mercancías)</li> <li>• IBERRAIL SPANISH RAILROADS S.A.U. (Viajeros)</li> <li>• EMPRESA DE BLAS Y CIA, S.A.U. (Viajeros)</li> <li>• MOVENTIS RAIL, S.A.U. (Viajeros)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RENFE- VIAJEROS, S.A.U. (Viajeros)</li> <li>• RENFE- MERCANCÍAS, S.A.U. (Mercancías)</li> <li>• COMSA RAIL TRANSPORT, S.A. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• CONTINENTAL RAIL, S.A. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• ACCIONA RAIL SERVICES, S.A.U. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• TRANSFESA RAIL, S.A.U. (Mercancías)</li> <li>• TRACCIÓN RAIL, S.A. (Mercancías)</li> <li>• LOGITREN FERROVIARIA, S.A. (Mercancías)</li> <li>• ALSA FERROCARRIL S.A.U. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• GUINOVART RAIL S.A. (Mercancías)</li> <li>• FERROVIAL RAILWAY, S.A. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• TRANSITIA RAIL, S.A. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• VELOI RAIL, S.A. (Viajeros)</li> <li>• INTERBUS INTERURBANA DE AUTOBUSES, S.A. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• ECO RAIL, S.A.U. (Viajeros y Mercancías)</li> <li>• AISA TREN S.A.U. (Viajeros)</li> </ul>

**Figura 5. Empresas ferroviarias con licencia. Fuente: Adif (2015).**

**Puerto de Tarragona:**



Su rol es el de gestionar el puerto de Tarragona. Cabe destacar que la **infraestructura ferroviaria** del entorno portuario de Tarragona es de **titularidad de la APT** y que las circulaciones de maniobras dentro del entorno portuario están contratadas con Adif (personal y parque motor). Podrían realizarse internamente o contar con otro prestador de servicios.

Además la APT tiene **competencia** sobre las **adjudicaciones de capacidad** con origen y destino en el Puerto de Tarragona y juntamente con Adif se establece la **planificación de franjas horarias** de circulación entre el Puerto y la instalación técnica de clasificación de Adif en Tarragona.



**Figura 6. Puertos con conexión a la RFIG gestionada por Adif. Fuente: Adif (2015).**

**Empresas prestadoras de servicios complementarios:**

Estas se encargan, entre otros, de **suministrar el combustible**. En el puerto de Tarragona es **Adif el que presta el servicio de aprovisionamiento de combustible**, mediante la licitación del mismo a una empresa especializada.



Figura 7. Puntos de suministro de combustible e instalaciones técnicas y logísticas. Fuente: Adif (2015).

#### 4.5.2 Intereses de cada agente

Conocido el mapa de los agentes y su rol correspondiente, se expone a continuación los distintos intereses que tiene cada uno de ellos en la implementación del GNL en las maniobras ferroviarias. Estos intereses radican en los siguientes **elementos clave que determinarán la viabilidad técnica, económica y legal de la solución**:

- Usuarios/propietarios del material móvil (*Adif, Puerto de Tarragona*):
  - **Potencia:** La potencia debe ser suficiente para llevar a cabo las maniobras ferroviarias.
  - **Autonomía:** El material móvil nuevo/transformado y la logística de aprovisionamiento debe proporcionar autonomía suficiente.
  - **Costes:** El ahorro de costes medioambientales (internalización costes externos) y de consumo de combustible deben compensar el coste de la transformación del motor/compra del nuevo motor/depósito.
- Proveedores/construtores/integradores de material móvil, motores y depósitos criogénicos:
  - **Viabilidad técnica:** La solución debe ser viable técnicamente (construcción, transformación, integración) con las locomotoras disponibles.
  - **Coste de la solución vs disponibilidad de pago de la clientela.**
- Empresas prestadoras de servicios complementarios (*provisión de GNL*):
  - **Retorno de la inversión de las instalaciones de provisión de GNL.**
  - **Posibilidad de implantación.**
- Ministerio de Fomento:
  - **Niveles de seguridad:** Deben cumplir con el marco legal actual.

Estos elementos marcarán las ventajas competitivas del GNL y las barreras al cambio.

## 5. Posibles barreras técnicas y legales de la gasificación de los servicios de maniobras

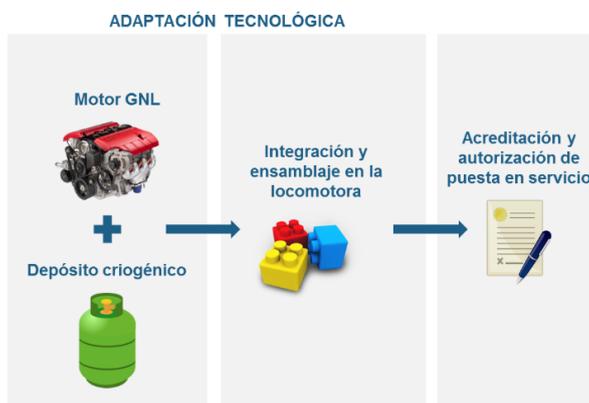
Para implementar la tracción ferroviaria con GNL se deben superar tres fases clave de forma simultánea, siendo estas las siguientes:

- Fase 1: **Adaptación de la tecnología** de tracción con GNL al ferrocarril.
- Fase 2: **Diseño e implantación de las instalaciones de suministro** (GNL).
- Fase 3: **Operación y mantenimiento.**

Para superar estas tres fases se deben tener en cuenta ciertos factores técnicos y legales que vienen asociados a costes tanto monetarios como de tiempo. En los siguientes puntos se presenta el estudio pormenorizado de las barreras o dificultades asociadas a cada una de estas fases.

### 5.1. Fase 1: Adaptación tecnológica

El proceso de adaptación de la tecnología e implementación de la propulsión por GNL al ferrocarril implica la transformación y/o adquisición de un motor y un depósito criogénico, su ensamblaje en la locomotora, la acreditación y la autorización de la puesta en servicio del material motor modificado tal y como se representa en la siguiente figura.



**Figura 8. Fase 1: Proceso de adaptación tecnológica. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Para la puesta en servicio de una locomotora de GNL se deben identificar de manera inicial cuáles son las soluciones óptimas en cuanto a depósitos y motores de GNL para el proyecto. El proceso seguido ha sido el siguiente:

### 1. Identificación de los requisitos tecnológicos del motor y los depósitos.

En base a la información de partida, se ha identificado los requisitos necesarios del motor y depósito de combustible. Las soluciones a GNL deberán cumplir estos requisitos para poder adaptarse a los servicios ferroviarios de maniobras en el Puerto de Tarragona.

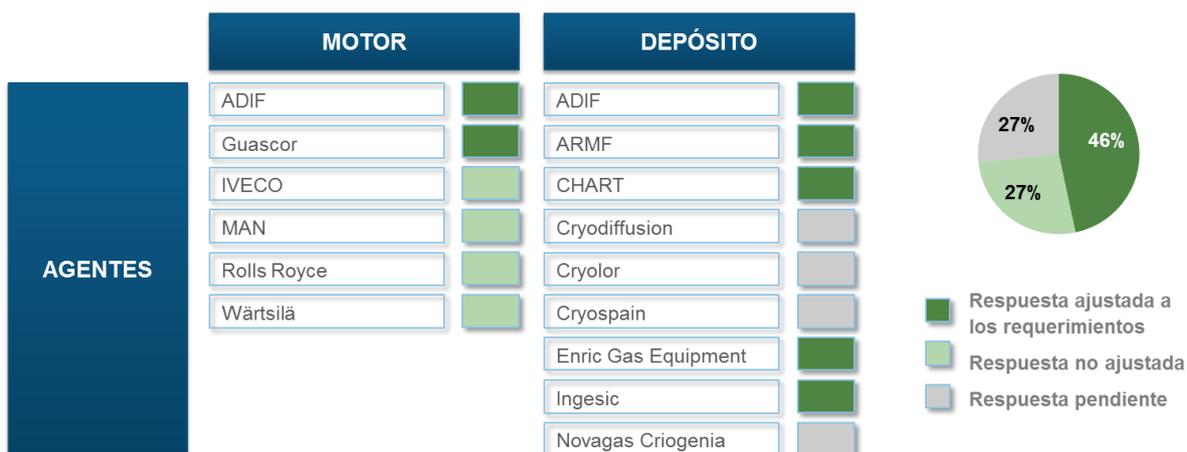
### 2. Contacto con los principales fabricantes de motores y depósitos de GNL.

Una vez se han identificado los requisitos que deben satisfacer las distintas soluciones, se ha elaborado un mapa de fabricantes y se han establecido los contactos necesarios para analizar la disponibilidad de soluciones que ofrece el mercado actual.

### 3. Identificación de las soluciones óptimas.

Dada la oferta de soluciones técnicamente viables, se han seleccionado aquellas que presentan una mayor eficiencia de cara a la gasificación de las maniobras ferroviarias en entorno portuario, priorizando a los fabricantes por precio, proximidad, tiempo de fabricación y transporte. En total para este proyecto se han contactado con 14 agentes para obtener información clave sobre motores y depósitos de GNL. Concretamente se han establecido contactos con 6 agentes relacionados con las características de los motores y con 9 agentes que disponían de información sobre los depósitos criogénicos.

A continuación se expone una lista de todos los agentes contactados y una calificación de la relevancia de la información clave obtenida acerca de motores y depósitos.



**Figura 9. Lista de agentes contactados. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En la figura 9 se observa como para el depósito se dispone de un rango de agentes más amplio que en el caso del motor. Asimismo, cabe destacar que de la información obtenida, en el caso del motor, solo un 33% de las respuestas se

adecuan a los requerimientos, mientras que en el caso de los depósitos todas las respuestas obtenidas se ajustan a los requerimientos del proyecto.

A continuación se exponen las particularidades para cada uno de los elementos arriba mencionados.

### **El motor de GNL:**

El motor es una de los elementos técnicos clave para que el proyecto de GNL pueda llegar a buen puerto. Por lo que identificar sus características es primordial para que no se pierda eficiencia en las maniobras al hacer el cambio a motores con GNL.

Las características técnicas de los motores diésel que actualmente están en servicio en las locomotoras 310 y 311 se recogen en la siguiente tabla:

<b>Locomotora</b>	<b>Número de motores generadores</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Revoluciones a potencia máxima (rpm)</b>	<b>Dimensiones orientativas (mm)</b>
<b>310</b>	1	684	900	
<b>311</b>	1	785	1.800	2.013 x 1.439 x 1.380

**Tabla 9. Características técnicas de los motores diésel de las locomotoras 311/310. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Se constata que los motores disponibles son capaces de subministrar una potencia comprendida entre los 700 y los 800 kW cuando están operando entre 900 y 1.800 rpm. Además también se observa que cada una de las locomotoras tan solo cuenta con un motor lo que limitará las dimensiones que pueda adoptar el futuro motor de GNL.

De todas las empresas contactadas para el suministro de un motor de GNL se ha detectado que la oferta que mejor se ajusta a los requisitos anteriormente mencionados es la de la empresa GUASCOR. En la siguiente tabla se resumen las características del motor de GNL en cuestión.

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Revoluciones a potencia máxima (rpm)</b>	<b>Dimensiones orientativas (mm)</b>	<b>Coste de fabricación (€)</b>	<b>Tiempo de fabricación (meses)</b>
<b>GUASCOR</b>	SFGLD360	700	1.800	2.351 x 1.689 x 2.493	235.000 €	4-5

**Tabla 10. Características del motor de GNL de la empresa GUASCOR. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de Guascor (2013).**

Del análisis llevado a cabo mediante los contactos con los diversos motoristas, se desprende que a día de hoy prácticamente no existen productos en catálogo para motores de GNL en el ámbito ferroviario (IVECO, MAN, Rolls Royce, Wärtsilä no disponen de producto adaptable a las necesidades de las maniobras ferroviarias).

El modelo de Guascor considerado cumple con los requisitos de potencia y velocidad de giro de las locomotoras actuales y su tiempo de suministro es similar al de un motor diésel para ferrocarril (4-8 meses). Cabe destacar que para la elección del motor no se han contemplado motores dual-fuel, dado que esta opción reduce la demanda de GNL.

### **El depósito criogénico:**

El depósito es el otro elemento técnico crucial para la transformación de la unidad a la tracción por GNL. De manera análoga para el motor, se han estudiado en un primer lugar las características de los depósitos instalados actualmente en las locomotoras diésel 310 y 311. Sus características se resumen en la siguiente tabla:

<b>Locomotora</b>	<b>Número de depósitos</b>	<b>Capacidad (l)</b>	<b>Dimensiones orientativas</b>
<b>310</b>	1	2.700	n.d.
<b>311</b>	1	2.200	n.d.

**Tabla 11. Características de los depósitos en las locomotoras 311/310. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Ambas series cuentan con tan solo un depósito de una capacidad de 2.700 l para la 310 y de 2.200 l para la 311. En este caso, de los 7 fabricantes contactados ha habido tres que han facilitado datos concretos que se recogen en la siguiente tabla.

Fabricante	Modelo	Capacidad (l)	Depósitos necesarios para capacidad necesaria	Coste de fabricación (€/unidad)	Tiempo de fabricación (semanas)	Coste de transporte (€/unidad)	Tiempo de transporte (días)
CHART	HLNG 171	582	4	11.800	4-5	150 (mar) 900 (aire)	30 (mar) 7-10 (aire)
ENRIC GROUP	CDL-2/1.5	2.000	1	20.500	9	800 (mar)	30
INGESIC	2 m <sup>3</sup> 17 bar	2.033	1	25.168	10	n.d.	n.d.
	3 m <sup>3</sup> 17 bar	2.911	1	28.435	10	n.d.	n.d.

**Tabla 12 Características de los depósitos de CHART, ENRIC GROUP e INGESIC. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de Chart (2015), Enric Group (2015) e INGESIC (2015).**

Estas tres empresas han sido CHART, ENRIC GROUP e INGESIC. Según la información recopilada, todas estas empresas disponen de depósitos criogénicos que servirían para reemplazar los depósitos diésel de las locomotoras 310 y 311.

Los modelos de ENRIC GROUP e INGESIC cumplen con los requisitos necesarios de capacidad con un solo depósito. Adicionalmente, INGESIC está dispuesto a adaptar su oferta a las necesidades del proyecto.

### **Integración del motor y del depósito en las locomotoras 310/311:**

Para la integración del motor GNL y el depósito criogénico en la locomotora se dispone de dos opciones:

- **Modificar una locomotora 310/311 de Adif:** Necesidad del visto bueno del gestor de infraestructuras ferroviarias. En este caso, habría que disponer de un integrador (opciones potenciales: Adif, Renfe Integra/Mantenimiento,..). Cabe destacar que el integrador ARMF ha mostrado su interés en una modificación de estas características.
- **Hablar con un fabricante de locomotoras que pueda estar interesado en introducir nuevas locomotoras** de maniobras en el mercador. Este sería el caso apropiado si la APT quiere "internalizar las maniobras ferroviarias".

Asimismo, para que la integración del motor y del depósito de GNL sea posible en las locomotoras 310/311, se deben realizar ciertas consideraciones.

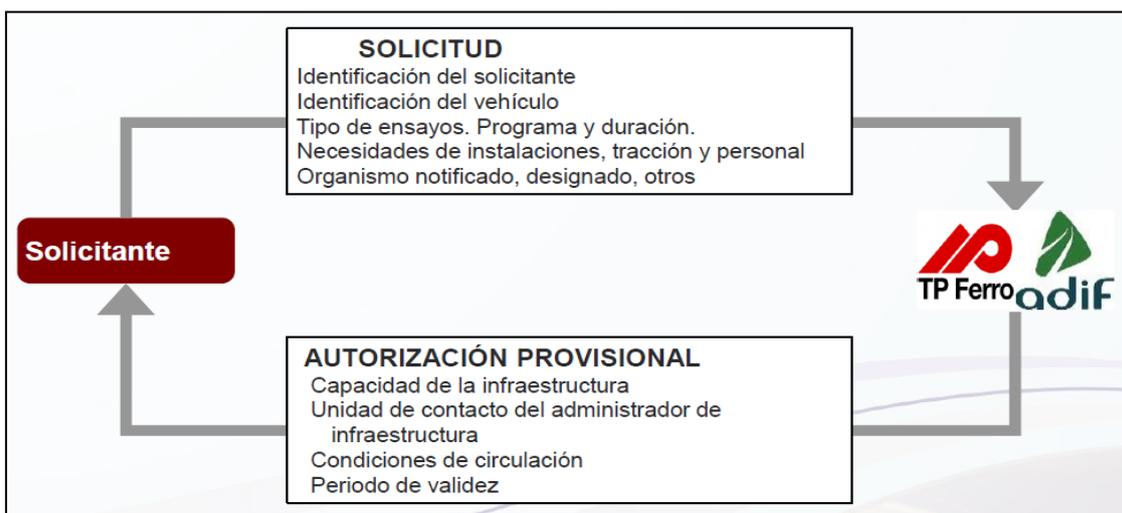
- **El motor GNL y el depósito criogénico no deberían suponer una modificación superior al +/- 10% del peso respecto al motor y depósito diésel**, para no modificar el centro de gravedad por encima de lo aceptado por normativa.
- **Intentar colocar un depósito con las máximas dimensiones posibles**, para afectar lo mínimo posible la autonomía ( $V_{\text{GNL}} \approx 1,63 V_{\text{diésel}}$  para igual cantidad de energía. Además, los depósitos criogénicos no se pueden llenar al máximo de capacidad para poder absorber el efecto del *boil-off* ni se pueden vaciar completamente para evitar el calentamiento del GNL).
- A parte del motor y el depósito criogénico definidos en los puntos anteriores, se identifica la necesidad de implementar un kit de **evaporación**, necesario para cuando el *boil-off* no es suficiente y se requiere evaporar más GNL para aumentar la presión con el fin de alimentar el motor. Asimismo, para el proceso de integración, es necesario la realización de una **instalación de gas** que permita la conducción del GNL entre el depósito y motor.

### **Proceso de acreditación:**

Para que el material rodante modificado pueda ser puesto en servicio es esencial que este esté acreditado para la implementación de la tracción ferroviaria con GNL en las maniobras en entorno portuario. Sin embargo no es obligatoria su acreditación cuando se encuentre en fase de pruebas.

La **acreditación** tiene como objetivo **certificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad, compatibilidad técnica, respeto del medio ambiente y finalmente fiabilidad**. Esta certificación se debe realizar al ser el motor y el depósito integrantes del subsistema del material rodante, por lo que pueden afectar a los requisitos establecidos para ese grupo.

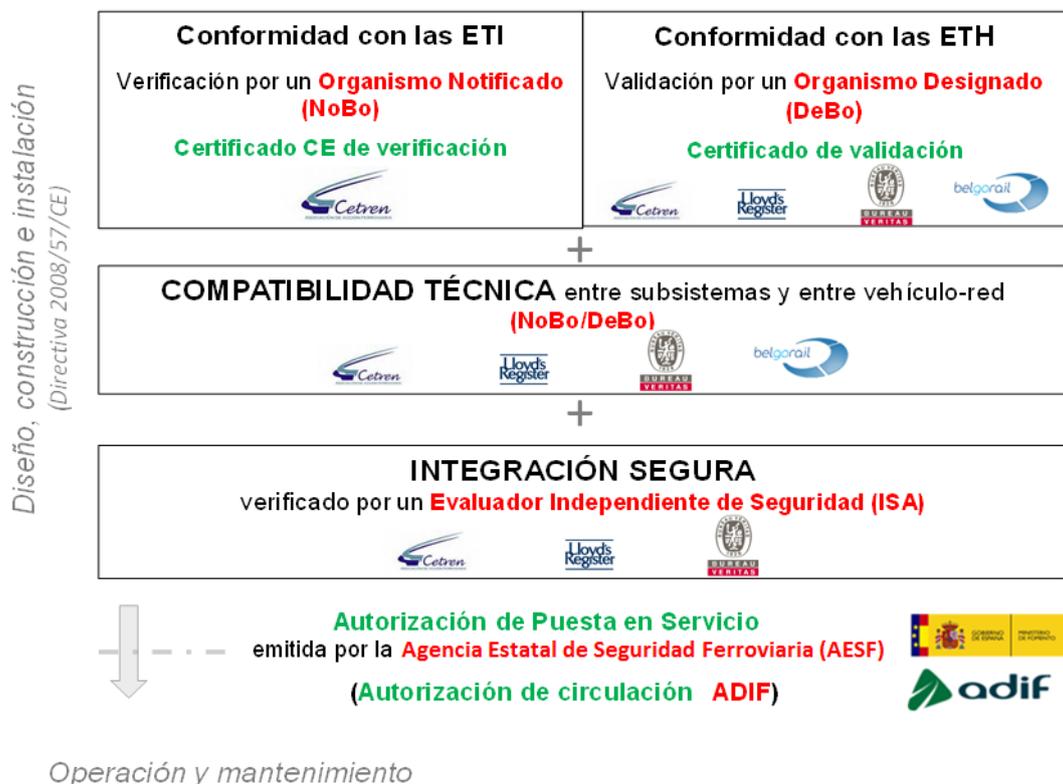
En caso de querer desarrollar simplemente un **prototipo de locomotora** con tracción con GNL, tan solo será necesaria la autorización provisional de Circulación emitida por Adif en la infraestructura de su competencia y que permite realizar ensayos, pruebas y traslados de material.



**Figura 10. Proceso de acreditación. Solicitud y autorización provisional. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Sin embargo, en caso de querer implementar la tecnología para su **explotación comercial** se debe de someter el material rodante a otro tipo de acreditación; debiéndose abordar la certificación del tren (ya sea tren tipo o la serie completa) y contra qué se certifica. En tal caso, se aplicará la directiva 2008/57 (ETIs) y el Real Decreto 1434/2010.

Los pasos a seguir para obtener la autorización de puesta en servicio y de circulación son los siguientes:



**Figura 11. Proceso de acreditación. En rojo aparecen los Organismos de certificación y en verde los Documentos expedidos. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Como primer paso, el material debe cumplir las **especificaciones técnicas** tanto a nivel Europeo (ETI) como a nivel nacional (ETH). Las regulaciones técnicas Europeas son las que garantizan la interoperabilidad del sistema ferroviario a nivel Europeo mientras que las especificaciones técnicas de homologación a nivel nacional tan solo están referidas al material rodante y cada vez tiene menos peso en favor de las ETI.

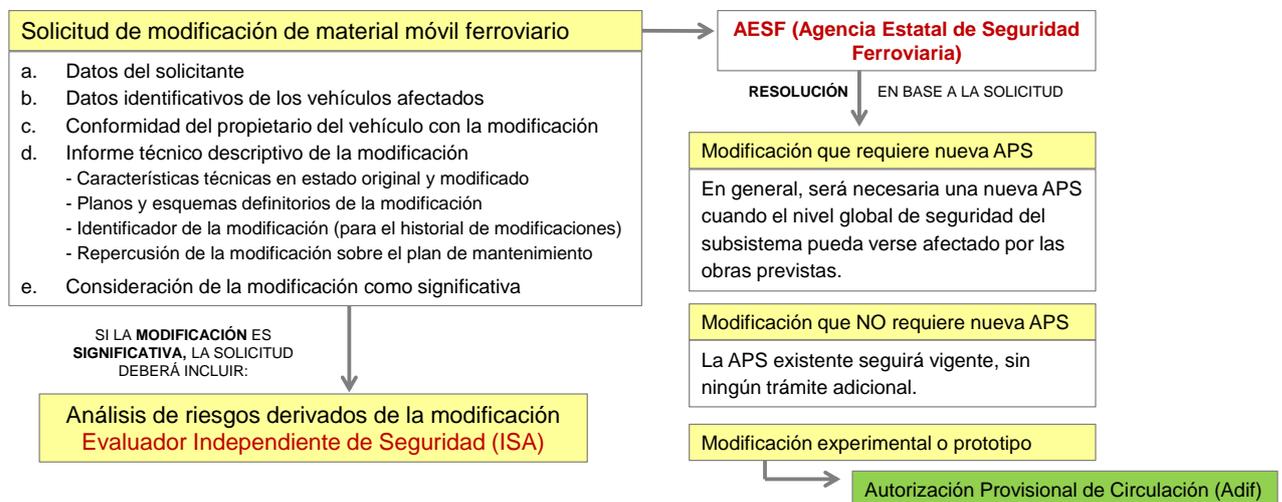
La verificación CE (certificación ETI) se realiza contra las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad de acuerdo a las directivas Europeas. Son del ámbito y comunes a los países miembros de la UE. Cada país puede tener sus normas nacionales, y en el caso de España, se debe cumplir la Especificación Técnica de Homologación (ETH) para la cual también se debe certificar (en el caso de ancho métrico, sería la ETM, Especificación Técnica de ancho Métrico).

Para obtener la autorización de circulación de un vehículo, como norma general, es necesario primero aportar la **verificación CE** (certificarlo contra ETI) y las certificaciones contra las normas nacionales (en el caso de España, certificarlo contra ETH) de aquellos países/regiones por los que va a circular el material. Existen sus excepciones, y adicionalmente, esta regulación se está modificando a nivel europeo para optimizar el proceso de certificación del material móvil entre

países miembros, en función de las autorizaciones vigentes de un material en otros países.

Asimismo se debe verificar la **compatibilidad técnica**. Esto se hace para los distintos subsistemas así como entre el vehículo y la red. Y para acabar se **verifica la integración de los subsistemas** en la maquinaria que garanticen el funcionamiento seguro de todo el sistema.

El proceso de acreditación de material motor con tracción a GNL puede simplificarse si el motor se ensambla en un material rodante previamente acreditado, como serían las locomotoras 310 y 311 que operan las maniobras ferroviarias en el recinto portuario del Puerto de Tarragona.



**Figura 12. Proceso de acreditación. Solicitud de modificación de material móvil ferroviario. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Si se opta por una modificación de material rodante ferroviario ya acreditado (locomotoras 310/311), se estará frente a una modificación significativa del material. Esta modificación supondrá un elevado grado de innovación tecnológica por lo que se requerirá la aplicación de la Resolución Circular 1/2011 que prevé la acreditación de material ferroviario que ha sido significativamente modificado. Según esta resolución es necesario la realización de los siguientes puntos:

- Realización de un análisis de riesgos derivados de la implementación de la modificación propuesta.
- Redacción de un informe de un evaluador independiente sobre el proceso de evaluación y análisis del riesgo.

Como resumen de la fase de adaptación tecnológica de la modificación, a continuación se exponen las **principales conclusiones** sobre el **proceso de acreditación y puesta en servicio** de locomotoras modificadas:

- Según lo analizado anteriormente, la mejor manera de superar las barreras derivadas del proceso de acreditación y puesta en servicio de locomotoras con tracción con GNL es **introducir el motor de GNL en una locomotora 310/311 que ya esté acreditada**. Esto supone ir de la mano de **Adif** ya que se necesita contar con la **predisposición** de esta entidad para transformar sus locomotoras o prestarlas para que se haga una prueba piloto. Los principales beneficios de esta colaboración con Adif son en relación a un importante ahorro de costes temporales y monetarios de acreditación.
- Para conocer la definición exacta del **coste temporal y monetario** es preciso conocer la disponibilidad del motor (en relación al prototipo, industrialización). En cuanto a los **costes temporales**, estos dependerán en parte de lo bien que esté montado el expediente, por lo que es crucial involucrar a un organismo de acreditación desde el inicio del proceso. Otro punto clave es la correcta evaluación del **alcance de la modificación, considerando la Resolución Circular 1-2011/Orden ministerial 233 2006**. Los **costes monetarios** dependerán del **número de expedientes** a elaborar y del número de **características** a modificar (seguridad –ej. materias peligrosas–, compatibilidad técnica, medioambiente, fiabilidad).
- Por último, para asegurar el buen desarrollo del proyecto es necesario disponer de agentes que asuman los distintos roles necesarios de acreditación e integración. Se considera oportuno que **el integrador ejerza de solicitante** (ARMF estaría dispuesto a ejercer de integrador en el caso de que se llevara a cabo el proyecto). Se aconseja también que Bureau Veritas ejerza delante la AESF como organismo designado para el proceso de **acreditación** debido a su amplia experiencia en el campo del GNL y el ferrocarril.

## 5.2. Fase 2: Implantación de la infraestructura de suministro

El diseño e implantación de las instalaciones de **suministro de GNL** (sean fijas o móviles) deberán permitir, como mínimo, **una calidad de servicio igual o superior** a la ofrecida por la logística del combustible diésel.

Para ello, es muy importante asegurar la **autonomía** de las cabezas tractoras para no interferir en el rendimiento de las mismas. Por lo tanto se debe adoptar un único punto de aprovisionamiento de GNL mediante planta móvil (camión cisterna) que igualaría el número de puntos actuales y, por consiguiente igualaría también la autonomía actual (oferta de puntos de suministro). No se contempla la construcción de un punto fijo de aprovisionamiento de GNL (como tampoco lo existe para el aprovisionamiento del diésel) por la baja demanda.

A su vez, se debería disponer de la misma flexibilidad a la hora de realizar los repostajes. Actualmente se llenan los depósitos de las locomotoras una vez cada 4 o 5 días entre las 13:30 y las 14:00. De la misma forma, para no afectar a la autonomía de las operaciones, se podría seguir el mismo modelo actual de subcontratación de los servicios de aprovisionamiento de combustible a una tercera empresa.

Por otra parte, los puntos clave para un correcto **diseño e implantación** de la instalación de almacenamiento/suministro de gas natural licuado son su ubicación en el espacio y su capacidad. En principio una localización próxima a la actual (dentro del recinto de las maniobras ferroviarias en el puerto) parece aconsejable. Habría que analizar las condiciones de seguridad (distancias mínimas a respetar) para concretar su localización exacta. No se detectan en principio problemas de disponibilidad de terrenos (el espacio necesario para el aprovisionamiento es reducido).

Para determinar la capacidad de las instalaciones de GNL se compararán con las existentes dedicadas al almacenaje y distribución de diésel. Actualmente estas instalaciones descargan entre 3.000 litros y 5.000 litros de gasoil cada 4 o 5 días con lo cual, el aprovisionamiento con camión cisterna de GNL de 5 a 8 m<sup>3</sup> será suficiente para igualar la logística del diésel.

### 5.3. Fase 3: Operación y mantenimiento

En la fase de operación y mantenimiento es clave cumplir con los requisitos necesarios para **poder prestar los servicios de maniobras ferroviarias ofertados**.

En este contexto, se debe asegurar los siguientes puntos:

- Con los nuevos motores se tiene la **potencia necesaria** para vencer las resistencias que se oponen a la tracción. El motor de GNL no debe suponer una reducción de la potencia original que impida vencer las resistencias a tracción (éstas son en función de: pendientes/rampas, peso de la composición (se debe considerar que el peso del GNL es inferior al peso del diésel para cantidades equivalentes en capacidad energética), velocidad mínima).
- Los **servicios de suministro de GNL** deben de ser flexibles tanto en **tiempos de respuesta** frente a una demanda de repostaje como en **horarios**.
- Asimismo, el material rodante debe estar el **mayor tiempo posible en funcionamiento** y evitar al máximo los paros por mantenimiento. El GNL al ser un carburante más limpio que el diésel reduce considerablemente las necesidades de mantenimiento de los vehículos.
- Se deben de cumplir los **requisitos legales de contaminación atmosférica**. El GNL es una fuente de energía más limpia que el diésel por lo que no habrá problemas en este sentido.
- Alternativamente, las composiciones propulsadas mediante GNL deben de cumplir las mismas **condiciones de seguridad y peligrosidad** que las propulsadas por diésel. Para ello se dispondrá del **certificado de acreditación y autorización de puesta en servicio y la de circulación** que garantizarán esta condición.

## 5.4. Conclusiones sobre las barreras técnicas y legales

Una vez analizadas y estudiadas las tres fases identificadas necesarias para implementar la tracción ferroviaria con GNL, se obtiene una visión de la existencia de algunas barreras que pueden comprometer la implementación de la tracción ferroviaria con GNL en la prestación de servicios de maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona.

Desde el punto de vista de la **viabilidad técnica**, las primeras incertidumbres aparecen con el motor al no haber ningún motor de GNL para tracción ferroviaria disponible aún en el mercado. De cinco fabricantes contactados, sólo uno (Guascor), tiene en catálogo un motor de GNL que cumpla con los requisitos necesarios para ser utilizado en una locomotora 310/311. Esta escasa oferta de producto en catálogo afecta de forma importante a los precios, hecho que puede comprometer la viabilidad económica de la solución en caso de demanda limitada. Por ello es clave despertar el interés de los fabricantes de motores para acelerar su disponibilidad, que supone un cuello de botella para el proceso de implementación de la tracción ferroviaria con GNL.

En relación a la **viabilidad legal** se destaca como principal barrera a superar para implementar la tracción ferroviaria con GNL el proceso de acreditación. Existen incógnitas sobre el tratamiento del GNL como combustible (hasta ahora, consideración de mercancía peligrosa): Su autorización como combustible en otros modos de transporte allana el camino para superar esta barrera. Asimismo, la primera prueba piloto sobre tracción ferroviaria con GNL en el segmento de los viajeros de media distancia, que se realizará en Asturias, allanará el terreno y ayudará en la definición de un marco normativo de carácter voluntario.

## 6. Análisis de viabilidad Económico-Financiero

### 6.1. Datos e hipótesis para el cálculo

Para realizar los análisis sobre la viabilidad económico-financiera se escogerán una serie de variables representativas de las diferentes tres fases del proyecto, descritas en el apartado anterior.

Para la fase 1 de *adaptación tecnológica* se distinguirá entre el **motor**, el **depósito**, la **integración** y la **acreditación**. Para el **motor** se utilizará como variables, el número de motores por locomotora, el tiempo de fabricación de cada uno de los motores, el coste de inversión por cada motor de GNL adquirido y el porcentaje de maniobras que se van a realizar en el puerto con cabezas tractoras propulsadas por GNL y por diésel. Seguidamente para el **depósito** se tendrán en cuenta como variables el número de depósitos por locomotora, tiempo de fabricación para cada depósito y capacidad del depósito de combustible. Para la **integración** de los sistemas se utilizará la variable del coste de la integración del motor y el depósito y finalmente para la **acreditación** se tendrán en cuenta el coste de la acreditación y el tiempo que se tardará en su realización.

En la fase 2, *distribución y logística de GNL*, se examinará la influencia del **coste del transporte** de GNL con camión cisterna y también la **influencia** de la **procedencia** del GNL.

En la tercera y última fase relativa a *operaciones y mantenimiento*, se tendrán en cuenta nueve variables. Estas hacen referencia al **consumo medio** de las locomotoras, **demanda** de los servicios de maniobras, **evolución de la demanda** de servicios de maniobras, **reparto** de la demanda, **número** de locomotoras transformadas, **velocidad de transformación**, **coste del diésel**, **coste del GNL** y **coste** del **mantenimiento** del motor.

Se resumen todas las variables aquí mentadas en el cuadro siguiente:

<b>ADAPTACIÓN TECNOLÓGICA</b>	<b>MOTOR</b>	Nº motores/locomotora Tiempo fabricación motor	Coste inversión motor GNL % GNL / % diésel
	<b>DEPÓSITO</b>	Nº depósitos/locomotora Tiempo fabricación depósito	Capacidad depósito combustible
	<b>INTEGRACIÓN</b>	Coste de la integración del motor y el depósito	
	<b>ACREDITACIÓN</b>	Coste acreditación	Tiempo acreditación
<b>DISTRIBUCIÓN Y LOGÍSTICA GNL</b>		Coste transporte GNL con camión cisterna	Procedencia del GNL
<b>OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>		Consumo medio de las locomotoras Demanda de servicios de maniobras Evolución de la demanda de servicios de maniobras Reparto de la demanda	Número de locomotoras transformadas Velocidad de transformación Coste del diésel Coste del GNL Coste mantenimiento motor

LEYENDA: *Datos técnicos/económicos* *Hipótesis técnicas/económicas*

**Figura 13. Variables para el análisis de viabilidad económico-financiera. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

### 6.1.1 Descripción de las variables

A continuación, para cada una de las frases se describirán en detalle cada una de las variables escogidas justificando, en los casos necesarios, las hipótesis realizadas. Se distinguirá entre los datos técnicos y las hipótesis técnicas en una primera parte de la descripción de las variables y en una segunda parte se expondrán los datos económicos y las hipótesis económicas.

#### **Fase 1: Adaptación tecnológica:**

Para la fase de adaptación tecnológica, los **datos técnicos** utilizados son los siguientes:

- **Número de motores por locomotora:**
  - Se considera un solo motor por locomotora, dado que se sustituye el motor diésel existente por un motor de GNL de características similares.
- **Número de depósitos por locomotora/Capacidad depósito criogénico:**
  - Se considera un solo depósito por locomotora, dado que se sustituye el depósito existente por un depósito criogénico de capacidad similar (Enric Group, Ingescic, 2015). Esto disminuirá la autonomía actual, pero se considera que no afecta a la viabilidad operativa.

- **Tiempo de fabricación del motor y del depósito:**
  - El tiempo aproximado de fabricación del motor es de 4-5 meses (Guascor, 2015).
  - El tiempo aproximado de fabricación del depósito (transporte incluido) es de 2-3 meses (Chart, 2015; Enric Group, 2015).
- **Tiempo para la acreditación** (Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria; AESF).
  - La AESF dispone de un período de 4 meses una vez presentados todos los certificados y la solicitud de Autorización de Puesta en Servicio (AESF, 2015).

Las **hipótesis técnicas** realizadas se exponen a continuación:

- **Porcentaje de dedicación de GNL en la combustión motora.**
  - En un principio, debido a los bajos niveles de consumo de combustible derivados de las operaciones de maniobras ferroviarias, se contempla la opción de un motor dedicado (100% GNL) para aprovechar al máximo las ventajas del GNL. Esta opción se plantea dado que el coste de GNL es inferior respecto al diésel para un mismo consumo. Adicionalmente, y como se podrá observar más adelante en el estudio de alternativas, se introduce la posibilidad de estudiar la incorporación de un motor con combustible dual, es decir de un motor que es capaz de conmutar su funcionamiento entre varios combustibles (en este caso entre diésel y gas natural).

En relación a los **datos económicos** considerados han sido los siguientes:

- **Coste del motor de GNL.**
  - Existen órdenes de magnitud diferentes según el fabricante:
    - Guascor (2015): 235.000 € (Coste aproximado).
    - Pasch (2013) y GRI (1993): El precio dependería de la potencia instalada. Se trabajaría con ratios de costes en función de la potencia instalada (115 €/kW), con una mayoración del 20%. En este caso, el coste del motor sería de  $700 \text{ kW} \times 115 \text{ €/kW} \times 1,20 = 96.600 \text{ €}$ .
  - Para la definición del escenario base, se tendrá en cuenta un **coste medio** entre ambas soluciones. Por lo tanto, el coste considerado es de **170.000 €**.

- **Coste del depósito de GNL.**
  - El coste del depósito de GNL considerado para la capacidad disponible es de **20.500 €**, con un coste de transporte de 800 € (Enric Group, 2015).
- El **coste de la acreditación** se describe en la siguiente tabla.

<b>Coste de validación y Certificación ( € / vehículo)</b>		<b>Autorización de Puesta en Servicio ( € / vehículo)</b>	
<i>1ª ud.</i>	<i>A partir 2ª ud.</i>	<i>1ª ud.</i>	<i>A partir 2ª ud.</i>
300.000	30.000	3.000	300

**Tabla 13. Descripción de los costes de acreditación. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de datos de Bureau Veritas & AESF (2015).**

La significativa diferencia entre los costes anteriormente presentados en relación al coste de la certificación y de autorización de puesta en marcha dependiendo de si se trata de la primera unidad o bien a partir de la segunda unidad, se debe a que en la primera unidad se realiza la certificación de un "tren tipo" trabajo que servirá de base para todas las unidades de la misma serie.

Las **hipótesis económicas** realizadas han sido las siguientes:

- **Coste de integración del motor y del depósito.**
  - Se asume un coste de integración del motor y del depósito del orden de **21.000 €** (ARMF, 2015).

## **Fase 2: Implantación de la infraestructura de suministros**

En esta fase las **hipótesis técnicas** consideradas han sido las siguientes:

- **Procedencia del GNL.**
  - El camión cisterna transportará directamente el GNL desde la planta de Barcelona hasta el puerto de Tarragona (planta de regasificación más cercana). La distancia entre la planta y la zona de suministro es de 98.3 km.
- **Tiempo de descarga del camión cisterna.**
  - Se considera que es inferior a 2 horas.

- **Caudal de descarga combustible.**
  - Se considera un caudal de 80 l/min.
- **Capacidad del camión cisterna.**
  - Se ha considerado que una capacidad de 5 m<sup>3</sup> es suficiente (equivalente a la de la logística del diésel).
- **Sistema impositivo.**
  - El GNL transportado en el camión cisterna debe tener un sistema impositivo único. De este modo, se considera la imposibilidad de aprovechar el GNL sobrante de la cisterna para otros usos.

Los **datos económicos** utilizados han sido los siguientes:

- **Coste del transporte del GNL** (ESK, 2015).
  - Como primera aproximación se han considerado los siguientes costes:
    - Coste del transporte de la cisterna de GNL: 1,2 €/km.
    - Coste de la descarga (inmovilización del vehículo): 35,5 €/h, teniendo en cuenta que las 2 primeras horas no tienen coste.

Cabe mencionar que en un horizonte futuro el Puerto de Tarragona dispondrá de almacenamiento de GNL para el suministro de bunkering a buques, por lo que este coste asociado al transporte llegaría a ser despreciable.

### **Fase 3: Operación y mantenimiento**

Los **datos técnicos** para esta fase son los siguientes:

- **Consumo medio de las locomotoras** (Adif, 2015).
  - Serie 311: 3,49 litros diésel/km que equivaldrían a 5,69 litros GNL/km.
- **Demanda de servicios ferroviarios de maniobras** (Adif, 2015).

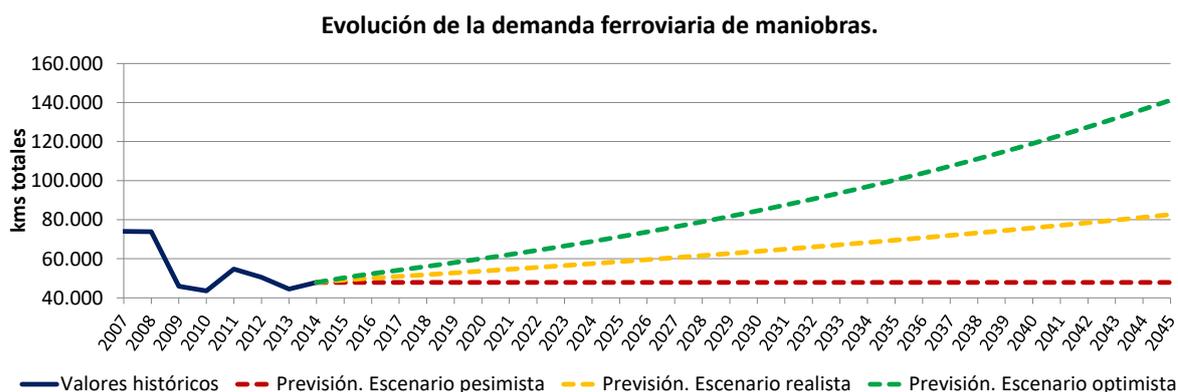
Datos históricos de servicios ferroviarios de maniobras servidos por locomotoras de la serie 311 en las instalaciones de la Autoridad Portuaria de Tarragona y en Tarragona Mercancías (Tarragona Clasificación).

<b>Año</b>	<b>Total Litros diésel</b>	<b>Total Horas</b>	<b>Total Km</b>
2007	270.730	14.904	73.983
2008	239.344	13.200	73.838
2009	140.378	7.711	45.919
2010	147.638	8.465	43.506
2011	198.021	9.923	54.713
2012	185.252	9.029	50.541
2013	161.733	8.555	44.466
2014	173.181	9.582	47.870

**Tabla 14 Datos históricos de servicios ferroviarios de maniobras servidos por locomotoras de la serie 311 en el Puerto de Tarragona. Fuente: Adif (2015)**

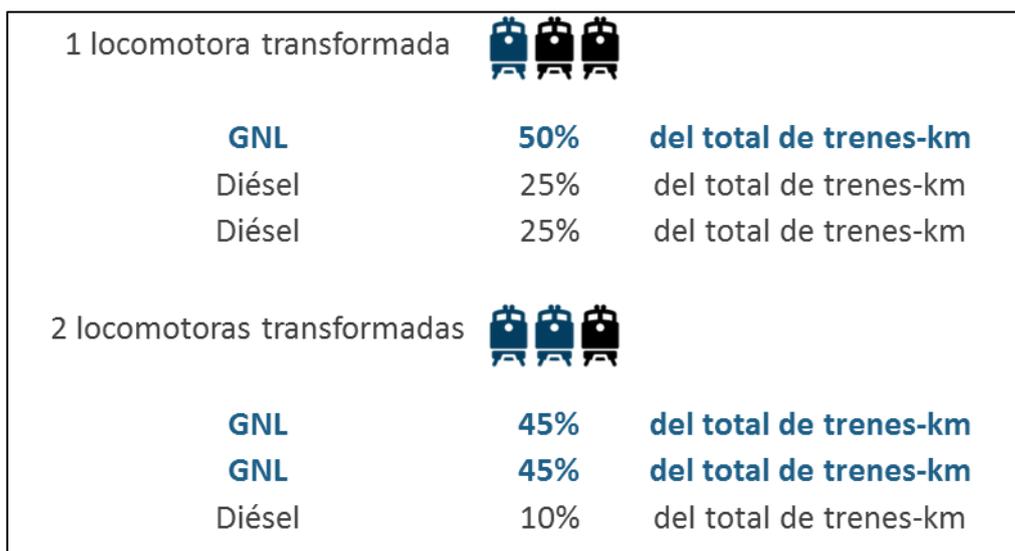
Las **hipótesis técnicas** realizadas son las siguientes:

- **Evolución prevista de la demanda de servicios ferroviarios de maniobras.**
  - Se consideran tres escenarios distintos de evolución de la demanda (ver año 2014).
    - **Escenario pesimista:** mantenimiento de los valores correspondientes al año 2014.
    - **Escenario realista:** crecimiento de la demanda igual al crecimiento previsto del PIB de España (FMI, 2015).
    - **Escenario optimista:** crecimiento de la demanda igual al doble del crecimiento previsto del PIB de España (FMI, 2015).



**Figura 14. Evolución de la demanda ferroviaria de maniobras. Fuente: Institut Cerdà (2015) a partir de FMI (2015).**

- **Reparto de la demanda ferroviaria entre las locomotoras disponibles.**
  - Se consideran dos escenarios diferentes, teniendo en cuenta que el número total de las locomotoras en servicio es de 3:
    - **Reparto equitativo entre las locomotoras disponibles (escenario de base):** Distribución a partes iguales (1/3, 1/3, 1/3) de los kilómetros totales recorridos entre las tres locomotoras disponibles, independientemente del combustible de propulsión.
    - **Reparto favorable a las locomotoras propulsadas mediante GNL (escenario para el análisis de sensibilidad):** Distribución que maximiza los kilómetros recorridos por las locomotoras propulsadas mediante GNL, en función del número de locomotoras transformadas. Concretamente se han utilizado los repartos siguientes:



**Figura 15. Reparto de usos de combustible. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

- **Locomotoras a transformar.**
  - Dado que las locomotoras de la serie 310 tienen una demanda residual en los servicios de maniobras de Puerto de Tarragona, solamente se analiza la transformación de las locomotoras de las serie 311.
- **Número de locomotoras transformadas.**
  - Se consideran tres escenarios diferentes:
    - Transformación de 3 locomotoras con tracción diésel a GNL (escenario base).
    - Transformación de 1 locomotora con tracción diésel a GNL (escenario para el análisis de sensibilidad).
    - Transformación de 2 locomotoras con tracción diésel a GNL (escenario para el análisis de sensibilidad).
- **Velocidad de transformación de las locomotoras.**
  - En aquellos escenarios en los que se plantea la transformación de más de una locomotora, se considera que todas ellas estarán transformadas en los dos primeros años del proyecto (una el primer año, y el resto el segundo año).

Los **datos económicos** utilizados son los siguientes:

- **Precio de venta del carburante:**

En este precio se incluye el Coste de la fuente de energía con el Margen más el coste de transporte y el coste de gestión y dispensación Adif.

- **Coste del diésel** (coste energía + margen + coste del transporte). A continuación se muestra los costes diésel que se disponen hasta el momento:
  - Valores de 2013: **0,763 €/l** (Enagás, 2013).
  - Valores de 2014: **0,576 €/l** (Adif, 2015).
  - Valores de 2015: **0,450 €/l** (Adif, 2015).
- **Coste de gestión de Adif.**
  - 0,021 €/l (Adif, 2012).
- **Coste de dispensación de Adif.**
  - 0,020 €/l (Adif, 2012).

Las **hipótesis económicas** son las siguientes:

- **Precio de venta del GNL.** Se considera un precio mínimo del GNL (sin margen para la empresa gasista).
  - **Coste del GNL** (coste energía).
    - 31,31 €/MWh = **0,199 €/l** (Gas Natural Fenosa, 2015).
  - **Coste del transporte del GNL.**
    - **0,015 €/l** (ESK, 2015).
  - **Coste de gestión de Adif.**
    - **0,021 €/l** (Adif, 2012).
  - **Coste de dispensación de Adif.**
    - **0,021 €/l** (Adif, 2012).
- **Sistema impositivo del GNL:**
  - Se considera un escenario sin impuestos (comparable con escenario actual ferroviario). De aplicarse impuestos, habría que añadir un coste de 0,026 €/litro (ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales).
- **Coste de mantenimiento de un motor GNL:**
  - Se considera que el incremento del coste de mantenimiento de un vehículo con tracción GNL respecto al coste de mantenimiento de un vehículo con tracción diésel es despreciable. Los posibles aspectos diferenciales en ningún caso suponen un aspecto crítico ni significativo que haga aumentar los costes de mantenimiento.

## 6.2. Escenario base

En la siguiente tabla se presentan todas las variables de entrada utilizadas en el escenario base así como valores o la horquilla de valores que han adoptado.

ESCENARIO BASE	ADAPTACIÓN TECNOLÓGICA	COSTE MOTOR	170.000 €
		COSTE DEPÓSITO	21.300 €
		COSTE INTEGRACIÓN	21.000 €
		Nº LOCS. TRANSFORMADAS	3
		VELOCIDAD DE GASIFICACIÓN	3 cada 2 años
	ACREDITACIÓN Y VALIDACIÓN	1ª UNIDAD	300.000 € + 3.000 €
		A PARTIR DE LA 2ª UNIDAD	30.000 € + 300 €
	SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE	PRECIO DIESEL	0,600 €/litro
		PRECIO GNL	Variable entre 0,250 y 0,350
		IMPUESTOS CARBURANTES	NO
	ESCENARIOS DE DEMANDA	EVOLUCIÓN CIRCULACIONES	Esc. evol. demanda realista
		REPARTO USO LOCOMOTORAS GNL	EQUITATIVO
	VARIABLES FINANCIERAS	TASA DE REINVERSIÓN	8%
		TASA DE FINANCIACIÓN	5%

**Figura 16. Resumen de las variables del escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

### 6.2.1 Rentabilidad en el escenario base

Al análisis de rentabilidad se basa en el cálculo de los indicadores VAN (valor actualizado neto) y la rentabilidad (payback) del proyecto. El **VAN** corresponde a un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos que tendrá un proyecto para determinar, si una vez descontada la inversión inicial, resultaría en alguna ganancia. Así pues, en caso que el resultado sea positivo, se determinaría que el proyecto es viable. En cuanto al **payback**, es un método de evaluación de inversiones estático que determina el momento en que se recupera el desembolso inicial invertido en el proyecto.

Así pues, al realizar el análisis de rentabilidad para el **escenario base**, se constata que el proyecto no es rentable para el operador de los servicios de maniobras del puerto de Tarragona en el caso de contar con una demanda realista. En las siguientes gráficas, se analiza la evolución tanto del VAN como del payback que demuestran la no rentabilidad del proyecto en este escenario.

Para el cálculo del VAN se calcula el **flujo de caja** del proyecto correspondiente a la suma de los beneficios menos los gastos, es decir, los flujos de entrada obtenidos por los beneficios económicos que conlleva el cambio a combustible GNL menos los flujos de costes implicados en el proceso.

Para el cálculo de los **flujos de caja** se ha considerado los siguientes puntos:

- La **diferencia** del **coste de aprovisionamiento** de los combustibles: calculado como la diferencia entre el coste derivado del consumo del escenario actual con combustible diésel respecto a los escenarios estudiados de transformación a un consumo 100% GNL o bien a un motor dual (GNL y diésel). Esta diferencia se corresponde al ahorro monetario debido al menor coste del GNL respecto el diésel y por lo tanto se traduce en un ingreso en el flujo de caja.
- **Beneficio medioambiental:** correspondiente a la monetización derivada de la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> debido al cambio del combustible diésel al GNL.
- **Coste de mantenimiento:** este coste se considera despreciable debido a que las posibles diferencias en el mantenimiento no son significativas, por lo que se concluye que la diferencia entre el escenario actual con combustible diésel y los escenarios analizados a continuación (GNL dedicado o dual –GNL y diésel-) es despreciable.

A continuación, se presenta la metodología de cálculo de los puntos descritos anteriormente.

En primer lugar, para el cálculo del **coste de aprovisionamiento**, se consideran las siguientes variables:

- Kilómetros totales recorridos por la locomotora por año.
- Consumo del combustible correspondiente: basándose en el escenario actual con combustible diésel o en los escenarios estudiados de transformación 100% a GNL, o bien con un motor dual (GNL y diésel).
- Coste del diésel o del GNL para el operador, dependiendo del escenario estudiado.

Escenario actual (locomotora Diésel)

$$C_{aprov}^{diesel} = km\ totales\ [Km] * consumo\ diesel\ \left[\frac{l}{km}\right] * coste\ del\ diésel\ para\ el\ operador\ \left[\frac{€}{l}\right]$$

Escenario motor dedicado (locomotora 100% GNL)

$$C_{aprov}^{GNL} = km\ totales\ [Km] * consumo\ GNL\ \left[\frac{l}{km}\right] * coste\ del\ GNL\ para\ el\ operador\ \left[\frac{€}{l}\right]$$

Escenario motor dual (locomotora % GNL y % diésel)

$$C_{aprov}^{d+GNL} = km\ totales\ [Km] * \left[ \left( \% \text{ consumo GNL} \left[\frac{l}{km}\right] * coste\ del\ GNL\ para\ el\ operador\ \left[\frac{€}{l}\right] \right) + \left( \% \text{ consumo diesel} \left[\frac{l}{km}\right] * coste\ del\ diésel\ para\ el\ operador\ \left[\frac{€}{l}\right] \right) \right]$$



### DIFERENCIA DE COSTE DE APROVISIONAMIENTO (AHORRO)

Escenario motor dedicado:

$$Dif_{aprov} = C_{aprov}^{diesel} - C_{aprov}^{GNL}$$

Escenario motor dual:

$$Dif_{aprov} = C_{aprov}^{diesel} - C_{aprov}^{d+GNL}$$

**Figura 17. Cálculo del coste de aprovisionamiento para una locomotora. Fuente: Institut Cerdà.**

En el caso del **beneficio ambiental**, el cálculo se basa en las siguientes variables:

- Emisiones de CO<sub>2</sub> para los distintos escenarios (actual 100% diésel y los escenarios estudiados de transformación: 100% GNL o motor dual).
- Factor de emisión con el fin de monetizar las toneladas de CO<sub>2</sub>.

La diferencia entre un escenario determinado de transformación (100% GNL o dual) en relación al escenario actual de locomotoras diésel, aporta la reducción de las emisiones resultante que, una vez multiplicado por el factor de emisión que estipula el precio por cada tonelada de CO<sub>2</sub>, resulta en el valor monetario ahorrado de la conversión a GNL.

Escenario actual (locomotora Diésel)

$$Emisiones_{CO_2}^{diesel} = km \text{ totales [Km]} * \text{Factor de emisión para loc. diesel} \left[ \frac{Kg}{km} \right]$$

Escenario motor dedicado (locomotora 100% GNL)

$$Emisiones_{CO_2}^{GNL} = km \text{ totales [Km]} * \text{Factor de emisión para loc. diesel} \left[ \frac{Kg}{km} \right]$$

Escenario motor dual (locomotora % GNL y % diésel)

$$Emisiones_{CO_2}^{d+GNL} = \left( km \text{ totales GNL [Km]} * \text{Factor de emisión para loc. diesel} \left[ \frac{Kg}{km} \right] \right) + \left( km \text{ totales diésel [Km]} * \text{Factor de emisión para loc. diesel} \left[ \frac{Kg}{km} \right] \right)$$



### REDUCCIÓN DE EMISIONES CO<sub>2</sub> (BENEFICIO)

Escenario motor dedicado:

$$Dif_{emisiones} = (Emisiones_{CO_2}^{diesel} - Emisiones_{CO_2}^{GNL}) * Coste \left[ \frac{€}{tCO_2} \right]$$

Escenario motor dual:

$$Dif_{emisiones} = (Emisiones_{CO_2}^{diesel} - Emisiones_{CO_2}^{d+GNL}) * Coste \left[ \frac{€}{tCO_2} \right]$$

**Figura 18. Cálculo del beneficio medioambiental. Fuente: Institut Cerdà.**

Por último, el valor de la **inversión inicial** corresponde a los gastos derivados de la conversión de la locomotora actual diésel a GNL (100% dedicada o motor dual). Los factores incluidos en la conversión son los siguientes:

- Coste Motor.
- Coste del depósito criogénico para el GNL.
- Coste de la integración.
- Coste de validación y certificación.
- Coste de la puesta en servicio.

Adicionalmente, se toma como hipótesis que la tasa de descuento del proyecto ( $r$ ) es de un 8%. Asimismo, el periodo calculado se extiende del 2016-2045 siendo ( $n$ ) igual a 31.

A continuación se expone la fórmula utilizada para el cálculo del VAN del proyecto:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (1)$$

Dónde:

- $r$  , es la tasa de interés del proyecto asumida
- $Q_t$  , es el flujo de caja para cada periodo

$I_0$  ; es la inversión inicial

$n$  , es el número de periodos considerados

En cuanto al payback, se calcula restando a la inversión inicial los flujos de caja de cada periodo, hasta que se llega al periodo en que se recupera la inversión. La fórmula utilizada es:

$$Payback = a + \frac{I_0 - b}{F_t} \quad (2)$$

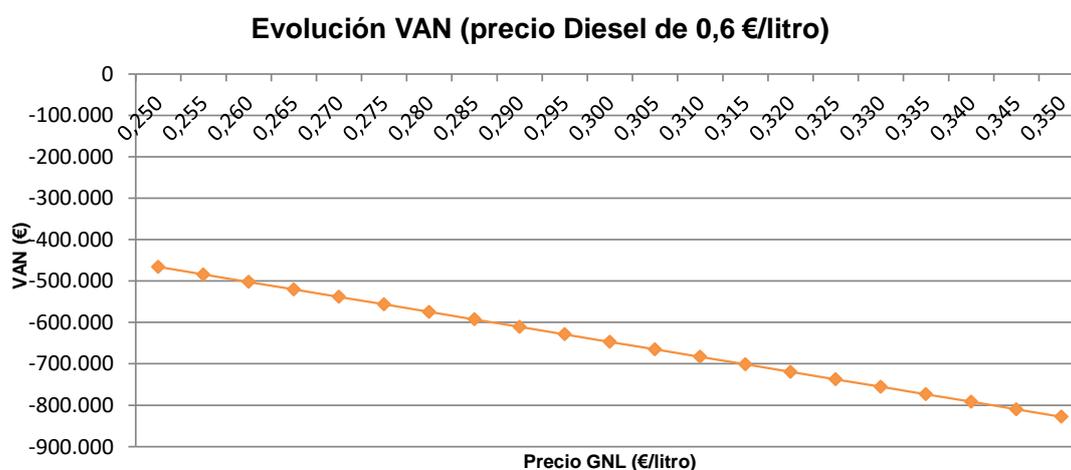
Dónde:

$a$  , es el número del periodo inmediatamente anterior hasta recuperar el desembolso inicial

$I_0$  ; es la inversión inicial

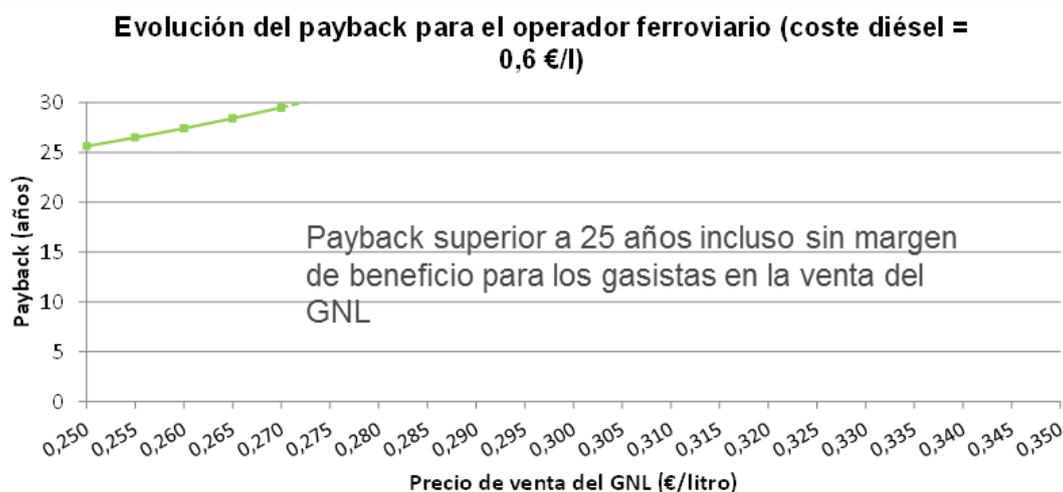
$b$  , es la suma de los flujos hasta el final del periodo "a"

$F_t$  , valor del flujo de caja del año en que se recupera la inversión



**Figura 19. Gráfica de la evolución del VAN sobre el escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Como se puede observar en el gráfico de la evolución del VAN, este no es positivo para ningún valor del precio de venta del GNL. Se constata que siempre está por debajo de los 400.000 € por lo que se justifica la no viabilidad del proyecto en este escenario.



**Figura 20. Gráfica de la evolución del payback en el escenario base. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En cuanto al payback para el agente ferroviario, se observa que es superior a los 25 años incluso en el escenario en el que el gasista no tiene beneficio al desarrollar su actividad. Por ello, se considera que este escenario tampoco es viable para la explotación de la operativa ferroviaria en el puerto de Tarragona con GNL.

### 6.3. Análisis de sensibilidad

Como consecuencia del resultado negativo relativo a la rentabilidad del proyecto en el escenario base, se ha realizado un análisis de sensibilidad para explorar distintos escenarios y su rentabilidad asociada.

Para realizar este análisis de sensibilidad se han identificado las **variables clave** para la construcción de **escenarios rentables** para el operador ferroviario. Estos escenarios también se han analizado desde el punto de vista del agente gasista. De este modo, se han analizado las acciones a emprender para garantizar la viabilidad económica del proyecto en su globalidad.

Así pues, para poder construir un escenario rentable para el **operador ferroviario** se han considerado las siguientes acciones:

1. **Identificar las variables determinantes para la rentabilidad del Proyecto** (punto de vista del operador ferroviario).
2. **Construir el escenario óptimo** (más favorable) desde el punto de vista del operador ferroviario.
3. Plantear los **escenarios posibilistas para la Autoridad Portuaria de Tarragona**.

Asimismo, se ha validado también la rentabilidad para el **agente gasista** así como para la **globalidad del proyecto (operador ferroviario y agente gasista)**.

### 6.3.1 Identificación de las variables clave para el operador ferroviario

En la primera etapa del análisis de sensibilidad se ha analizado la repercusión de cada una de las variables sobre la rentabilidad (payback) del operador ferroviario, con la finalidad de identificar y priorizar las variables clave que afectan a dicha rentabilidad.

Las **variables** consideradas para el análisis de sensibilidad se presentan como los parámetros resaltados en violeta en la tabla de a continuación:

<b>ADAPTACIÓN TECNOLÓGICA</b>	<b>TIPO Y COSTE DEL MOTOR</b>	Dedicado (96.600 – 235.000 €) / Dual (44.170 €)
	COSTE DEPÓSITO	21.300 €
	COSTE INTEGRACIÓN	21.000 €
	<b>Nº LOCS. TRANSFORMADAS</b>	1 – 2 – 3 locomotoras
	<b>VDAD. GASIFICACIÓN</b>	2 – 5 – 10 años
<b>ACREDITACIÓN Y VALIDACIÓN</b>	<b>1ª UNIDAD</b>	100.000 – 300.000 € + 3.000 €
	<b>A PARTIR DE LA 2ª UNIDAD</b>	10.000 – 30.000 € + 300 €
<b>SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE</b>	<b>COSTE DIESEL</b>	0,400 – 0,900 €/litro
	COSTE GNL	Variable entre 0,250 y 0,350
	IMPUESTOS CARBURANTES	NO
<b>ESCENARIOS DE DEMANDA</b>	<b>EVOLUCIÓN CIRCULACIONES</b>	Pesimista-Realista-Optimista
	<b>REPARTO USO LOC. GNL</b>	Equitativo Diésel-GNL / Favorable GNL
<b>VARIABLES FINANCIERAS</b>	TASA DE REINVERSIÓN	8%
	TASA DE FINANCIAMIENTO	5%
<b>IMPACTO MEDIO AMBIENTE</b>	<b>INTERNALIZACIÓN DE LAS EMISIONES</b>	Sí / No

**Figura 21. Variables clave para el operador ferroviario. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En base a las variables anteriormente presentadas, a continuación se presenta para cada una de ellas, los resultados del análisis de sensibilidad que permitirá concluir cuáles son las que tienen un mayor impacto en la transformación de tracción diésel a tracción con GNL.

## 1. Tipología y coste del motor

La primera variable analizada es la tipología de motor. Como ya se avanzaba en el apartado 5.1.1 *Descripción de las variables*, aunque el escenario base se calcula considerando un motor exclusivo de GNL, en el análisis de sensibilidad se introduce la posibilidad de un motor dual GNL-diésel, posibilitando su funcionamiento alternativamente alimentado por gas natural licuado o bien por combustible diésel, realizando la conmutación entre ambos combustibles de una manera automática. Estas diferencias entre la tipología del motor se representan aplicando un porcentaje de utilización a cada tipo de combustible (diésel y GNL) en el caso de un motor dual y 100% GNL en el caso de un motor dedicado.

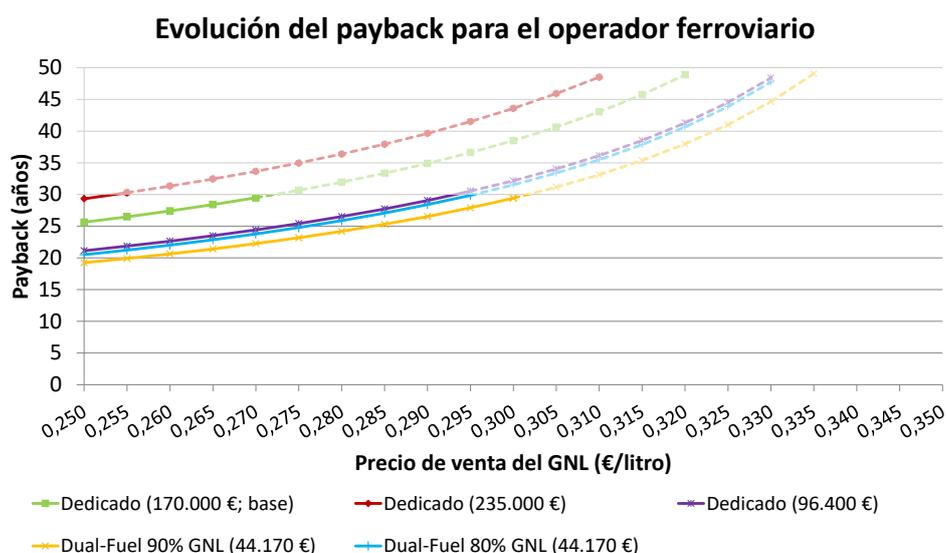
Para conocer cómo afecta esta variable al proyecto, se realizará un análisis de sensibilidad en el que la única variable modificada respecto al escenario base será el tipo y el coste del motor. Las variables utilizadas en este análisis se resumen en la tabla siguiente (cabe destacar que la variable estudiada y modificada se indica sombreada en amarillo).

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado (96.600 € / 170.000 € / 235.000 €) Dual 90% GNL (44.170 €) Dual 80% GNL (44.170 €)
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Realista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

 Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 22. Tipo y coste del motor como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Con los anteriores valores, a continuación se presentan los resultados obtenidos para el payback del proyecto.



**Figura 23 Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el tipo y coste del motor. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Cabe mencionar, que para todos los cálculos del payback para el análisis de sensibilidad se utiliza la fórmula indicada en el apartado 5.2.1.

Como se puede observar en los escenarios analizados, el **coste del motor influye** de forma significativa en la variabilidad del **payback**. Por consiguiente, la **reducción** de **75.000 €** en el coste del motor supone una reducción del payback de alrededor de **5 años**.

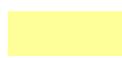
Dado que un **motor dual fuel** es sensiblemente **más barato** que uno **dedicado** (44.000 € vs 170.000€, aproximadamente), la **tipología** del motor también constituye un factor con un **impacto elevado** en la rentabilidad del proyecto.

Se concluye que los **mejores payback** se obtienen con un motor dual fuel con un alto porcentaje de GNL en mezcla para reducir los costes operativos.

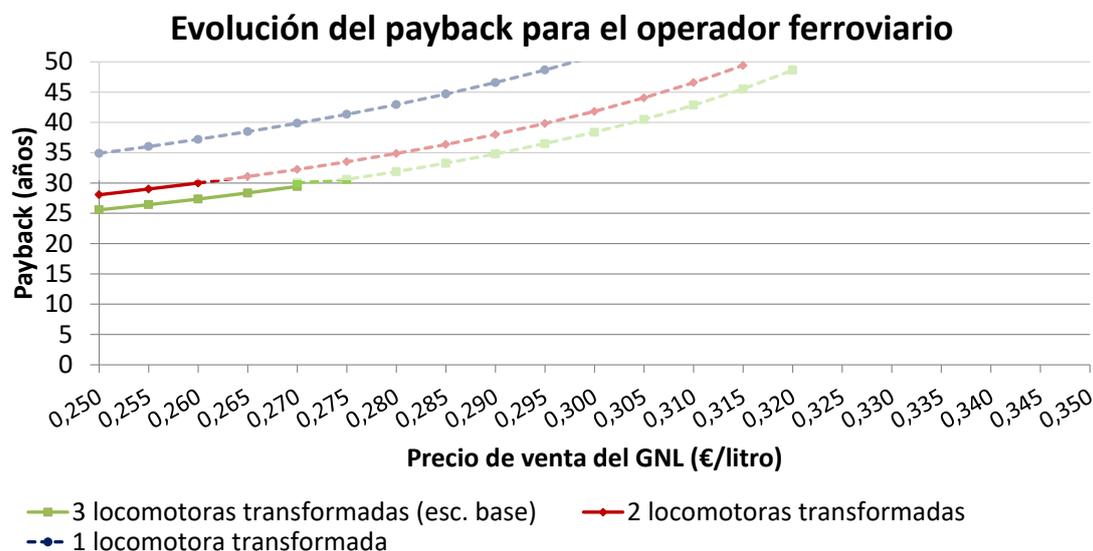
## **2. Número de locomotoras transformadas**

De manera análoga a la anterior, se ha realizado un análisis de sensibilidad en el que se determina en este caso cual es el número idóneo de locomotoras a transformar para asegurar la mayor rentabilidad. En este caso solo se modificarán respecto al escenario base la variable del número de locomotoras transformadas y la velocidad a las que éstas se transforman. El escenario para este análisis de sensibilidad queda como se indica en la siguiente tabla.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	1 / 2 / 3
Velocidad transformación	1 / 2 / 2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Pesimista / Optimista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

 Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 24. Nº de locomotoras transformadas y velocidad de transformación como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).**



**Figura 25. Evolución en el payback para el escenario con valor ajustable en el nº de locomotoras transformadas y la velocidad de transformación. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Debido a la **diferenciación** de los costes de acreditación entre la **primera unidad** transformada y las **sucesivas**, se observa un aumento significativo del payback en

el escenario con una **sola locomotora** transformada (mínimo de 35 años para 1 sola locomotora transformada vs. mínimo de 25 años para 3 locomotoras).

La **transformación** del **total** de la **flota** disponible, es decir 3 locomotoras, constituye el **escenario más favorable** para el operador ferroviario.

### **3. Velocidad de transformación de la flota de locomotoras de maniobras**

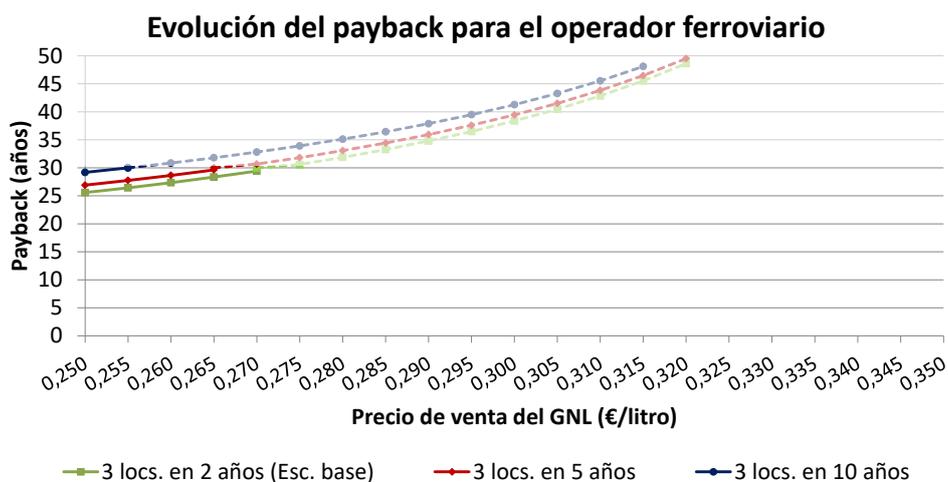
Para esta variable se estudia la influencia en el payback para el operador ferroviario según cual sea la velocidad de transformación de las locomotoras, considerando una horquilla de valores comprendidos entre los 2 y los 10 años. Las variables consideradas en el análisis se recogen en la siguiente tabla.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	3
<b>Velocidad transformación</b>	<b>2 / 5 / 10 años</b>
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Pesimista / Optimista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 26. Velocidad de transformación como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Calculado de manera análoga a los anteriores casos, se exponen las variaciones del payback para el operador ferroviario en el gráfico siguiente según los valores de la variable modificada.



**Figura 27. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la velocidad de transformación. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Una **transformación** de la flota en **2 años** reduce en casi **5 años** el payback respecto a un escenario de transformación en **10 años**.

De este modo se **recomienda transformar la flota con la mayor celeridad posible**, con el objetivo de obtener resultados positivos con la mayor antelación.

#### **4. Coste de la acreditación**

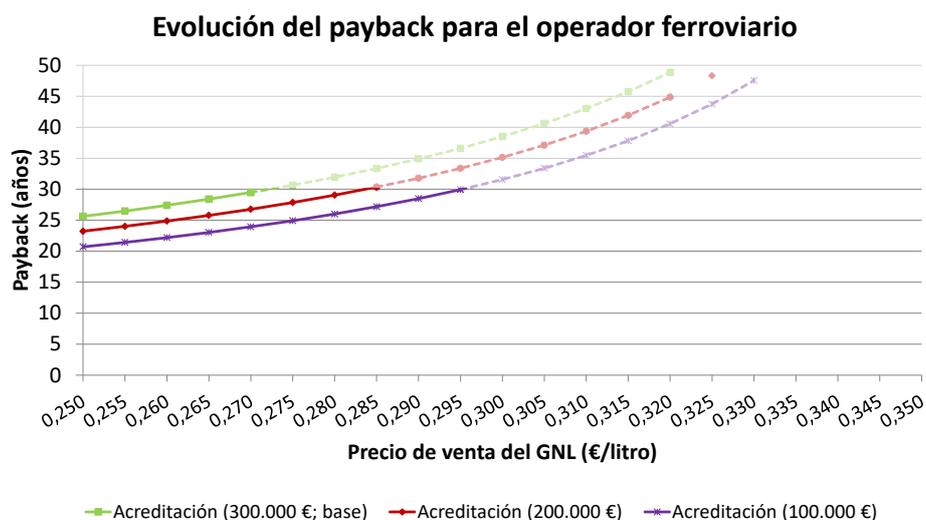
Esta variable presenta un coste variable de entre 300.000 euros y 100.000 € dependiendo del número de unidades transformadas. Las variables que se han tenido en cuenta en este análisis de sensibilidad se recogen en la tabla siguiente.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000€
Coste del depósito	21.300€
Coste de la integración	21.000€
Nº locomotoras transformadas	3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € / 200.000 € / 100.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	10.000 / 20.000 / 30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Realista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 28. Coste de acreditación 1ª unidad y 2ª unidad como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados de este análisis de sensibilidad se representan en la gráfica siguiente.



**Figura 29. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de acreditación de la 1ª y 2ª unidad. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Se observa que el **coste de la acreditación** de la primera unidad transformada presenta un **impacto significativo** sobre el **payback** del operador ferroviario, dado que tiene un coste 10 veces superior a las unidades sucesivas. Dado que acreditar más de 1 unidad presenta economías de escala, **transformar 3 locomotoras es más rentable que transformar una sola.**

Por último, con un **ahorro de 100.000 €** en concepto de acreditación se registra una **reducción del payback** de alrededor de **2 años.**

### **5. Coste del litro de diésel**

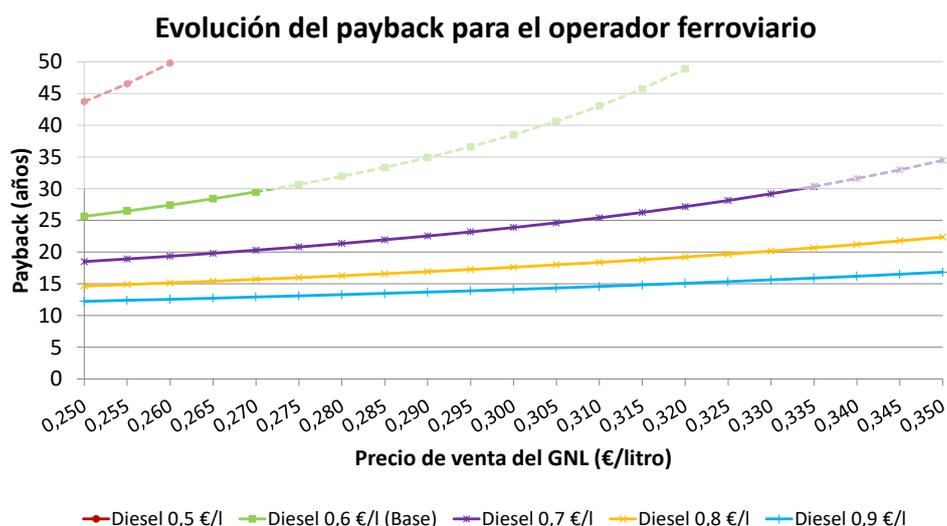
En el presente proyecto se considera que el precio del litro de diésel puede llegar a alcanzar valores de entre 0,5 €/l hasta 0,9 €/l. Para analizar la variación de la rentabilidad del proyecto en función del coste del diésel se realizará un análisis de sensibilidad de manera análoga a los casos anteriores. Las variables consideradas en este análisis se recogen en la siguiente tabla.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,500-0,900 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Realista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 30. Coste de diésel como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan a continuación

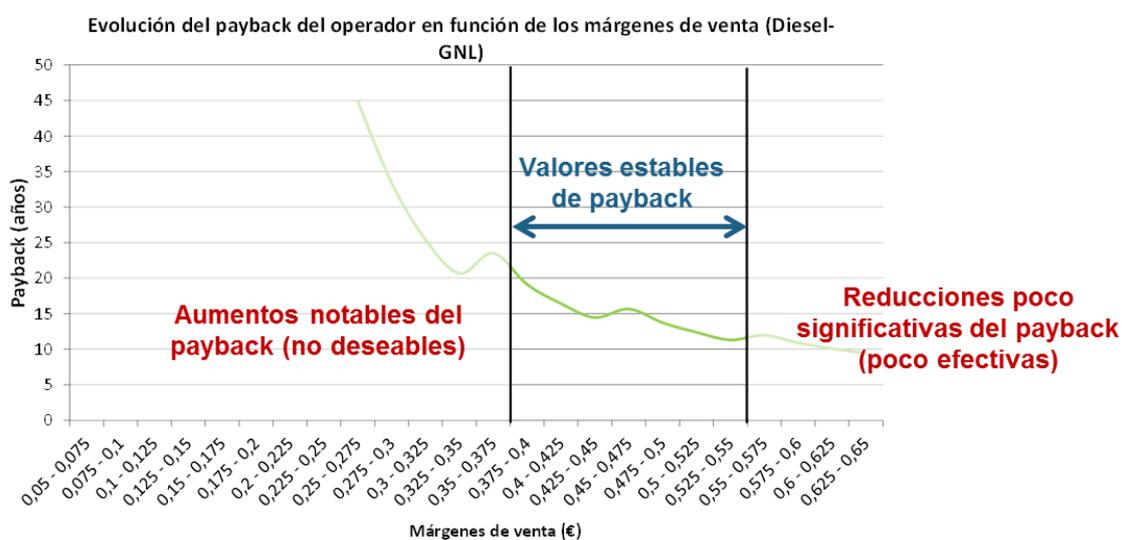


**Figura 31. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de diésel. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

El **coste del litro de diésel** es la **variable con mayor afectación** sobre la rentabilidad del proyecto para el operador ferroviario.

De este modo, **umentando el margen en el coste del combustible** (diferencia entre el coste del diésel y del GNL en 0,1 €/l) se obtienen **rebajas** significativas del payback del proyecto de hasta **18 años**.

Si ahora nos concentramos en el margen del coste del combustible, es decir la diferencia entre el coste del diésel y el precio de venta del GNL, se obtiene los resultados presentados en el gráfico siguiente.



**Figura 32. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el coste de diésel en función de los márgenes de venta. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

En este caso se ha obtenido la gráfica calculando el valor promedio de cada payback para el intervalo de precio de GNL. Se observa que el **intervalo óptimo** de margen del coste del combustible para la obtención de **paybacks menos sensibles a la variación del margen del coste del combustible** para el operador ferroviario se sitúa entre **0,375 y 0,550 €/l**.

Para los **márgenes inferiores** a los comentados anteriormente, arrojan **aumentos** notables del **payback**, mientras que **márgenes superiores** no logran reducciones significativas del mismo.

## **6. Evolución de la demanda**

Según el volumen de la demanda dependerán los consumos de combustible así como la idoneidad de realizar o no la inversión de transformar las locomotoras. Por lo tanto es necesario realizar un análisis de sensibilidad sobre cómo afecta la evolución de esta respecto al payback del operador ferroviario. Se considerarán tres

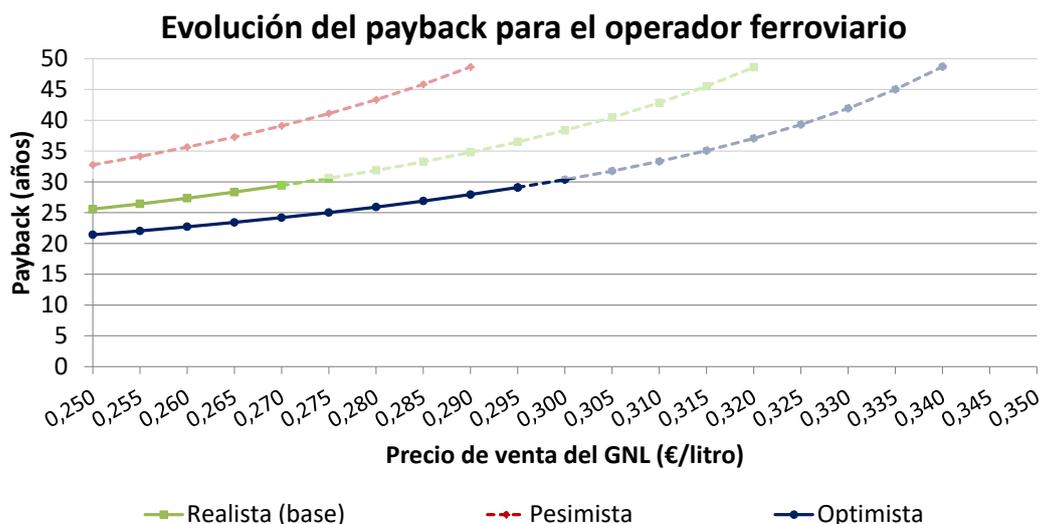
escenarios posibles para la demanda que corresponden con un escenario realista, pesimista y optimista. Los datos considerados en este análisis se encuentran en el cuadro siguiente.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
<b>Evolución de la demanda</b>	<b>Realista / Pesimista / Optimista</b>
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 33. Evolución de la demanda como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados obtenidos para los escenarios analizados se representan en la siguiente gráfica.



**Figura 34. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la evolución de la demanda. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Se observa una **variabilidad del payback** de un mínimo de **5 años** de diferencia entre escenarios de **evolución de la demanda (realista, pesimista y optimista)**, siendo el más favorable el registrado en el escenario de evolución de demanda optimista.

Por consiguiente, la **evolución de la demanda** juega un papel **clave** en la rentabilidad del proyecto.

## **7. Reparto del uso de GNL**

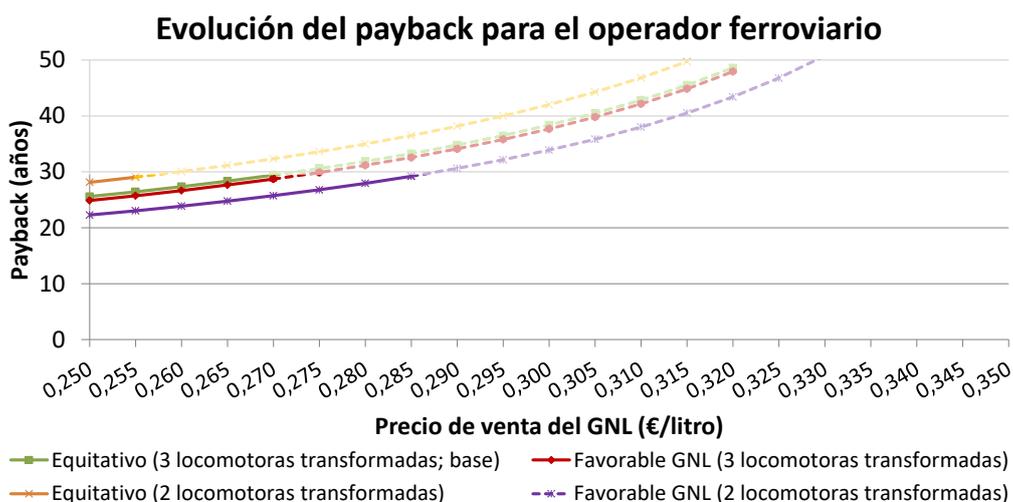
En este caso las variables que se modificarán respecto al escenario base serán el número de locomotoras transformadas así como el reparto del uso de GNL que podrá ser o bien equitativo entre diésel y GNL o favorable al GNL. Los datos considerados en este análisis son los siguientes.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	2 / 3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Pesimista / Optimista
Reparto uso GNL	Equitativo / Favorable GNL
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 35. Nº de locomotoras transformadas y el reparto de los usos de GNL como variables pivotantes. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Seguidamente se muestran los paybacks obtenidos del operador ferroviario para los escenarios considerados en el gráfico a continuación.



**Figura 36. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en el N° de locomotoras transformadas y el reparto de los usos de GNL. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

La afectación del **reparto del uso de las locomotoras de GNL** es muy relevante al transformar **dos locomotoras** (diferencia de 6 años entre paybacks) y **prácticamente nulo** con **tres** locomotoras (menos de 0,2 años de diferencia entre paybacks).

De este modo, cuando al transformar **dos locomotoras** se mantiene un **reparto equitativo** resulta ser el **escenario más desfavorable**. Por el contrario, si se sostiene un **reparto intensivo** del uso del GNL el escenario de dos locomotoras se convierte en el **más favorable** para el operador ferroviario.

## **8. Internalización de emisiones**

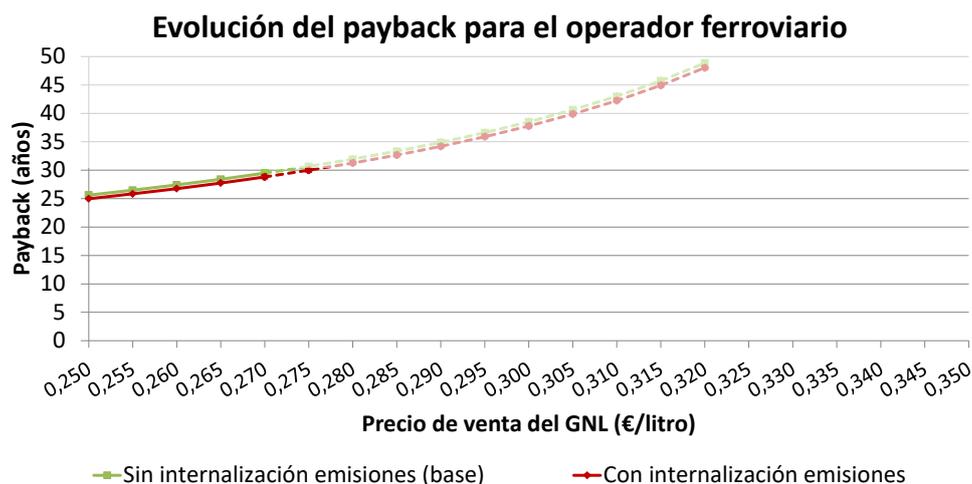
La internalización de las emisiones no se ha tenido en cuenta en el análisis de rentabilidad del escenario base. No obstante, se ha considerado analizar su incidencia en la rentabilidad del proyecto realizando la comparativa entre el escenario sin considerar la internalización de las emisiones (escenario base) y considerando esta internalización.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dedicado: 170.000 €
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locomotoras transformadas	3
Velocidad transformación	2 años
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Realista
Reparto uso GNL	Equitativo
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 37. La internalización de las emisiones como variable pivotante. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

De nuevo se representarán los resultados obtenidos en el gráfico a continuación.



**Figura 38. Evolución del payback para el escenario con valor ajustable en la internalización de las emisiones. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

A nivel meramente económico, la **internalización** de las **emisiones** (monetización de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>) **tiene un impacto despreciable en el valor del payback** (diferencia entre paybacks inferior a 0,1 años).

Para acabar, solo mencionar que tal como se presenta en el siguiente apartado del presente documento dedicado al impacto ambiental, el **ahorro de emisiones contabilizado en masa de contaminantes** emitidas a la atmósfera sí resulta **significativo**.

### 6.3.2 Identificación de las variables con mayor influencia

El análisis de sensibilidad realizado permite afirmar que el coste del litro del diésel, así como el número de locomotoras transformadas, la evolución de la demanda y la tipología y coste del motor constituyen las variables con mayor impacto en la rentabilidad de la transformación de tracción diésel a tracción con GNL.

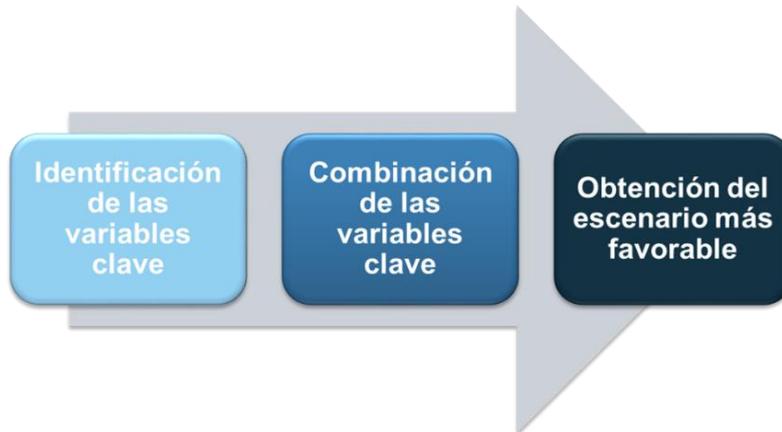
En la siguiente tabla se resume todas las variables analizadas así como los principales resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad relación al payback para el operador ferroviario. Se han ordenado según el grado de mayor a menor influencia.

Variables clave	Opciones valoradas	Intervalo de variación del payback	Impacto
Coste del litro de diésel	0,400 – 0,900 €/litro	31 años	<b>Muy Alto</b>
Evolución de la demanda	Pesimista-Realista-Optimista	11 años	<b>Alto</b>
Número de locomotoras transformadas	1 – 2 – 3 locomotoras	10 años	<b>Alto</b>
Tipología y coste del motor	Dedicado (96.600 – 235.000 €) / Dual (44.170 €)	10 años	<b>Alto</b>
Reparto del uso del GNL	Equitativo Diésel-GNL / Favorable GNL	6 años (2 locs. trans.) 0,2 años (3 locs. trans.)	<b>Medio</b>
Coste de la acreditación	100.000 – 300.000€ + 3.000€/ 10.000 – 30.000€ + 300€	5 años	<b>Medio</b>
Velocidad de transformación	2 – 5 – 10 años	4 años	<b>Bajo</b>
Internalización las emisiones	Sí / No	0,1 años	<b>Muy Bajo</b>

**Figura 39. Variables con mayor influencia. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

### 6.3.3 Análisis de sensibilidad: Escenario óptimo

Una vez identificadas las variables con mayor afectación, se han combinado sus valores más favorables para obtener las condiciones de contorno ideales que aseguran la rentabilidad máxima de la transformación de tracción diésel a tracción GNL (payback mínimo para el operador ferroviario).



**Figura 40. Proceso para el análisis de sensibilidad del escenario más favorable.**  
Fuente: Institut Cerdà (2015).

Combinando los valores más favorables de todas las variables analizadas, se obtienen paybacks de entre 5 y 10 años para el operador ferroviario.

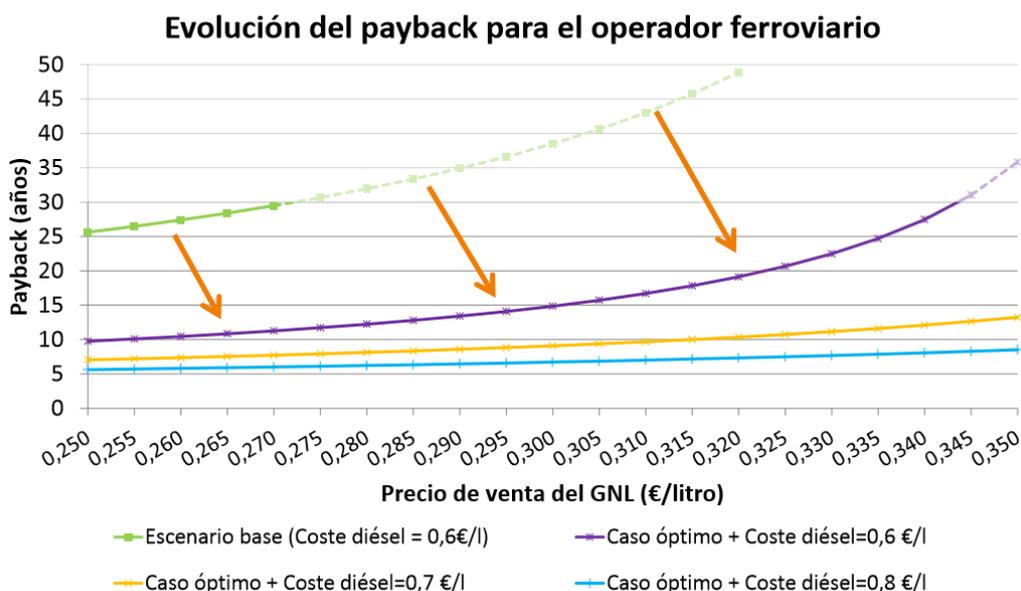
A continuación se muestra para todas las variables estudiadas, los valores óptimos concluidos en los diferentes análisis de sensibilidad.

Variable	Valor
Tipo y coste motor	Dual 90% GNL (44.170 €)
Coste del depósito	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €
Nº locs. transformadas	2
Velocidad transformación	1 año
Coste acreditación 1ª unidad	100.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	10.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600-0,800 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No
Evolución de la demanda	Optimista
Reparto uso GNL	Favorable GNL
Tasa de reinversión	8%
Tasa de financiación	5%

Valores modificados respecto al escenario base

**Figura 41. Variables modificadas respecto al escenario base para resultar en el escenario más favorable. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados obtenidos con estas condiciones se grafican a continuación.



**Figura 42. Evolución del payback para el escenario más favorable. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

El **escenario óptimo** para la rentabilidad del proyecto se obtiene mediante la **combinación** de los valores más favorables de cada una de las **variables analizadas**, presentadas en la tabla anterior. Con estas **condiciones ideales**, se obtienen valores del payback del orden de **5-10 años** para costes de diésel de entre 0,700-0,800 €/litro y un precio de venta del GNL del orden de 0,300 €/litro.

### 6.3.4 Análisis de sensibilidad de escenarios posibilistas

Con el objetivo de obtener **escenarios posibilistas** con una **rentabilidad intermedia** para el operador ferroviario entre el escenario **base** (payback > 25 años) y el escenario **óptimo** (payback entre 5-10 años) se han analizado las variables con mayor afectación sobre la rentabilidad del proyecto que a su vez dependen en mayor medida de la Autoridad Portuaria de Tarragona. De esta forma se asegura el que el resultado obtenido en este análisis sea lo más realista posible al tener capacidad de control sobre las variables.

Estas variables para construir los escenarios posibilistas intermedios son tres: el número de locomotoras transformadas, la tipología y coste del motor y finalmente el reparto del uso del GNL. En la siguiente tabla se recogen estas variables y sus respectivos valores.

Variables clave	Opciones valoradas	Intervalo de variación del payback	Impacto	Capacidad influencia / Dependencia APT
Coste del litro de diésel	0,400 – 0,900 €/litro	31 años	Muy Alto	Baja
Evolución de la demanda	Pesimista-Realista-Optimista	11 años	Alto	Media
Número de locomotoras transformadas	1 – 2 – 3 locomotoras	10 años	Alto	Alta
Tipología y coste del motor	Dedicado (96.600 – 235.000 €) / Dual (44.170 €)	10 años	Alto	Alta
Reparto del uso del GNL	Equitativo Diésel-GNL / Favorable GNL	6 años (2 locs. trans.) 0,2 años (3 locs. trans.)	Medio	Alta
Coste de la acreditación	100.000 – 300.000€ + 3.000€ / 10.000 – 30.000€ + 300€	5 años	Medio	Baja
Velocidad de transformación	2 – 5 – 10 años	4 años	Bajo	Alta
Internalización las emisiones	Sí / No	0,1 años	Muy Bajo	Baja

 Variables analizadas para construir los escenarios posibilistas intermedios.

**Figura 43. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

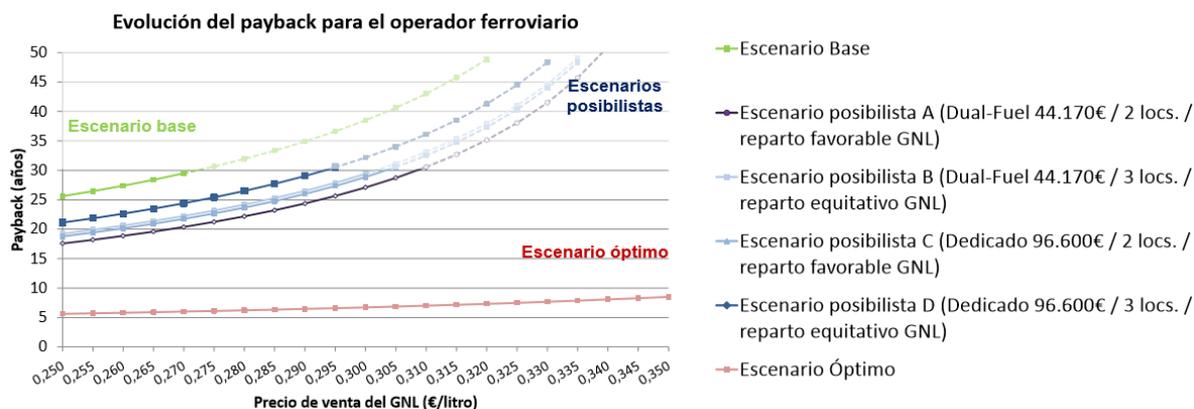
Para construir los escenarios posibilistas, se han definido cuatro casuísticas mediante la variación de las tres variables identificadas anteriormente: tipo y coste del motor, número de locomotoras transformadas y reparto del uso del GNL.

Variable	Escenario de base	Escenario posibilista A (Dual fuel / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista B (Dual fuel / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista C (Dedicado / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista D (Dedicado / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario óptimo
<b>Tipo y coste motor</b>	Dedicado: 170.000 €	Dual 90% GNL (44.170 €)	Dual 90% GNL (44.170 €)	Dedicado (96.600 €)	Dedicado (96.600 €)	Dual 90% GNL (44.170 €)
Coste del depósito	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €
<b>Nº locs. transformadas</b>	3	2	3	2	3	2
Velocidad Transformación	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	1 año
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	100.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	10.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,800 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No	No	No	No	No	No
Evolución de la demanda	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Optimista
<b>Reparto uso GNL</b>	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL
Tasa de reinversión	8%	8%	8%	8%	8%	8%
Tasa de financiación	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Variables modificadas respecto al escenario base.

**Figura 44. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas ABCD. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados obtenidos se muestran en el gráfico siguiente.



**Figura 45. Evolución payback para las variables con mayor afectación en los escenarios posibilistas ABCD. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los cuatro escenarios posibilistas planteados presentan **paybacks superiores** a los **17 años**. Estos valores no suponen una rentabilidad suficientemente atractiva para el operador ferroviario. No obstante, ante los previsibles aumentos del coste del diésel, esta rentabilidad podría aumentar significativamente, dando lugar a paybacks atractivos.

En base a la situación anterior y para reflejar el más que probable aumento de los precios del diésel, se ha decidido estudiar cuatro nuevos escenarios posibilistas.

Estos cuatro escenarios adicionales (E, F, G, H) simulan una situación de incremento del precio del diésel de 0,600€/l a 0,800€/l.

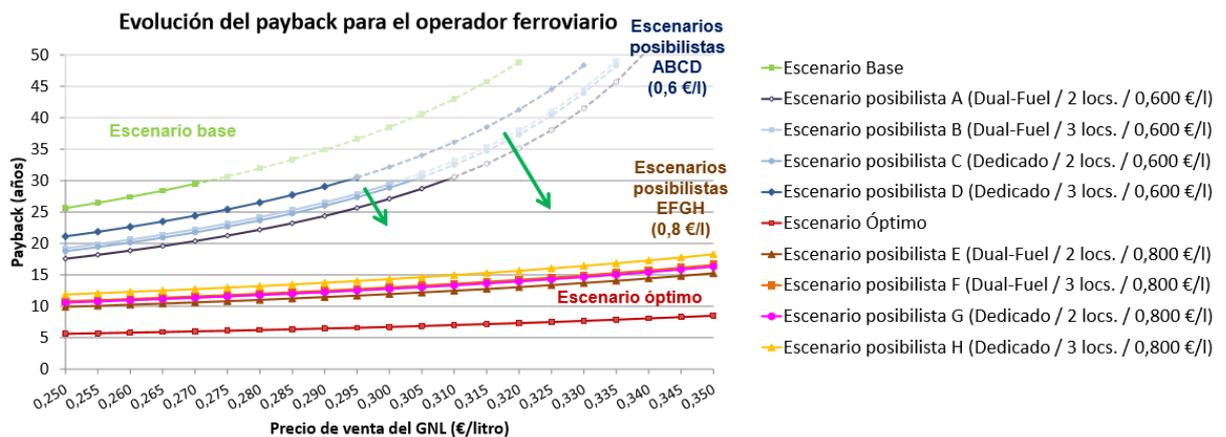
Variable	Base	Escenario posibilista A (Dual fuel / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista B (Dual fuel / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista C (Dedicado / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista D (Dedicado / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista E (Dual fuel / 2 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista F (Dual fuel / 3 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista G (Dedicado / 2 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista H (Dedicado / 3 locs. / 0,800 €/l)	Óptimo
Tipo y coste motor	Dedicado 170.000 €	Dual 90% GNL 44.170 €	Dual 90% GNL 44.170 €	Dedicado 96.600 €	Dedicado 96.600 €	Dual 90% GNL 44.170 €	Dual 90% GNL 44.170 €	Dedicado 96.600 €	Dedicado 96.600 €	Dual 90% GNL 44.170 €
Coste del depósito	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €	21.300 €
Coste de la integración	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €	21.000 €
Nº locs. transformadas	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
Velocidad transformación	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	1 año
Coste acreditación 1ª unidad	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	300.000 € + 3.000 €	100.000 € + 3.000 €
Coste acreditación a partir de la 2ª unidad	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	30.000 € + 300 €	10.000 € + 300 €
Coste del diésel	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,600 €/litro	0,800 €/litro	0,800 €/litro	0,800 €/litro	0,800 €/litro	0,800 €/litro
Coste del GNL	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350
Impuestos sobre los carburantes	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Evolución de la demanda	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Optimista
Reparto uso GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL
Tasa de reinversión	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
Tasa de financiación	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Variables modificadas respecto al escenario base.

Variables modificadas respecto a los escenarios ABCD.

**Figura 46. Variables con mayor afectación para escenarios posibilistas EFGH. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Los resultados obtenidos para estos 4 nuevos escenarios F se muestran a continuación.



**Figura 47. Evolución payback para las variables con mayor afectación en los escenarios posibilistas EFGH. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

La consideración de un precio del diésel de **0,800 €/l** permite rebajar el **payback** para el operador ferroviario de los escenarios posibilistas A, B, C y D (precio del diésel de 0,600 €/l) a valores de **10-15 años**.

### 6.3.5 Análisis de sensibilidad para el operador gasista

El análisis de rentabilidad para el agente gasista se ha realizado para los mismos 10 escenarios definidos: Base, A-H y para el Óptimo. A las variables que se han tenido en cuenta en los anteriores casos, se le añaden el tipo de repostaje, la pérdida de capacidad por la forma del depósito, el volumen de cisterna mínimo, la distancia entre la planta regasificadora y el puerto de Tarragona, el coste del GNL y el caudal de repostaje. En la siguiente tabla se recogen todas las variables que se van a utilizar para el análisis de sensibilidad.

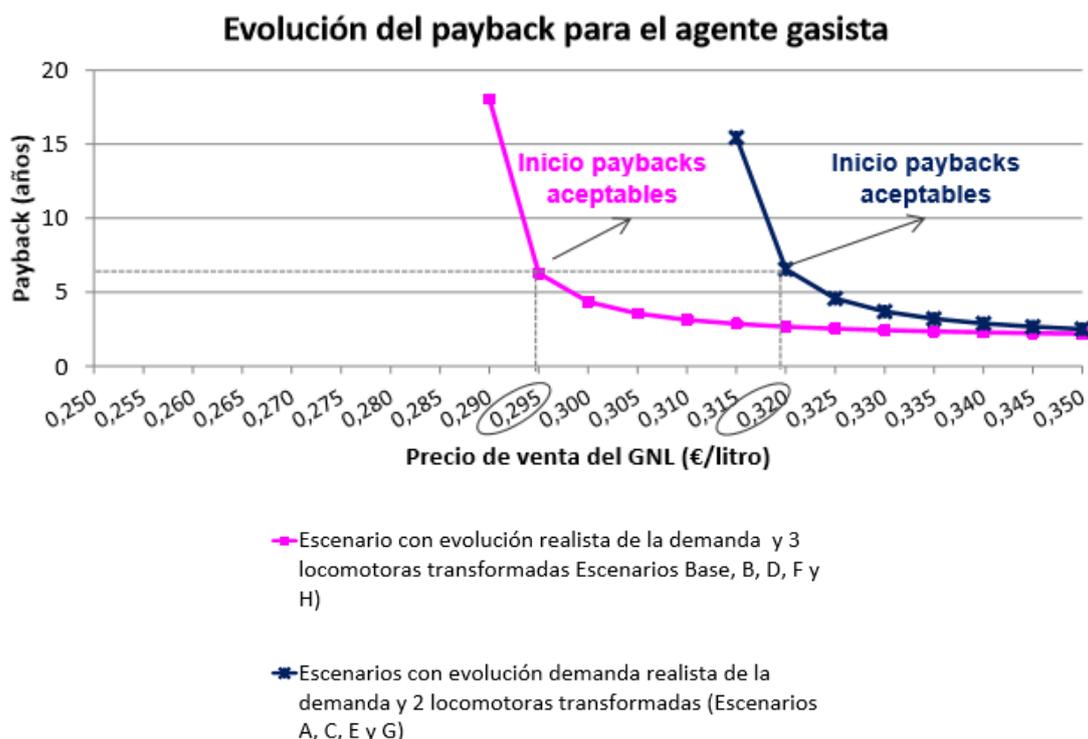
Variable	Base	Escenario posibilista A (Dual fuel / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista B (Dual fuel / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista C (Dedicado / 2 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista D (Dedicado / 3 locs. / 0,600 €/l)	Escenario posibilista E (Dual fuel / 2 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista F (Dual fuel / 3 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista G (Dedicado / 2 locs. / 0,800 €/l)	Escenario posibilista H (Dedicado / 3 locs. / 0,800 €/l)	Óptimo
Tipo de motor	Dedicado	Dual 90% GNL	Dual 90% GNL	Dedicado	Dedicado	Dual 90% GNL	Dual 90% GNL	Dedicado	Dedicado	Dual 90% GNL
Nº locomotoras transformadas	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
Velocidad de transformación	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años	2 años
Coste del GNL	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350
Tipo de repostaje	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)	Móvil (cisterna)
Asumimos pérdidas de capacidad depósito prismático - > cilíndrico	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Volumen de cisterna mínima (camión) (litros)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Distancia hasta punto de distribución de GNL (km)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)	98,3 (Puerto de Barcelona)
Coste del GNL (€/l)	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350	0,250 - 0,350
Caudal de repostaje (l/min)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Evolución de la demanda	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Realista	Optimista
Reparto uso GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL	Equitativo	Favorable GNL
Tasa de reinversión	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
Tasa de financiación	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Variables modificadas respecto al escenario base.

Parámetros con influencia sólo en la rentabilidad de los agentes gasistas.

**Figura 48. Variables influyentes para el agente gasista. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Tras analizar los diferentes escenarios se obtienen los siguientes resultados.



**Figura 49. Evolución del payback para el agente gasista. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

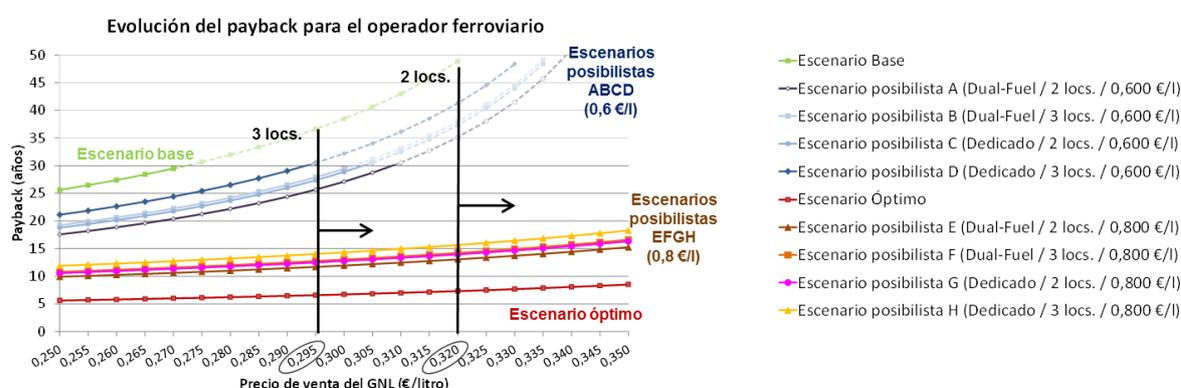
La rentabilidad para el agente gasista de los escenarios analizados depende básicamente del **número de locomotoras transformadas** (parámetro que determina el nivel de consumo del GNL). Los **precios mínimos** de venta del GNL para asegurar la rentabilidad del agente gasista en los escenarios analizados son **0,295 €/l** (en el caso de 3 locomotoras transformadas) y **0,320 €/l** (en el caso de 2 locomotoras transformadas).

Estos precios de venta del GNL garantizan **paybacks inferiores o iguales a 6 años** y TIRs superiores al 12% para el agente gasista.

### 6.3.6 Análisis de sensibilidad global

Para garantizar la viabilidad de la transformación de la tracción diésel a la tracción con GNL, es preciso que se cumplan **simultáneamente las siguientes condiciones:**

- Que el GNL esté exento de impuestos tal y como lo está el diésel.
- Que el precio de venta del GNL no sea inferior a **0,295 €/l** si se transforman 3 locomotoras o inferior a **0,320 €/l** si sólo se transforman 2 locomotoras.
- Que el operador ferroviario acepte paybacks de **12-14 años** (sólo posible en condiciones de elevado precio del diésel –0,800 €/l diésel –) o incluso del orden de **27-35 años** si el precio de venta del diésel se mantiene en el nivel actual (0,600 €/l).



**Figura 50. Evolución del payback para el operador ferroviario.**

Escenario	Base	A	B	C	D	E	F	G	H	Óptimo
Número de locomotoras transformadas	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
Precio mínimo de venta del GNL (€/l)	0,295	0,320	0,295	0,320	0,295	0,320	0,295	0,320	0,295	0,320
Payback operador ferroviario (años)	36,6	35,2	27,9	37,3	30,5	13,1	12,9	14	14,2	7,3
Payback agente gasista (años)	6,2	6,6	6,3	6,6	6,2	6,6	6,3	6,6	6,2	*

**Tabla 15. Tabla resumen de los resultados obtenidos en los diversos escenarios evaluados. Fuente: Institut Cerdà (2015).**

Como observaciones de la tabla anterior, cabe destacar que en el escenario óptimo para el operador ferroviario los flujos de cada para el agente gasista son positivos a lo largo de toda la vida útil del proyecto.

## 6.4. Conclusiones sobre la rentabilidad

A pesar de no presentar un escenario base viable económicamente, la Autoridad Portuaria de Tarragona tiene la capacidad de favorecer escenarios posibilistas que ante un aumento del coste del diésel (a un valor aproximado de 0,800 €/l) supongan paybacks inferiores a los 13-14 años para el operador ferroviario.

Para que la tracción ferroviaria con GNL sea **viable** debe ser rentable tanto para el **operador ferroviario** como para el **agente gasista**. A continuación se exponen las principales conclusiones derivadas del estudio de rentabilidad.

### Rentabilidad para el agente gasista:

- La **viabilidad** de la transformación de la tracción diésel a tracción GNL para el agente gasista queda condicionada por los **precios mínimos** de venta del **GNL**. Éstos deben ser **superiores o iguales a 0,295 €/l** si se transforman 3 locomotoras y superiores o iguales a **0,320 €/l** si se transforman 2 locomotoras. Asumiendo estos precios mínimos, todos los escenarios analizados presentan **un payback menor a 7 años** y una TIR superior al 12% para el agente gasista.

### Rentabilidad para el operador ferroviario:

- El análisis de rentabilidad del **escenario base** (Motor dedicado -170.000€, 3 locomotoras transformadas en 2 años, coste de acreditación de 300.000 + 3.000 € para la primera unidad y de 30.000 + 300 € para las sucesivas, coste del diésel de 0,600 €/l, escenario realista de evolución de la demanda, reparto equitativo del uso del GNL) no presenta un panorama rentable para el operador ferroviario (**payback de 36 años**).
- La **Autoridad Portuaria de Tarragona** puede, mediante la modificación de las **variables** sobre las cuales posee una **mayor influencia** (elección del tipo de motor, número de locomotoras transformadas y reparto del uso de las locomotoras de GNL entre la flota disponible), **lograr escenarios con paybacks más atractivos**.
- El **coste del diésel** es la variable con **mayor afectación** sobre la rentabilidad del proyecto para el operador ferroviario.
- Combinando un **motor** con un **coste reducido** (inferior a los 100.000€), el uso **intensivo** de la flota transformada con **GNL** (dando prioridad al uso de las locomotoras con GNL frente a las diésel) y con un escenario de **precios del diésel** igual o superior a los **0,800 €/l**, el **payback** para el operador ferroviario se reduce a los **13-14 años**.

- La **evolución de la demanda ferroviaria** y el coste de **acreditación** también tienen **un impacto significativo** a la rentabilidad del proyecto, pero en este caso la Autoridad Portuaria de Tarragona tiene una menor o nula influencia para cambiarlas.
- Sólo si a la **elección** del tipo de **motor**, **número** de **locomotoras** transformadas y **reparto** del **uso** de las locomotoras de **GNL** entre la flota disponible (variables sobre las cuales la APT posee una mayor influencia) se le **añaden** los condicionantes de **costes** del **diésel** superiores o iguales a los **0,800 €/l** y condiciones más **favorables** de **demandas** ferroviaria y **costes** de **acreditación** (variables sobre las cuales la APT tiene una menor o nula influencia), el **payback** para el operador ferroviario podría acercarse a los **7,3 años** del escenario óptimo, pero en ningún caso bajar de los 7 años.

## 7. Cuantificación del impacto ambiental

### 7.1. Beneficios medioambientales

Los estudios realizados hasta la fecha, muestran beneficios medioambientales importantes del GNL frente al diésel. A continuación se exponen los puntos considerados más relevantes:

- **Beneficios ambientales del gas natural:**
  - Reducción de la **contaminación acústica**.
  - Reducción de las **emisiones de gases contaminantes** y de **efecto invernadero**.
    - Se reducen considerablemente las emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas, monóxido y dióxido de carbono.
    - No se emite dióxido de azufre, al no contener el gas natural ni plomo ni trazas de metales pesados.

Según diversos estudios llevados a cabo en los distintos sectores de transporte, se exponen las siguientes ventajas observadas:

- En el sector del transporte por carretera, donde el uso de gas natural lleva unos años de ventaja al ferrocarril, los análisis realizados muestran resultados exitosos de reducción de emisiones.

Emisiones	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Partículas	Compuestos volátiles orgánicos
Reducción del GNL respecto al Diésel	20-30%	70-90%	99%	75-95%	90%	89%

**Tabla 16. Reducción de contaminantes en el transporte por carretera. Fuente: Encana (2015).**

- En la movilidad por ferrocarril, estudios recientes sobre el uso de GNL como combustible han estimado las siguientes reducciones de emisiones respecto al diésel:
  - Reducción de la contaminación medioambiental (**NO<sub>x</sub>, partículas, CO**) superior al **70%**.
  - Reducción de los gases de efecto invernadero del orden del **20-30%**.

## 7.2. Impacto medioambiental esperado

Con el objetivo de calcular cual es el impacto ambiental asociado a la gasificación de las locomotoras de maniobras en el Puerto de Tarragona se han considerado los siguientes datos e hipótesis:

- **Datos económicos:**
  - Cotización de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
    - 6,26 € / tonelada de CO<sub>2</sub> (SENDECO, 2015).
- **Hipótesis técnicas:**
  - Locomotoras diésel: Factores de emisión de gases y partículas (EMIMOB, 2015).
    - 742 gramos CO<sub>2</sub> / km.
    - 9,46 gramos NO<sub>x</sub> / km.
    - 0,32 gramos PM / km.
  - Locomotoras GNL: Factores de emisión de gases y partículas.
    - -20% gramos CO<sub>2</sub> / km respecto a emisiones CO<sub>2</sub> locomotoras diésel.
    - -70% gramos NO<sub>x</sub> / km respecto a emisiones NO<sub>x</sub> locomotoras diésel.
    - -70% gramos PM / km respecto a emisiones PM locomotoras diésel.

Con estos datos presentados, la gasificación de las maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona supone una reducción acumulada, en 30 años, de **551,2 toneladas de CO<sub>2</sub>, 14,0 toneladas de NO<sub>x</sub> y 480,0 kg de PM**, así como un **ahorro de 3.451 €** procedente de la internalización de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

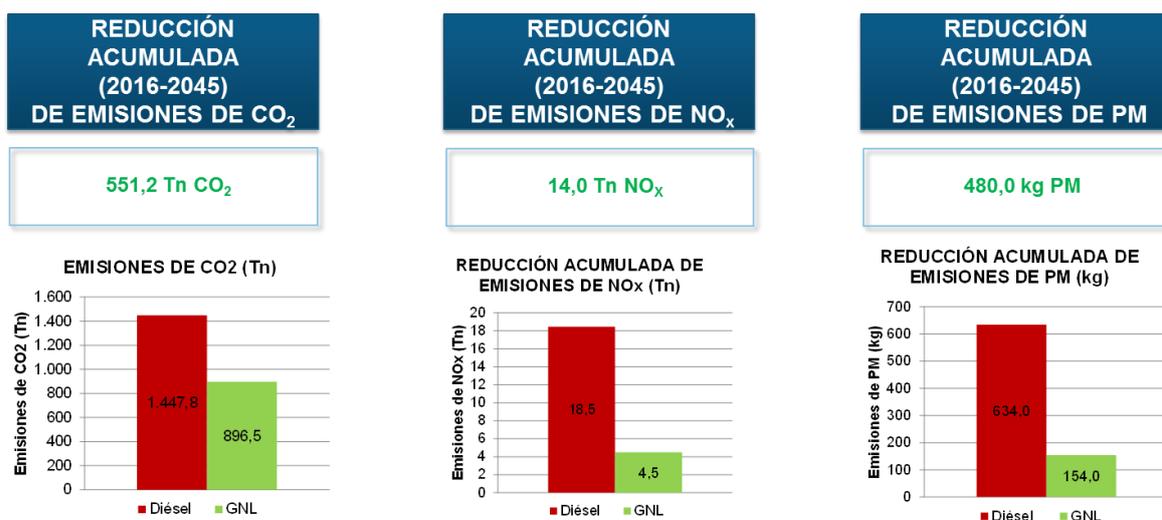


Figura 51. Ahorro de emisiones. Fuente: Institut Cerdà (2015).

## 8. Conclusiones y consideraciones Fase 1

Como se ha podido observar en el apartado del presente estudio “4- Posibles barreras técnicas y legales de la gasificación de los servicios de maniobras”, existen todavía barreras para la gasificación de las maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona, aunque todas ellas son salvables con tiempo y coste.

### 8.1. Conclusiones

A continuación, se exponen las principales conclusiones derivadas del estudio de viabilidad según su naturaleza.

#### Viabilidad técnica:

- El motor de GNL para tracción ferroviaria no se encuentra todavía de forma normalizada en el mercado (en catálogo). De cinco fabricantes contactados, sólo uno (Guascor) tiene en catálogo un motor de GNL que podría usarse para las maniobras ferroviarias del Puerto de Tarragona, ya que **cumple** con los **requisitos necesarios**. Esto dispara costes y tiempos de suministro.
- En principio, la adquisición de un **depósito de GNL** para tracción ferroviaria no implicaría ningún problema mayor: los hay disponibles en catálogo (tres de los siete fabricantes contactados -Chart, Enric Group e Ingescic- los tienen en catálogo).
- El **motor GNL** y el **depósito** criogénico no deberían suponer una **modificación** superior al **+/- 10%** del peso respecto al motor y depósito diésel, para no modificar el centro de gravedad por encima de lo aceptado por normativa.

#### Viabilidad legal:

- El **proceso de acreditación** supondría la principal barrera legal (a día de hoy el GNL no goza de consideración como combustible, pero el proyecto GNL ferroviario coordinado por el Institut Cerdà aportará avances importantes en este sentido).
- Si se opta por una **modificación** de **material** rodante ferroviario ya acreditado (locomotoras 310/311) se necesitará el **consentimiento de Adif** como propietario de las locomotoras creando una dependencia hacia Adif.
- Necesidad de elaborar **documentación sin marco de referencia** para el gas. En caso de querer desarrollar simplemente un prototipo de locomotora con tracción con GNL se requiere una **Autorización Provisional de**

**Circulación.** No obstante, en caso de querer implementar la tecnología para su explotación comercial, se requerirá:

- **Análisis de riesgos** derivados de la implementación de la modificación propuesta.
- Informe de un **evaluador independiente** sobre el proceso de evaluación y análisis del riesgo.

### **Viabilidad económica:**

Para que la tracción ferroviaria con GNL sea viable debe ser **rentable** para el **operador ferroviario** y para el **agente gasista**.

#### **Rentabilidad para el agente gasista:**

- La viabilidad de la transformación para el agente gasista queda **condicionada** por los precios mínimos de venta del GNL. Éstos deben ser superiores o iguales a **0,295 €/l** si se transforman 3 locomotoras y superiores o iguales a **0,320 €/l** si se transforman 2 locomotoras. Asumiendo estos precios mínimos, todos los escenarios analizados presentan un **payback menor a 7 años** y una TIR superior al 12% para el agente gasista.

#### **Rentabilidad para el operador ferroviario:**

- El análisis de rentabilidad del **escenario base** (Motor dedicado -170.000€, 3 locomotoras transformadas en 2 años, coste de acreditación de 300.000 + 3.000 € para la primera unidad y de 30.000 + 300 € para las sucesivas, coste del diésel de 0,600 €/l, escenario realista de evolución de la demanda, reparto equitativo del uso del GNL) **no presenta un panorama rentable** para el operador ferroviario (payback de 36 años).
- La **Autoridad Portuaria de Tarragona** puede, mediante la **modificación** de las variables sobre las cuales posee una mayor **influencia** (elección del tipo de motor, número de locomotoras transformadas y reparto del uso de las locomotoras de GNL entre la flota disponible), lograr escenarios con **paybacks más atractivos**.
- El **coste del diésel** es la **variable** con **mayor afectación** sobre la rentabilidad del proyecto para el operador ferroviario.
- Combinando un **motor** con un coste reducido (inferior a los 100.000€), el **uso intensivo** de la flota transformada con GNL (dando prioridad al uso de

las locomotoras con GNL frente a las diésel) y con un **escenario de precios del diésel** igual o superior a los **0,800 €/l**, el **payback** para el operador ferroviario se reduce a los **13-14 años**.

- Sólo si a la elección del tipo de motor, número de locomotoras transformadas y reparto del uso de las locomotoras de GNL entre la flota disponible (variables sobre las cuales la ATP posee una mayor influencia) se le añaden los condicionantes de costes del diésel superiores o iguales a los 0,800 €/l y condiciones más favorables de **demanda ferroviaria** y costes de **acreditación** (variables sobre las cuales la APT tiene una menor o nula influencia), el payback para el operador ferroviario podría acercarse a los 7,3 años del **escenario óptimo**, pero en ningún caso bajar de los 7 años.

### **Impacto ambiental:**

La transformación de las locomotoras existentes a tracción con GNL produciría una **reducción acumulada**, en 30 años, de 551,2 toneladas de **CO<sub>2</sub>**, 14 toneladas de **NOx** y 480 kg de **PM**, así como un ahorro de 3.451€ procedente de la internalización de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## **8.2. Consideraciones**

En base a las conclusiones presentadas anteriormente, se desprende que para el escenario base estudiado, el proyecto en el Puerto de Tarragona no presenta un escenario viable debido a los altos valores de payback obtenidos. Asimismo del análisis de sensibilidad, considerando los valores de las variables que componen un escenario óptimo, no se consigue obtener valores de payback inferiores a 7 años.

Aunque debido a las condiciones actuales la implementación del GNL en las maniobras del Puerto de Tarragona no se prevé viable, a continuación se listan un seguido de consideraciones a tener en cuenta, derivadas del análisis realizado a lo largo de todo el estudio, y que enmarcan aspectos generales destacados a considerar en la implantación del GNL en el ámbito ferroviario.

### **8.2.1 Consideraciones sobre la viabilidad técnica**

#### **Flota a transformar:**

Elegir qué tipo de transformación de la flota (existente/nueva) se quiere realizar:

- Modificación de una locomotora existente (en el caso de la Autoridad Portuaria de Tarragona: 310/311 de Adif). Para este caso es necesario:

- Contactar con el propietario del material móvil (en este caso Adif) para solicitar su consentimiento para dicha transformación.
- Ponerse en contacto con un integrador. En este sentido y para este proyecto, ARMF ha manifestado su predisposición a ejercer de integrador.
- Adquisición de nueva flota: En el caso concreto de la Autoridad Portuaria de Tarragona debido a que la intención es “internalizar” las maniobras ferroviarias, es preciso contactar con un fabricante de locomotoras que pueda estar interesado en introducir nuevas locomotoras de maniobras en el mercado, traccionadas con GNL.

#### **Componentes GNL:**

- Profundizar en el conocimiento de la disponibilidad de soluciones técnicas adaptadas a las necesidades del proyecto.
- Contactar con los fabricantes de motores (ej. Guascor) y depósitos criogénicos (ej. Chart, Enric Group e Ingescic) para sondear su interés en el proyecto, así como su predisposición a adaptar sus productos en catálogo a las necesidades específicas del mismo.

### **8.2.2 Consideraciones sobre la viabilidad legal**

#### **Alcance del proyecto:**

- **Opción limitada:** Realización de ensayos sobre locomotoras prototipo.

Solamente se requiere una Autorización Provisional de Circulación. Debe ser emitida por:

- Autoridad Portuaria siempre y cuando las pruebas se realicen en todo momento en infraestructura propiedad de la Autoridad Portuaria. En este caso, la operativa actual de las locomotoras debería ser modificada, dado que hoy en día tanto el aprovisionamiento como la pernoctación se realizan en las instalaciones de Adif.
- Administrador: En el caso del Puerto de Tarragona sería Adif en caso de utilizar infraestructura ferroviaria propiedad del administrador.
- **Opción con alcance completo:** Desarrollo de tecnología para su explotación comercial.

Se requiere un análisis de riesgos derivados de la implementación de la modificación propuesta, y un informe de un evaluador independiente sobre el proceso de evaluación y análisis del riesgo. En este caso, se recomienda:

- Introducir el motor de GNL en una locomotora ya acreditada (en el caso del Puerto de Tarragona: 310/311). Ello supondría el ahorro de costes temporales y monetarios de acreditación, aunque es necesario contar con la predisposición de Adif para transformarlas.
- Contactar con un organismo de certificación / acreditación independiente (en el presente proyecto se propone a Bureau Veritas para ejercer como organismo designado, dada su experiencia en el campo del ferrocarril y del GNL).

#### **Seguimiento de proyectos de interés a monitorizar:**

En todo caso, se recomienda mantenerse informado de los resultados y avances de dos proyectos en marcha, correspondiente a la prueba piloto sobre tracción ferroviaria con GNL coordinada por el Institut Cerdà y que se llevará a cabo en Asturias (resultados esperados en 2018) cuyo marco normativo definido podrá ser de aplicación para esta iniciativa, y por otra parte el proyecto europeo railLNG con fondos del programa CEF (Connecting Europe Facility) que por el segmento de potencias su seguimiento y desarrollo puede aportar información de interés.

A continuación, se expone brevemente un resumen de ambos proyectos mencionados anteriormente:

#### ***Características del proyecto en curso de piloto de adaptación de locomotora con automotor.***

- Esta prueba piloto es la primera de tracción ferroviaria con gas natural licuado (GNL) de Europa y la primera en el mundo en el sector ferroviario de viajeros en potencias inferiores a 400hp.
- Objetivos:
  - Reducción de la contaminación medioambiental (NOx, PM, CO) de acuerdo con los niveles definidos en la Etapa IIIB y con los objetivos del proyecto CleanERD.
  - Reducción de la contaminación acústica de acuerdo con la ETI correspondiente y con los objetivos del proyecto CleanER-D.
  - Reducción de los gases de efecto invernadero.
  - Reducción de los costes operativos (combustible, mantenimiento).
- El alcance de la transformación en el coche seleccionado de Renfe para la prueba piloto objeto de este proyecto, incluye el motor, los depósitos de combustible y su circuitería asociada así como un autómata programable. Se ha decidido utilizar un coche de una unidad de tren serie 2600 de Renfe. La

Serie 2600 de Renfe es un modelo de vehículo automotor de vía estrecha compuesta por unidades diésel que prestan servicio de pasajeros a la empresa Renfe Operadora en la zona norte de España. Están fabricadas a partir de la reconstrucción de unidades de la serie 2300

- Se ha sustituido el motor diésel de una de las dos unidades automotoras pareadas por otro que consumirá gas natural para su propulsión y se han instalado los depósitos en los que se almacenará GNL junto con toda la circuitería necesaria auxiliar. En concreto, las modificaciones se han desarrollado en un tren autopropulsado del parque diésel de Feve (2600). El motor elegido, es el modelo Gas ISLG 280 de Cummings. Depósitos CHART: Se utilizarán los modelos de su catálogo HLNG 100, como depósito principal y el HLNG72 como secundario. Ambos conectados entre sí.
- Se espera que la locomotora recorra una distancia de 12.000/15.000 Km.

#### **Características proyecto railLNG.**

- Este Proyecto se basa en la ingeniería e instalación de un motor de gas natural licuado modelo G3516B ULB y equipo auxiliar en una locomotora. Se preparará una locomotora diésel para llevar a cabo pruebas comparativas comparables.
- El proyecto incluye un borrador y el diseño detallado, la ingeniería y la construcción de una plataforma con un contenedor de GNL ISO de 20 pies con una unidad de tratamiento para satisfacer los requisitos físicos del GNL que se utilizará como combustible en la locomotora y las conexiones a la locomotora.
- La prueba piloto tendrá como objetivo llevar a cabo un número suficientemente significativo de pruebas a tiempo real por un mínimo de 15.000km.
- Los siguientes parámetros serán monitoreados y recopilados:
  - Consumo de combustible instantáneo y promedio (GNL y diésel)
  - Parámetros de funcionamiento del motor (revoluciones por minuto, potencia, temperatura, etc).
  - Monitoreo por GPS (posición, velocidad, pendientes de viaje, etc).
  - Parámetros meteorológicos (temperatura, presión, lluvia, etc).
  - Emisiones de contaminantes y de gases de combustión (CO, NO<sub>x</sub>, PM, metano, etc).
  - Datos de abastecimiento de combustible (tiempos, coste, fugas, etc).
  - Mantenimiento (desgaste e influencia de las piezas, consumo de aceite, etc).
- Desarrollo de un plan de despliegue de GNL en la red TEN-T que incluirá:
  - Análisis de tráfico y demanda de secciones seleccionadas dentro de la red TEN-T.
  - Ubicación y requisitos técnicos de la infraestructura de abastecimiento de GNL.

- Recursos de inversión, financieros y de financiación.
- Implementación del cronograma propuesto
- Análisis ambiental de la implementación del Plan de despliegue.

### **8.2.3 Consideraciones sobre la viabilidad económica**

Como se ha comentado al inicio del presente apartado, el análisis de viabilidad concluye sobre la no rentabilidad del proyecto para la Autoridad Portuaria de Tarragona. No obstante, a continuación se listan un seguido de variables en las que se considera que la Autoridad Portuaria, y por extrapolación la mayoría de Autoridades Portuarias de manera general, puede ejercer cierto control o influencia para mejorar las condiciones estudiadas y que condicionan los resultados obtenidos:

- Optimizar las variables que dependen directamente de la Autoridad Portuaria de Tarragona:
  - Selección de un motor de GNL cuyo coste no sea superior a los 100.000€.
  - Transformación total de la flota de locomotoras operativa (3 locomotoras).
  - Reparto intensivo del uso de las locomotoras de GNL entre la flota disponible.
- Tener en cuenta que las variables externas pueden aumentar significativamente la rentabilidad de la transformación.
  - El precio de diésel es la variable con mayor afectación en la viabilidad económica del proyecto: combinando el cumplimiento de las variables que dependen directamente de la Autoridad Portuaria con un escenario de precios del diésel igual o superior a los 0,800 €/l, el payback para el operador ferroviario se reduce a los 13-14 años.
  - La evolución de la demanda de servicios de maniobras también supone un factor clave para determinar dicha rentabilidad.
  - Es imprescindible aceptar paybacks que en el mejor de los casos nunca serán inferiores a 7 años.
- Contactar con los agentes gasistas para el suministro de GNL:
  - Poner en valor la rentabilidad del proyecto para el agente gasista (TIR>12% y payback < 7 años).

## 9. Introducción del estudio de la Fase 2 y antecedentes

En la fase finalizada anterior a este estudio, se llevó a cabo el estudio de viabilidad técnica, legal y económica de gasificar los servicios de maniobras ferroviarias en el puerto de Tarragona. Este estudio se abordó en tres etapas con los siguientes objetivos:

- En una **primera etapa** se caracterizó la infraestructura y los servicios de maniobras ferroviarios existentes en el puerto de Tarragona. Esto ha permitido conocer el estado, características y particularidades de la infraestructura y los servicios ferroviarios en la que se desarrolla el proyecto.
- En una **segunda etapa**, se identificaron las barreras tanto técnicas como legales que pueden llegar a comprometer el proyecto y la potencialidad de ser superadas.
- En la **tercera etapa** se analizó la viabilidad económica del proyecto para todos los agentes implicados en su explotación y el impacto ambiental que supondría cambiar de una propulsión de diésel a una de Gas Natural Licuado, en adelante denominado GNL.

Finalmente se expusieron las conclusiones referentes a los resultados obtenidos del estudio realizado a lo largo de las anteriores fases, así como las recomendaciones o próximos pasos para la Autoridad Portuaria de Tarragona, para la gasificación de los servicios de maniobras ferroviarias.

En este contexto se inicia la segunda fase de la actividad, con el objetivo de obtener un procedimiento para la realización de todas las modificaciones técnicas necesarias para llevar a cabo una posible transformación de una locomotora de maniobras diésel a tracción GNL.

Así pues, con el objetivo de establecer las bases desde el punto de vista técnico para una futura realización de un prototipo de locomotora modificada para su funcionamiento de GNL, se han identificado los siguientes bloques de actividades necesarias para el desarrollo del análisis y estudio:



**Figura 52 Diagrama de los bloques de actividad a realizar en la Fase 2**

- **Ingeniería:** Definición de los requerimientos técnicos y estudio/definición del motor y depósito a implantar, así como su afectación a diferentes ámbitos: planes de mantenimiento, formación y pruebas necesarias.
- **Integración:** Análisis y definición de los trabajos necesarios para la integración del nuevo sistema en la locomotora actual.
- **Validación:** Definición de la metodología y datos a registrar durante la monitorización para poder evaluar la locomotora modificada.

## 10. Ingeniería

### 10.1. Definición de los requerimientos técnicos del proyecto

En la segunda fase del proyecto, se pretende profundizar en los aspectos de viabilidad técnica, y en definir el procedimiento a seguir para realizar las modificaciones necesarias sobre una locomotora diésel para su transformación a tracción con GNL. Se trata, por tanto, de establecer las bases desde el punto de vista técnico, para la futura construcción de un prototipo de locomotora a GNL.

Se hace constar que, como resultado del estudio de la primera fase, el Port de Tarragona contempló en su Pliego Técnico EV3 para esta segunda fase del proyecto, la transformación de una locomotora del tipo Adif 311. Pero, como resultado de conversaciones posteriores y viendo que el parque de locomotoras 311 y 310 son iguales, se consideró oportuno que esta segunda fase considerara también inicialmente, los aspectos técnicos para la posible modificación de una locomotora del tipo Adif 310.



*Locomotora Adif 311*



*Locomotora Adif 310*

**Figura 53 Fotografías de las locomotoras de maniobras en el Puerto de Tarragona (Adif 311, Adif 310).**

En consecuencia, el primer objetivo a cubrir en esta segunda fase del proyecto, será la recomendación final del tipo de locomotora a transformar atendiendo a los aspectos técnicos, y basada en criterios que se expondrán a continuación.

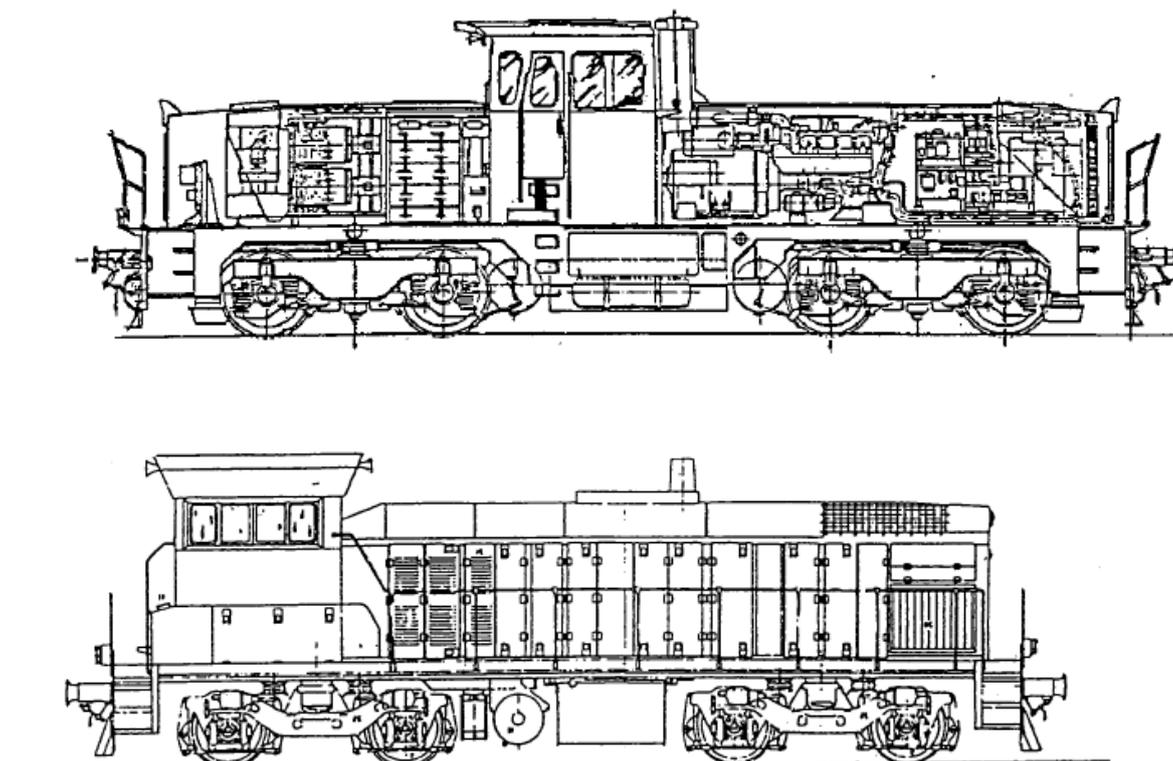
Asimismo, se relacionarán las características técnicas de los motores térmicos instalados en ambos tipos de locomotora, de acuerdo con la información facilitada por sus fabricantes, para compararlas posteriormente con los que podrán obtenerse tras su transformación a GNL. En concreto, para cada tipo de locomotora, se expondrán los valores actuales de:

- Potencia máxima / régimen
- Par máximo / régimen
- Curvas de potencia y par
- Mapa de consumo

En el caso de no existir información fehaciente de lo anterior, la curva de potencia de los motores diésel se podrá determinar de forma aproximada, utilizando la metodología de "aceleración libre del motor" u otra.

### 10.1.1 Descripción General de las Locomotoras

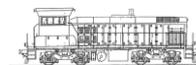
Las locomotoras de maniobras de las series 311 y 310 son mixtas, equipadas con un motor térmico diésel acoplado a un generador trifásico. La tracción eléctrica se realiza mediante cuatro motores trifásicos asíncronos acoplados uno en cada eje.



**Figura 54 Esquema de las series 311 (arriba) y 310 (abajo).**

A continuación, se adjunta una tabla que resume los parámetros principales de ambos tipos de locomotora, que pueden tener relación con el objetivo de este proyecto:

**Tipo Locomotora**
**311**

**310**


<i>Tracción</i>	Eléctrica (4 motores), con energía producida por un motor diésel acoplado a un generador trifásico. Configuración Bo'Bo'	
<i>Fabricante</i>	MTM	MACOSA / Meinfesa (con licencia de GM)
<i>Años fabricación</i>	1990 a 1991	1989 a 1991
<i>Unidades fabricadas</i>	60	60
<i>Longitud</i>	13050 mm	12550 mm
<i>Ancho</i>	2900 mm	3100 mm
<i>Altura</i>	4268 mm	4305 mm
<i>Peso</i>	80000 kg	78000 kg
<i>Capacidad depósito gasoil</i>	2200 l	2770 l
<i>Potencia tracción</i>	705 kW	598 kW
<i>Esfuerzo tractor</i>	260 kN	<i>dato no disponible</i>
<i>Velocidad máxima</i>	92 km/h	114 km/h

**Tabla 17 Principales parámetros de las locomotoras existentes en el Port de Tarragona.**

Se han encontrado diferentes datos de potencia en las distintas fuentes consultadas, por lo que los datos expuestos deben ser considerados como poco fiables o al menos, como aproximados

### 10.1.2 Características de los actuales Motores Diesel a transformar

Se adjunta a continuación una tabla que resume los parámetros principales de los motores diésel de ambos tipos de locomotora, y que deberán ser considerados a lo largo del proyecto:

<b>Tipo Locomotora</b>	<b>311</b>	<b>310</b>
<i>Motor tipo</i>	Diesel 4 tiempos	Diesel 2 tiempos
<i>Marca</i>	MTU	EMD (General Motors)
<i>Modelo</i>	8V 396TC 13	8-645-E
<i>Alimentación</i>	Turbocompresor	Compresor Roots
<i>Potencia máxima / régimen</i>	785 kW a 1800 rpm	750 kW a 900 rpm
<i>Par máximo / régimen</i>	<i>dato no disponible</i>	<i>dato no disponible</i>
<i>Curvas de potencia y par</i>	<i>dato no disponible</i>	<i>dato no disponible</i>
<i>Mapa de consumo</i>	<i>dato no disponible</i>	<i>dato no disponible</i>
<i>Peso (sin fluidos)</i>	2520 kg (*)	8622 kg (*)
<i>Radiador motor</i>	<i>dato no disponible</i>	232 kg (*)

(\*) Según "Manual Descriptivo del Vehículo" de RENFE

**Tabla 18 Principales parámetros de los motores diésel actuales de las locomotoras existentes en el Port de Tarragona.**

Como puede verse en la tabla anterior, la información disponible de ambos tipos de motores es escasa, lo que debe atribuirse a ser motores antiguos, ya descatalogados por sus respectivos fabricantes, que publicitan productos más evolucionados y no proporcionan datos de motores no catalogados.

Llama la atención la gran diferencia entre los valores de Peso de ambos motores, por lo que ese dato deberá ser considerado con reservas.

Dada la disparidad y falta de fiabilidad de los valores encontrados, en caso de decidirse la construcción de un prototipo de locomotora a GNL, se sugiere que, con antelación a la transformación, se proceda a la medida de las características actuales del motor.

La medición de características actuales podrá hacerse bien por el “método de aceleración libre” con un sistema de diagnóstico diésel, o bien de forma indirecta, conectando la salida del generador eléctrico a un “resistor” y midiendo la potencia eléctrica generada por el conjunto.

La medición de las características iniciales podrá llevarse a cabo en las instalaciones del Integrador de la transformación, y una vez realizadas las modificaciones, se repetirá la misma medición para evaluar las prestaciones finales de la locomotora transformada.

### **10.1.3 Nuevas soluciones a considerar**

Las conclusiones de la primera fase del proyecto realizado por el Institut Cerdà, contemplan la sustitución del motor instalado en la locomotora a transformar, por uno nuevo dedicado a GNL.

Atendiendo a los objetivos previamente mencionados en este Informe, y lo dicho en la reunión de lanzamiento de esta fase del proyecto, se ampliará el abanico de posibilidades añadiendo la solución de usar motores de ciclo Dual (gasóleo + GNL) y la posibilidad de transformar el motor actual a combustible GNL o bien a ciclo Dual. En resumen, se considerarán y analizarán las siguientes soluciones para ambos tipos de locomotora (311 y 310):

- a) Sustitución del motor actual por otro motor a combustible GNL
- b) Transformación del motor actual a combustible GNL
- c) Sustitución del motor actual por otro motor de ciclo Dual (gasóleo + GNL)
- d) Transformación del motor actual a ciclo Dual (gasóleo + GNL)

Como “transformación de un motor” debe entenderse la sustitución de diferentes piezas de un motor, por otras adaptadas a los nuevos requisitos por la combustión de GNL, tales como culata, inyectores, pistones, válvulas, etc, manteniendo el mismo bloque, bielas, cigüeñal, etc.

Por último, cabe mencionar que aunque no es objeto del presente estudio, existen otras soluciones alternativas, a parte de las consideradas relativas al GNL, para reducir las emisiones de las locomotoras de tracción diésel. Estas soluciones se pueden consultar en el proyecto europeo Ten-T CleanErD en el que se estudian diferentes alternativas para dar respuesta a las nuevas legislaciones de emisiones en el sector ferroviario a nivel europeo. Dentro de estas soluciones se estudia la

posibilidad de mejorar la eficiencia de los motores diésel mediante la introducción de filtros de partículas así como la introducción de nuevas tecnologías emergentes de cara a futuras restricciones como los diseños basados en multi-tecnologías de post tratamiento y soluciones híbridas (diésel-eléctricas) o bien con sistemas de almacenamiento de energía.

#### **10.1.4 Criterios para la elección de la locomotora a transformar**

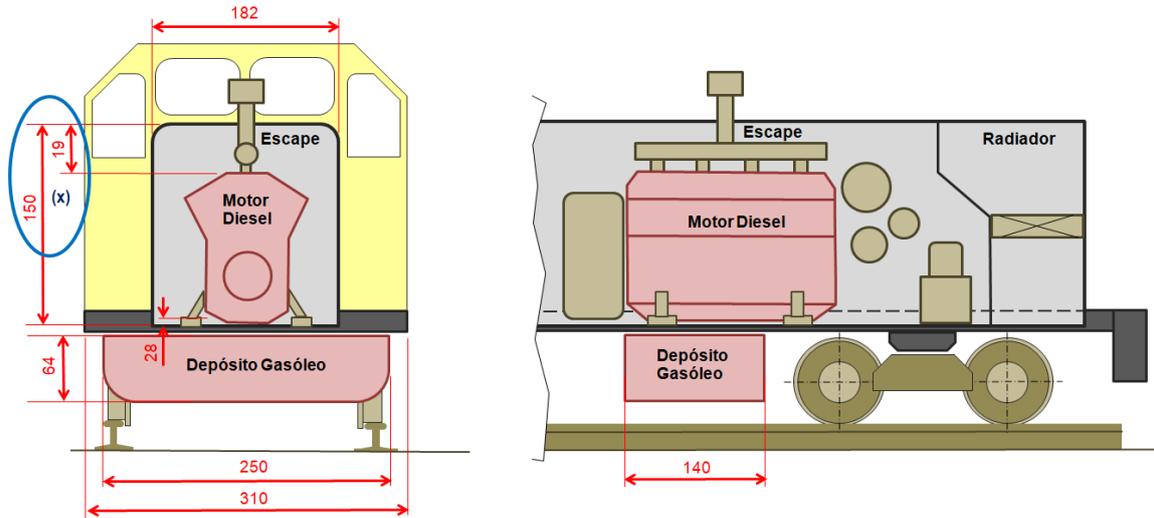
Sea cual sea la solución finalmente recomendada para el motor, previamente deberá decidirse el modelo de locomotora a transformar dado que, como se ha dicho, el parque existente de ambos tipos es el mismo y su utilización similar.

Principalmente deberán considerarse y evaluarse los siguientes aspectos técnicos:

- Espacio disponible dentro del carenado de la locomotora, para la sustitución del motor o su transformación.
- Espacio disponible dentro del carenado, para la sustitución o ampliación del radiador de agua para refrigeración del motor.
- Facilidad de acceso al interior del carenado, para realizar las operaciones de sustitución del motor o su transformación.
- Ubicación y volumen del depósito actual de gasóleo que permitan la fácil instalación de suficientes depósitos criogénicos de GNL.

Atendiendo a lo anterior, se realizó una sesión de mediciones en los talleres de ADIF del Port de Tarragona, sobre unidades de los dos tipos de locomotora, obteniéndose los resultados que se esquematizan en las figuras siguientes:

### Adif 311



### Adif 310

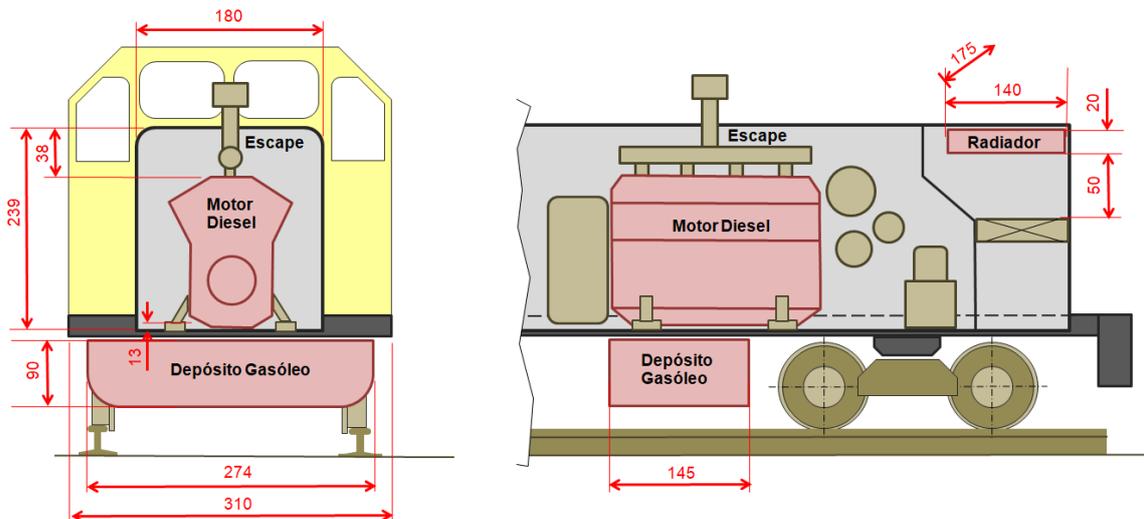


Figura 55 Detalle del esquema de las medidas obtenidas en taller para ambos tipos de locomotoras (Adif 311, Adif 310).

### 10.1.5 Análisis

Atendiendo a las figuras anteriores, especialmente a las medidas del compartimento del motor, se observa que las cotas señaladas con **(x)** del modelo 311, son sensiblemente menores que las correspondientes a las mismas del modelo 310. Ello implica que:

1. Difícilmente podrá cambiarse el motor de la locomotora 311 por uno nuevo, dado que los motores que en principio se consideran viables, tienen una altura mayor que la disponible.
2. La locomotora 310 tiene más espacio libre por encima del motor, lo cual que facilita intervenciones de mayor envergadura.



▪ Zona culatas motor MTU –  
Locomotora 311



▪ Zona culatas motor EDM –  
Locomotora 310

3. En la locomotora 310 hay espacio más que suficiente para aumentar el volumen del radiador del agua-motor sin problemas.



4. Los depósitos de gasóleo de ambos modelos son similares, aunque el tanque de la 310 es mayor y no existen elementos en los laterales que dificulten su cambio por depósitos criogénicos.



*Depósito de gasóleo – Locomotora  
311*



*Depósito de gasóleo – Locomotora  
310*

### 10.1.6 Conclusión

Por todo lo anterior, se recomienda actuar sobre la locomotora **Adif 310** para realizar la transformación de diésel a GNL.

En los apartados siguientes, se analizarán las ventajas e inconvenientes de la solución final a adoptar de entre las expresadas y que se repiten a continuación, todas ellas basadas en la locomotora 310:

- a) Sustitución del motor actual por otro motor a combustible GNL
- b) Transformación del motor actual a combustible GNL
- c) Sustitución del motor actual por otro motor de ciclo Dual (gasóleo + GNL)
- d) Transformación del motor actual a ciclo Dual (gasóleo + GNL)

## 10.2. Análisis de los posibles motores GNL y duales para el proyecto

Se ha realizado un estudio de mercado de todos los motores GNL y Duales, susceptibles de ser utilizados en este proyecto.

En este marco, se ha valorado las siguientes variables: características técnicas, fiabilidad, mantenimiento, coste, soporte técnico y referencias de uso en condiciones similares.

### 10.2.1 Descripción General

Debido a la escasa demanda existente, hay muy pocas empresas que ofrezcan soluciones para el uso del gas natural en aplicaciones ferroviarias.

Las opciones para los motores de locomotoras consisten en los motores de encendido provocado por chispa (motores dedicados) y los motores de encendido por compresión capaces de utilizar una mezcla variable de gasóleo y gas natural en su funcionamiento (motor dual).

Los motores de gas natural dedicado tienen un funcionamiento muy similar a los motores de gasolina, utilizando una mariposa y un sistema de encendido por chispa para controlar la mezcla de gas natural y aire en el interior del cilindro. En estos motores el gas natural sustituye completamente al gasoil, pero requieren la instalación de elementos adicionales.

El principio de funcionamiento de los motores de ciclo Otto, lleva inherente una pérdida potencia y una menor eficiencia si se compara con el ciclo diésel. En cualquier caso los continuos avances realizados por los fabricantes en esta tecnología garantizan la viabilidad del uso del gas natural en aplicaciones ferroviarias.

La tecnología dual se basa en la inyección de gas natural en el conducto de admisión del motor o directamente en el cilindro de un motor diésel. Se reduce la cantidad de gasoil inyectado, y se sustituye por gas natural. La inyección de gasoil, actúa como piloto, iniciando el encendido en el interior del cilindro, y provocando a continuación el encendido del gas natural. En los motores duales, se elimina la necesidad de una mariposa y un sistema de encendido, manteniéndose las ventajas del encendido por compresión (diésel). Este sistema no admite un funcionamiento con un 100% de gas natural, obteniéndose en el mejor de los casos sustituciones de gasoil cercanas al 80%. La aplicación de la tecnología dual es más económica si

la comparamos con la utilización de un motor de gas natural dedicado, debido a su aplicación como retrofit sobre el motor diésel existente. También hay que destacar el funcionamiento con un 100% de gasoil cuando no se dispone de gas natural.

La utilización de gas natural en sustitución del gasoil permite una sustancial reducción de las emisiones contaminantes y del ruido. Esta reducción de emisiones al medio ambiente, en especial CO<sub>2</sub>, partículas y óxidos de nitrógeno, mejora la calidad del aire en la zona de utilización de las máquinas, ya suficientemente contaminada por las emisiones de los buques y otras máquinas que actúan en el puerto.

Para la realización del estudio de los procesos de retrofitting necesarios para la transformación de una locomotora de maniobras de tracción diésel a tracción GNL, se han analizado las dos tecnologías existentes en el mercado:

- Motor de gas natural dedicado
- Motor dual (diésel/gas natural)

En ambos casos es posible encontrar en el mercado el motor desarrollado directamente por el fabricante o la conversión mediante un kit desarrollado por una empresa especializada.

Presentamos a continuación un cuadro comparativo con las ventajas e inconvenientes de la utilización de cada una de las posibilidades.

			VENTAJAS	INCONVENIENTES
<b>MOTOR DEDICADO (GAS NATURAL)</b>	<b>A</b>	<b>NUEVO MOTOR GN</b>	Fiabilidad Consumo Bajo mantenimiento Reducción de emisiones y ruido	Coste Complejidad de Integración Reducción de autonomía
	<b>B</b>	<b>CONVERSIÓN A GN DEL MOTOR ACTUAL</b>	Coste Facilidad de integración Fiabilidad Consumo Bajo mantenimiento Reducción de emisiones y ruido	Reducción de prestaciones Reducción de autonomía
<b>MOTOR DUAL</b>	<b>C</b>	<b>CONVERSIÓN A DUAL DEL MOTOR ACTUAL</b>	Coste Fiabilidad Autonomía Prestaciones	Consumo de gas reducido Integración depósito de GNL
	<b>D</b>	<b>NUEVO MOTOR DUAL</b>	Fiabilidad Autonomía Prestaciones	Coste Complejidad de integración del motor y del depósito GNL Consumo de gas reducido

**Tabla 19 Comparativo de tecnologías**

De cuadro anterior destacaríamos la necesidad de priorizar la utilización de motores de gas natural (dedicado), como la mejor forma de maximizar el consumo de gas y reducir las emisiones contaminantes.

Si bien la utilización de un motor dual puede parecer interesante, hay que indicar que para que un motor dual ofrezca sus mejores prestaciones se requiere una utilización estabilizada de la carga del motor que permita alcanzar porcentajes de sustitución cercanos al 70-80%.

El tipo de utilización de las locomotoras de maniobras que se realiza en el Puerto de Tarragona, implica un cambio continuo de la carga del motor, lo que va en detrimento del correcto funcionamiento de los motores duales.

## 10.2.2 Motores de Gas Natural

Son motores de ciclo Otto, con encendido provocado por chispa, que utilizan el gas natural como combustible.

Se han considerado todos los motores de gas natural del mercado susceptibles de ser utilizados para esta aplicación.

La potencia debe ser similar o ligeramente superior a la del motor diésel utilizado en la actualidad, para evitar que el menor par motor disponible en un motor de ciclo Otto condicione el agrado de funcionamiento percibido por el maquinista.

El mercado de motores de gas específicamente diseñados para su utilización en locomotoras es muy escaso, prácticamente nulo. Por este motivo se han añadido al estudio, motores de gas natural para uso en grupos generadores o aplicaciones de motores marinos.

### 10.2.2.1 Motores de gas natural desarrollados por el fabricante

Se trata de motores desarrollados por el propio fabricante del motor, para su funcionamiento exclusivamente con gas natural. Permiten disponer de un motor de gas con todas las garantías de funcionamiento del fabricante.

No se ha encontrado ningún motor de gas natural desarrollado específicamente por el fabricante para su utilización en locomotoras, por lo que se han seleccionado motores desarrollados para su uso como generadores, de los que existe una demanda consolidada en el mercado. En principio estos motores podrían ser utilizados en una locomotora, con ligeras modificaciones en la gestión del motor que deberían ser realizadas por el fabricante.

### 10.2.2.2 Motores de gas natural (reconvertidos)

Algunas empresas especializadas, desarrollan kits de conversión de motores diésel a gas natural. Se analizará la posibilidad de que exista algún sistema desarrollado para la conversión del motor de las locomotoras del estudio.

Este tipo de transformaciones se realizan utilizando como base el motor diésel existente, al que se realizan modificaciones mecánicas como la reducción de la relación de compresión, añadir bujías, mariposa, sistema de encendido, etc.

### **10.2.3 Motores Duales**

En el caso de motores duales, se han considerado todos los motores duales del mercado que pueden de ser utilizados en esta aplicación.

La potencia debe ser similar o ligeramente superior a la del motor diésel utilizado en la actualidad.

Como en el caso de los motores de gas natural, el mercado de motores duales para aplicación en locomotoras es muy escaso, por lo que se han añadido al estudio motores de generador y aplicaciones marinas.

En el mercado se pueden encontrar motores duales desarrollados por el fabricante del motor, y los desarrollados por empresas especializadas, que realizan la transformación sobre el motor original del cliente.

#### ***10.2.3.1 Motores duales desarrollados por el fabricante***

Se trata de motores desarrollados por el propio fabricante del motor, que permiten disponer de un motor dual con todas las garantías de funcionamiento del fabricante.

#### ***10.2.3.2 Motores duales (reconvertidos)***

Existen en el mercado empresas que comercializan kits de conversión a motor dual, adaptables a distintos motores, es lo que se conoce como retrofit. Su principal ventaja, es la posibilidad de reconvertir el motor actual a funcionamiento dual, por lo que los costes son mucho más reducidos al utilizarse el motor ya existente.

## 10.2.4 Benchmarking motores de GN dedicados y Duales

Se han analizado la gama de productos de los siguientes fabricantes:

- DRESSER-RAND (Siemens)
  - GUASCOR
- IVECO
- MAN
- Rolls Royce Power Systems
  - MTU
  - Detroit Diesel
  - Bergen Engines
- Wärtsilä
- Baudouin Moteurs
- DEUTZ
- CATERPILLAR
  - EMD
  - MWM
  - MAK
  - FG Wilson
  - PERKINS
- Mercedes Benz
- CUMMINS
- General Electric Rail
- MITSUBISHI
- Energy Conversion Inc. – ECI
- OMNITEK
- EVARM

En el siguiente capítulo se detallan las especificaciones de los motores seleccionados, que podrían ser utilizados para esta aplicación.

### 10.2.4.1 Motores GN dedicados

#### 10.2.4.1.1 GUASCOR (SIEMENS)

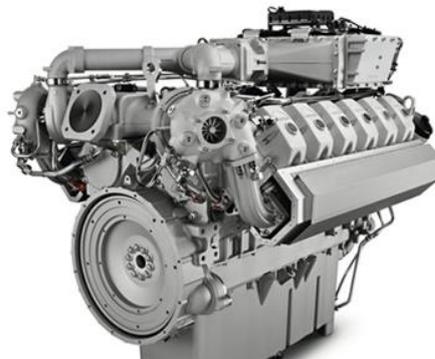
<b>Modelo</b>	SFGLD360 Lean Burn Gas Engine	 <b>Guascor</b> <b>DRESSER-RAND</b> A Siemens Business
<b>Tipo</b>	V-12 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	700 kW a 1800 min-1 503 kW a 1200 min-1	
<b>Frecuencia</b>	60 Hz a 1800 min-1 60 Hz a 1200 min-1	
<b>Diámetro (mm)</b>		
<b>Carrera (mm)</b>		
<b>Cilindrada (l)</b>	35,9	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	4200	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.664	
<b>Length (A)mm</b>	2.637	
<b>Heigh (C) mm</b>	1.738	
<b>Emisiones</b>	consultar	



Figura 56. Motor GUASCOR SFGD360

10.2.4.1.2 MAN

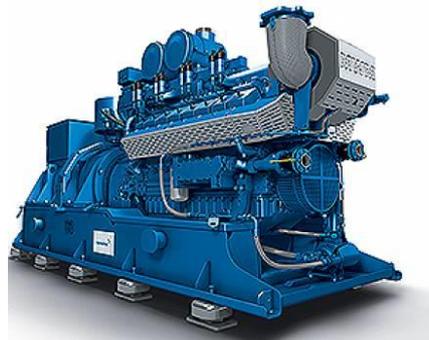
<b>Modelo</b>	E3262 LE 202	
<b>Tipo</b>	V-12 90° Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	580 kW a 1800 min-1 550 kW a 1500 min-1	
<b>Frecuencia</b>	60 Hz a 1800 min-1 50 Hz a 1500 min-1	
<b>Diámetro (mm)</b>	132	
<b>Carrera (mm)</b>	157	
<b>Cilindrada (l)</b>	25,8	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	1849	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.243	
<b>Length (A)mm</b>	1.748	
<b>Height (C) mm</b>	1.500	
<b>Emisiones</b>		



**Figura 57. Motor MAN E3262**

10.2.4.1.3 MWM (Caterpillar)

<b>Modelo</b>	TCG 2016 V16 C	
<b>Tipo</b>	V-16 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	800 kW a 1500 min-1 Generador	
<b>Frecuencia</b>	50 Hz 60 Hz disponible	
<b>Diámetro (mm)</b>		
<b>Carrera (mm)</b>		
<b>Cilindrada (l)</b>	35	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	8.450 Generador	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.590	
<b>Length (A)mm</b>	4.090 Generador	
<b>Height (C) mm</b>	2.190	
<b>Emisiones</b>	consultar	
<b>Combustible</b>	Gas natural	



**Figura 58. Motor MWM TCG 2016 V16 C**

10.2.4.1.4 CATERPILLAR

<b>Modelo</b>	CG170-12	<b>CATERPILLAR®</b>
<b>Tipo</b>	V-12 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	1000 kW a 1500 min-1	
<b>Frecuencia</b>	50 Hz 60 Hz disponible	
<b>Diámetro (mm)</b>		
<b>Carrera (mm)</b>		
<b>Cilindrada (l)</b>		
<b>Peso en vacío (kg)</b>		
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>		
<b>Length (A)mm</b>		
<b>Height (C) mm</b>		
<b>Emisiones</b>	consultar	
<b>Combustible</b>	Gas natural	



Figura 59. Motor CATERPILLAR CG170-12

10.2.4.1.5 FG WILSON (Caterpillar)

<b>Modelo</b>	PG1250B2	
<b>Tipo</b>	Motor Perkins 4016-61TRS2 V-16 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	1042 kW a 1500 min-1 Generador	
<b>Frecuencia</b>	50 Hz	
<b>Diámetro (mm)</b>	160	
<b>Carrera (mm)</b>	190	
<b>Cilindrada (l)</b>	61,12	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	5.820	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	2.100	
<b>Length (A)mm</b>	6.340 Generador	
<b>Height (C) mm</b>	3.370	
<b>Emisiones</b>	consultar	
<b>Combustible</b>	Gas natural	



**Figura 60. Motor FG Wilson PG1250B2**

10.2.4.1.6 PERKINS (Caterpillar)

		
<b>Modelo</b>	4000 Series 4012TESI	
	Spark Ignited Gas Engine	
<b>Tipo</b>	V-12 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	632 kW a 1500 min-1	
<b>Frecuencia</b>	50 Hz	
<b>Diámetro (mm)</b>	160	
<b>Carrera (mm)</b>	190	
<b>Cilindrada (l)</b>	46	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	4.680	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.888	
<b>Length (A)mm</b>	2.681	
<b>Height (C) mm</b>	1.893	
<b>Emisiones</b>	consultar	
<b>Combustible</b>	Gas natural	



**Figura 61. Motor PERKINS 4012TESI**

10.2.4.1.7 MITSUBISHI

	
<b>Modelo</b>	GS12R-MPTK
<b>Tipo</b>	V-12 Turbocharged 4-stroke
<b>Potencia</b>	722 kW a 1500 min-1
<b>Frecuencia</b>	50 Hz 60 Hz disponible
<b>Diámetro (mm)</b>	170
<b>Carrera (mm)</b>	180
<b>Cilindrada (l)</b>	49,03
<b>Peso en vacío (kg)</b>	5.350
<b>Dimensiones</b>	
<b>Width (B) mm</b>	1.832
<b>Length (A)mm</b>	2.421
<b>Height (C) mm</b>	2.137
<b>Emisiones</b>	consultar
<b>Combustible</b>	Gas natural



**Figura 62. Motor MITSUBISHI GS12R-MPTK**

### 10.2.4.2 Motores GN reconvertidos

#### 10.2.4.2.1 Energy Conversion Incorporated - ECI



La empresa norteamericana ECI, dispone de varias soluciones para la conversión de motores diésel de locomotoras a gas natural.

Entre los motores desarrollados se encuentra un kit de conversión a gas natural para toda la serie de motores EMD 645 como el que se encuentra en la locomotora Tipo 310.

El sistema contempla:

- Modificación de la culata
- Sustitución de los pistones
- Añadir un sistema de encendido (bobinas, bujías etc...)
- Sistema de inyección de gas natural a baja presión
- Sensores de vueltas en el volante motor, y de detonación en cada cilindro
- Sondas de temperatura de escape en cada cilindro
- ECU para el motor
- Sistema de detección de fugas de gas

ENGINE MODEL	full load rated speed RPM	output continuous BHP kW	
<b>EMD roots blown DF, &amp; SI</b>			
EMD 8-645 E1, E2, E6	750	800	570
	900	1050	745
EMD 12-645 E1, E2, E6	750	1200	865
	900	1500	1075
EMD 16-645 E1, E2, E6	750	1700	1210
	900	2100	1500
<b>EMD turbcharged - DF, (SI for these models currently under development)</b>			
EMD 8-645 E3, E4, E7	750	1200	894
	900	1525	1137
EMD 12-645 E3, E4, E7	750	1830	1364
	900	2305	1718
EMD 16-645 E3, E4, E7	750	2460	1834
	900	3070	2289
EMD 20-645 E3, E4, E7	750	3055	2278
	900	3600	2684
EMD 12-710 G4B	UNDER DEVELOPMENT		
EMD 16-710 G4B			
EMD 20-710 G4B			

DF- dual fuel, SI- spark ignited

**Tabla 20 Variantes desarrolladas sobre el motor EMD 645**

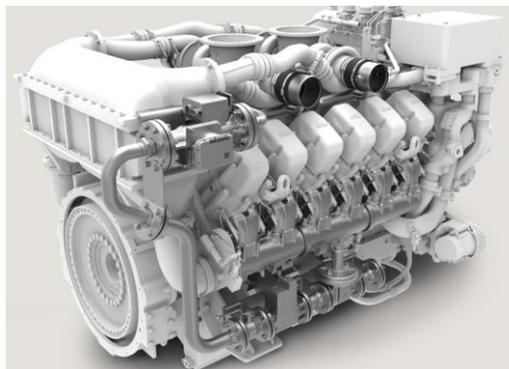


**Figura 63. Motor EMD 12-645-E**

### 10.2.4.3 Motores dual

#### 10.2.4.3.1 MTU (Rolls-Royce)

		
<b>Modelo</b>	MTU 12V 4000 S83	
<b>Tipo</b>	V-12 90° Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	1500 kW a 1800 min-1	
<b>Frecuencia</b>		
<b>Diámetro (mm)</b>	170	
<b>Carrera (mm)</b>	210	
<b>Cilindrada (l)</b>	57,2	
<b>Peso en vacío (kg)</b>	6613	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.582	
<b>Length (A)mm</b>	2.386	
<b>Height (C) mm</b>	2.015	
<b>Emisiones</b>		



**Figura 64. Motor MTU 12V 4000 S83**

10.2.4.3.2 WÄRTSILÄ

		
<b>Modelo</b>	6L20DF	
<b>Tipo</b>	L-6 Turbocharged 4-stroke	
<b>Potencia</b>	960 kW a 1000 min-1 Motor 920 kW a 1000 min-1 Generador	
<b>Frecuencia</b>	50 Hz 60 Hz disponible	
<b>Diámetro (mm)</b>	200	
<b>Carrera (mm)</b>	280	
<b>Cilindrada (l)</b>		
<b>Peso en vacío (kg)</b>	9.400	
<b>Dimensiones</b>		
<b>Width (B) mm</b>	1.690	
<b>Length (A)mm</b>	3.254	
<b>Height (C) mm</b>	2.329	
<b>Emisiones</b>	IMO Tier III MDO Marine Diesel Oil	
<b>Combustible</b>	HFO Heavy Fuel Oil NG Natural Gas	



**Figura 65. Motor WÄRTSILÄ 6L20DF**

#### 10.2.4.4 Motores dual - retrofit

##### 10.2.4.4.1 OMNITEK Engineering



Empresa norteamericana que ha desarrollado sus propios sistemas de conversión de motores diésel a gas natural (Dual).

Están especializados en la transformación de motores pesados de camiones para transporte de larga distancia.

No están interesados en el proyecto, y nos indican que ven muy difícil la rentabilidad de una transformación Dual para un uso como el de las locomotoras del puerto.



**Figura 66. Motores Caterpillar 3406E y Mercedes Benz OM904LA**

##### 10.2.4.4.2 EVARM



Empresa española que ha desarrollado sus propios sistemas de conversión de motores diésel a gas natural (Dual).

Están especializados en la transformación de motores pesados de camiones para transporte de larga distancia.

Están interesados en el proyecto, pero no tienen experiencia en la transformación de motores de dos tiempos como el utilizado en la locomotora Tipo 310.

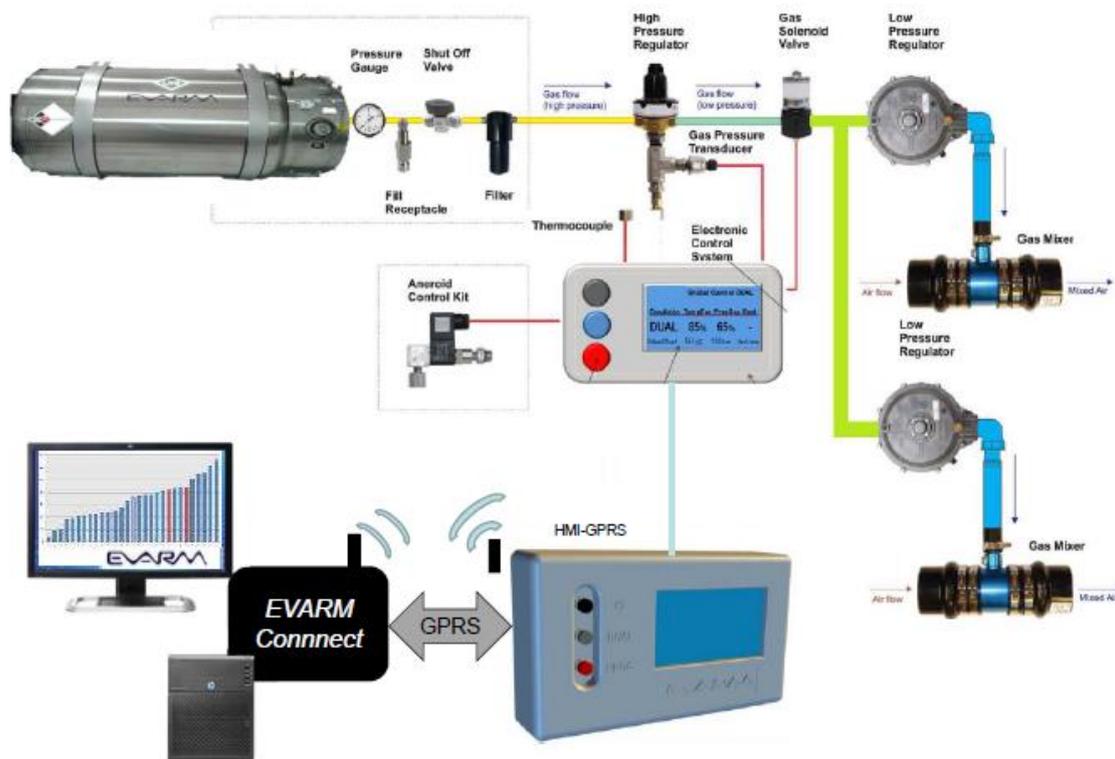


Figura 67. Sistema Dual desarrollado por EVARM

10.2.4.4.3 Energy Conversions Inc.



La empresa norteamericana ECI, dispone de varias soluciones para la conversión de motores diésel de locomotoras a gas natural (Dual).

Han realizado más de 30 conversiones a Dual sobre motores de la serie EMD 645, algunos de ellos en locomotoras.



Figura 68. Sistema Dual desarrollado por ECI

ENGINE MODEL	full load rated speed RPM	output continuous BHP kW	
<b>EMD roots blown DF, &amp; SI</b>			
EMD 8-645 E1, E2, E6	750	800	570
	900	1050	745
EMD 12-645 E1, E2, E6	750	1200	865
	900	1500	1075
EMD 16-645 E1, E2, E6	750	1700	1210
	900	2100	1500
<b>EMD turbcharged - DF, (SI for these models currently under development)</b>			
EMD 8-645 E3, E4, E7	750	1200	894
	900	1525	1137
EMD 12-645 E3, E4, E7	750	1830	1364
	900	2305	1718
EMD 16-645 E3, E4, E7	750	2460	1834
	900	3070	2289
EMD 20-645 E3, E4, E7	750	3055	2278
	900	3600	2684
EMD 12-710 G4B	UNDER DEVELOPMENT		
EMD 16-710 G4B			
EMD 20-710 G4B			

DF- dual fuel, SI- spark ignited

**Tabla 21 Variantes del modelo de motor EMD-645**

#### 10.2.4.4.4 General Electric Transportation



General Electric ha realizado un prototipo de locomotora Dual, que se encuentra en fase de pruebas. Puede funcionar con diésel y GNL con una sustitución máxima cercana al 80%.



**Figura 69. Sistema Dual con GNL desarrollado por General Electric (NextFuel™ Natural Gas Retrofit)**

### **10.2.5 Selección del motor**

Para seleccionar el motor se han contemplado los siguientes condicionantes:

- Versión específica para uso en locomotoras
- Dimensiones adecuadas al espacio disponible
- Motor de gas natural dedicado
- Facilidad de integración
- Coste

Aunque a continuación se detalla cada una de las variables consideradas y su razonamiento que justifica la elección, a modo de resumen se concluye que el proyecto se realizará sobre la locomotora Tipo 310, transformando su motor diésel de 2 tiempos GM 8-645-E mediante un kit de conversión a gas natural desarrollado por la empresa ECI. Tan solo Guascor como fabricante de motores de gas natural dedicado, ha mostrado su interés en realizar los ajustes necesarios para su aplicación a la locomotora del proyecto.

Mediante esta transformación se conseguirá un motor de gas natural dedicado, específicamente adaptado al uso en locomotoras. La integración del mismo se realizará de forma relativamente sencilla, al tratarse de una modificación sobre el motor existente.

#### **10.2.5.1 Versión específica para Locomotora**

Se han descartados aquellos que no disponen de una versión especialmente desarrollada para su aplicación en locomotoras.

A pesar de que cualquier motor desarrollado para ser utilizado como generador, podría utilizarse en locomotoras de tracción eléctrica como las del proyecto, hay que tener en cuenta que para un funcionamiento correcto es necesario que se realicen ajustes específicos en el sistema de gestión del motor. Los fabricantes han mostrado muy poco interés en adaptar sus motores para su uso en locomotoras por lo que han sido descartados.

#### **10.2.5.2 Dimensiones del motor**

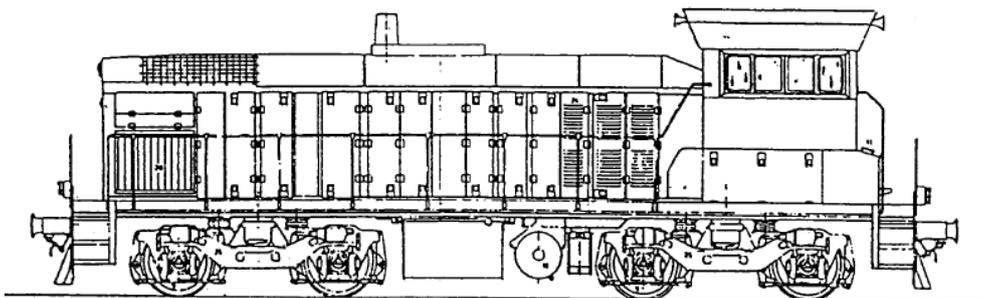
Otro motivo importante de descarte han sido las dimensiones de los motores, en especial su altura.

En la locomotora Tipo 311 la altura libre en la zona del motor es de 1500 mm, lo que hace inviable la instalación de la mayor parte de los motores analizados. En el

caso de la locomotora Tipo 310 la altura libre es de 2390 mm lo que permite una mayor flexibilidad para seleccionar el motor. A continuación, se expone el estudio y análisis realizado a partir del cual se extraen las conclusiones anteriores.

#### 10.2.5.2.1 Análisis previo: dimensiones y pesos

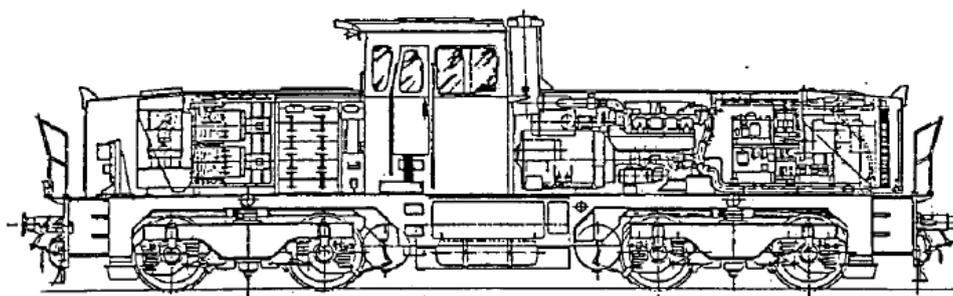
##### **Locomotora Tipo 310:**

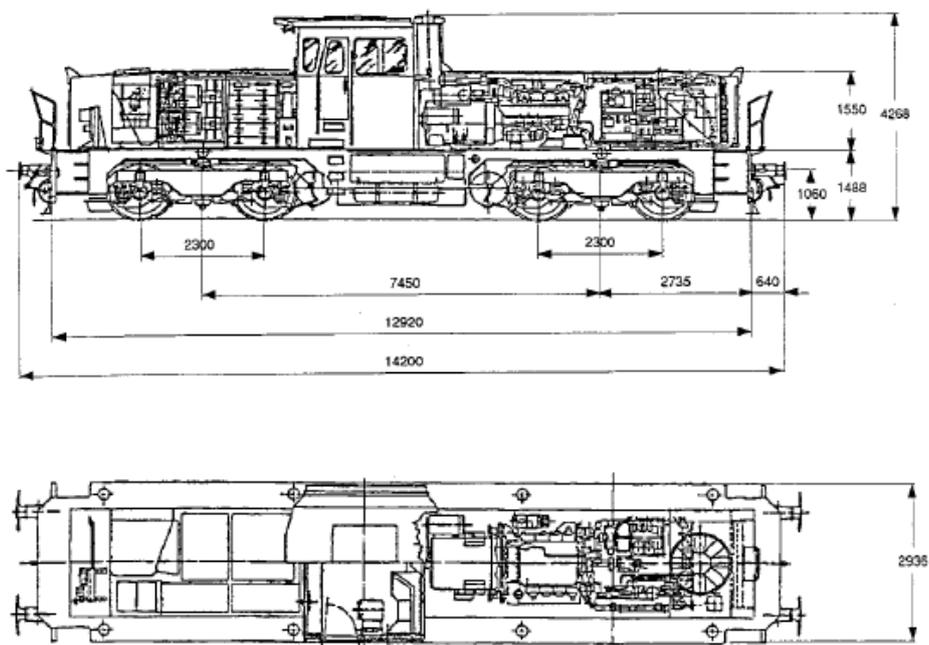


**Figura 70. Locomotora Tipo 310**

La disposición delantera de todos los elementos que componen el sistema de tracción de la locomotora, permite disponer de mayor espacio y facilitar la integración de elementos accesorios como los conductos de gas, agua de refrigeración, aire del motor, cableado eléctrico etc.

##### **Locomotora Tipo 311:**



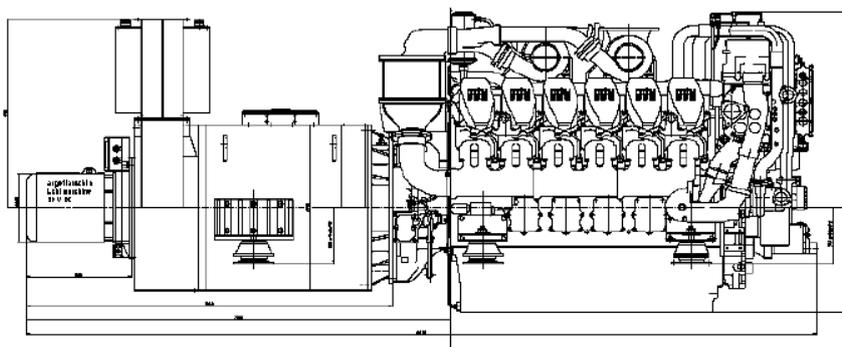

**Figura 71. Locomotora Tipo 311**
**Comparativo dimensiones motores:**

MOTOR				MOTOR / MOTOR+GENERADOR*			
				Length (A) mm	Width (B) mm	Height (C) mm	Weight kg
<b>Motores actuales Diesel</b>							
MTU	MTU V8 396TC 13	Diesel	Locomotora	2013	1439	1380	2520
General Motors / EMD	GM 8-645-E	Diesel 2T	Locomotora	3632	1750	2010	8622
<b>Motores dedicados Gas Natural</b>							
Guascor	SFGLD360	Gas	Locomotora	2637	1664	1738	4200
MAN	E3262 LE 202	Gas	Generador	1748	1243	1500	1849
MWM	TCG 2016 V16 C	Gas	Generador	4090*	1590*	2190*	8450*
Caterpillar	CG170-12	Gas	Generador	4064*	1810*	2210*	10800*
FG Wilson	PG1250B2	Gas	Generador	6340*	2100*	3370*	5820*
Perkins	4012TESI	Gas	Generador	2681	1888	1893	4680
Mitsubishi	GS12R-MPTK	Gas	Marino	2421	1832	2137	5350
EMD Electromotive	EMD 8-645-E	Gas	Locomotora	3632	1750	2010	8622
<b>Motores Dual</b>							
MTU	12V 4000 S83	Dual	Generador	2386	1582	2015	6613
Wärtsilä	6L20DF	Dual	Marino	3254	1690	2329	9400
General Electric	NextFuel™ Retrofit	Dual	Locomotora	nd	nd	nd	nd
EMD Electromotive	EMD 8-645-E	Dual	Locomotora	3632	1750	2010	8622

**Tabla 22 Comparativa de las dimensiones de los motores**



**Figura 72. Dimensiones de un motor**



**Figura 73. Dimensiones de un conjunto motor-generator**

### **10.2.5.3 Motor de gas natural dedicado**

Se ha priorizado la utilización de un motor de gas natural dedicado frente a la tecnología dual, de este modo se garantiza la utilización de un 100% de gas natural. A continuación, se expone el estudio y análisis realizado a partir del cual se extraen las conclusiones anteriores.

#### 10.2.5.3.1 Motor dual.

Un motor diésel dual, consiste en un motor diésel al que se le ha acoplado un sistema que permite añadir gas natural a la cámara de combustión. Este tipo de motores utiliza el gasóleo para provocar el encendido del gas natural. Es lo que se conoce como inyección piloto, que provoca el encendido del gas.

10.2.5.3.1.1 Motor dual de baja presión

Si bien existen otras posibilidades, el sistema más habitual para la introducción del gas natural en el motor, consiste en la introducción mediante un mezclador de gas instalado antes del sistema de sobrealimentación del motor.

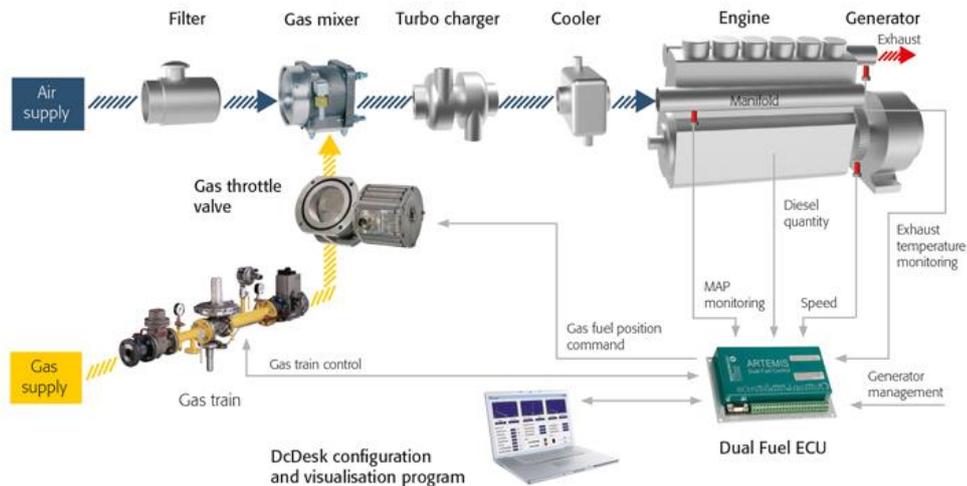


Figura 74. Motor Dual con inyección de gas mediante mezclador (Fuente: Artemis)

En la siguiente figura se muestra como la inyección piloto de gasóleo durante la fase de compresión, provoca el encendido del gas e inicia la fase de explosión.

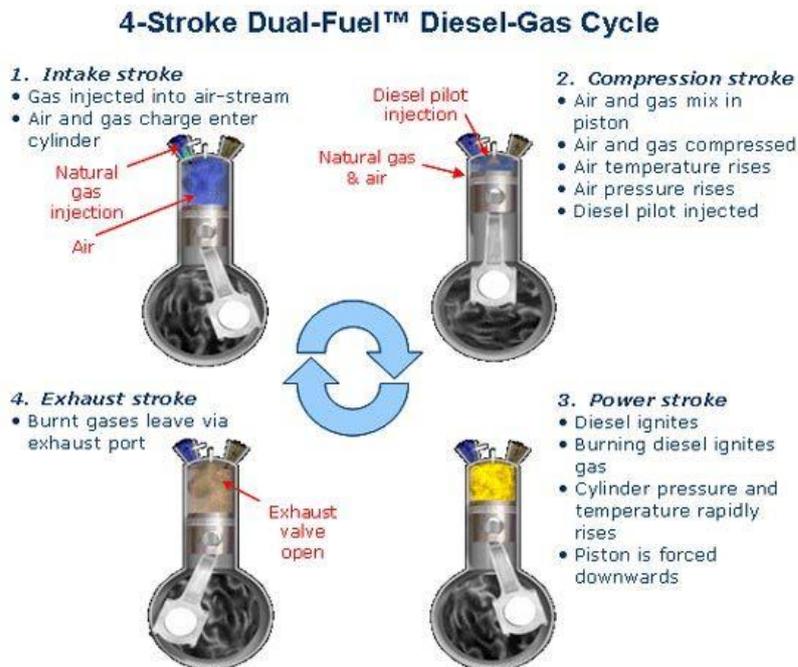


Figura 75. Fases de un motor Dual de 4 tiempos

#### 10.2.5.3.1.2 Motor dual de alta presión

La empresa Westport ha desarrollado el sistema HPDI (High Pressure Direct Injection), para su aplicación en motores de vehículos de transporte pesado con gran éxito.

Es un sistema dual en el que el gas se introduce directamente en la cámara de combustión a alta presión (superior a 300 bar) y utilizando una inyección piloto de gasóleo para provocar la combustión.

El sistema HPDI de Westport se desarrolló inicialmente para motores Cummins de camión. El 2017 se inició comercialización del HPDI 2.0 que puede aplicarse a otros fabricantes de motores heavy duty.

Su aplicación a motores de locomotora como la del presente proyecto no es posible debido a la limitación de caudal de los inyectores desarrollados hasta la fecha por Westport.



**Figure 76. Inyector de alta presión (gas/diésel) de Westport**

#### 10.2.5.3.2 Ventajas e Inconvenientes

Las ventajas e inconvenientes presentadas a continuación se refieren a su comparación con un motor de gas natural dedicado, es decir un motor de encendido provocado por chispa, con ciclo Otto y una utilización de gas natural del 100%.

#### **Ventajas:**

Las principales ventajas de la utilización de un motor Dual son las siguientes:

- Se mantiene el motor diésel original, con las modificaciones necesarias que permiten la utilización de gas natural. Implementación más económica.
- Flexibilidad. En el caso de que no se disponga de gas natural, es posible el funcionamiento del motor con gasóleo como si se tratase de un motor diésel tradicional.
- Se mantienen las prestaciones del motor original.
- No hay problemas de exceso de temperatura en elementos como las válvulas o el colector de escape.
- La inyección de gasóleo (inyección piloto) actúa como sistema de encendido lo que garantiza un menor mantenimiento frente al sistema de encendido por bujías y bobinas de un motor Otto tradicional.

***Inconvenientes:***

Los principales inconvenientes de la utilización de un motor Dual son los siguientes:

- Se necesita gasóleo para el funcionamiento del motor. Si nos quedamos sin gasóleo, el motor no puede funcionar.
- Nivel de emisiones superior al obtenido con un motor de gas natural dedicado. En especial las emisiones de NO<sub>x</sub> y las partículas.
- El porcentaje de sustitución de gas, es decir la parte de gas natural que sustituye al gasóleo durante el funcionamiento del motor, depende de la carga. El porcentaje máximo de sustitución habitualmente se sitúa alrededor de un 80%.
- La integración de dos depósitos de combustible, uno para gasóleo y otro para gas natural puede resultar compleja por la falta de espacio disponible en la locomotora.

Si bien la utilización de un motor dual puede parecer interesante, hay que indicar que para que un motor dual ofrezca sus mejores prestaciones se requiere una utilización estabilizada de la carga del motor que permitirá alcanzar porcentajes de sustitución cercanos al 80%.

El tipo de utilización de las locomotoras de maniobras que se realiza en el Puerto de Tarragona, implica un cambio continuo de la carga del motor, lo que va en detrimento la consecución de una elevada tasa de sustitución, que en el caso que nos ocupa difícilmente alcanzará el 40-50% del consumo total.

La dificultad de integración de los depósitos de gasóleo y de GNL, así como una reducción de emisiones inferior a la que se obtiene con la utilización de motor de gas natural dedicado, ha descartado el motor dual como opción a utilizar en el proyecto.

Se ha considerado que la utilización de motores de gas natural (dedicado), es la mejor forma de maximizar el consumo de gas y reducir las emisiones contaminantes.

#### **10.2.5.4 Facilidad de integración**

La integración de un motor distinto al actual comporta la necesidad de rediseñar todos los anclajes y soportes del mismo, así como la adaptación de todos los conductos de agua, aire, aceite y combustible. También debe adaptarse todo el sistema eléctrico.

Si se consigue mantener el motor existente y transformarlo mediante un kit adecuado a gas natural, los problemas de integración se simplifican.

#### **10.2.5.5 Coste**

El coste del motor de gas natural dedicado de Guascor que podría adaptarse al proyecto es muy similar al coste del kit de conversión del motor desarrollado por ECI.

Si se considera la mayor complejidad de la sustitución del motor: rediseño y adaptación de anclajes, soportes, cableados del motor, compatibilidad con el generador existente, así como los costes de acreditación y validación de un nuevo motor, se concluye que el coste de la sustitución del motor frente al retrofit del motor actual son muy similares.

### **10.3. Definición de las características del depósito de GNL**

A partir de las características de utilización del motor actual, se determinará la capacidad del depósito de GNL, así como sus características técnicas. Además, se tendrá en cuenta que el depósito deberá disponer de indicador de nivel, regulador de presión, válvulas de seguridad y de un intercambiador de calor para la vaporización del líquido.

### 10.3.1 Definiciones previas

El gas natural es una mezcla de gases compuesta principalmente por metano. Se trata de un gas combustible que proviene de formaciones geológicas, por lo que constituye una fuente de energía no renovable.

Elemento	Formulación	%
Metano	CH <sub>4</sub>	70-90%
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0-20%
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0-8%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0-0,2%
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0-5%
Sulfato de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0-5%
Otros gases	A, He, Ne, Xe	trazas

**Tabla 23. Composición del gas natural**

El gas natural licuado (GNL), es el fluido en estado líquido que se obtiene enfriando el gas a una temperatura de -162 °C. De este modo se reduce en 600 veces su volumen y se facilita su transporte.

La combustión del gas natural produce, como mínimo, de un 25 a 30% menos CO<sub>2</sub> que la del gasóleo, por unidad de energía producida.

El gas natural permite obtener importantes reducciones de emisiones contaminantes en comparación al gasóleo:

- Reducción de NO<sub>x</sub>: 35 a 40 %.
- Reducción de SO<sub>2</sub>: 98 %
- Reducción de partículas: 98 %

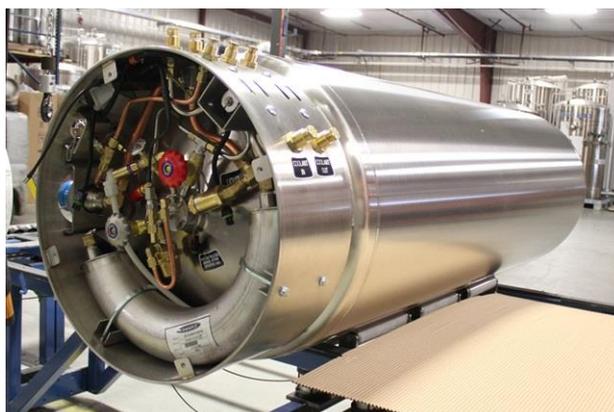
Un depósito criogénico es el conjunto del recipiente interior, aislamiento, envolvente, soportes, equipos de puesta en presión, tuberías, válvulas, manómetros, niveles y otros elementos accesorios que forman un conjunto que almacena GNL.

El vaporizador de GNL consiste en un intercambiador que, utilizando el agua del motor de combustión, vaporiza el combustible líquido criogénico suministrando

gas al sistema de alimentación del motor. La temperatura del gas oscila entre -40 °C y +105 °C.

El fenómeno de generación de vapores en el interior del depósito debido a la temperatura ambiente que lentamente calienta el líquido del depósito (mientras se mantiene constante la presión en su interior) se denomina Boil-off. La descarga de estos vapores a la atmósfera se conoce como venteo.

El equipo de vaporización es el conjunto de elementos tales como vaporizadores, recalentadores, bombas y otros, con sus accesorios correspondientes, colocados a continuación del depósito criogénico y cuya misión es transformar el líquido almacenado en gas para posterior suministro al motor de combustión interna.



**Figura 77. Depósito criogénico GNL (Fuente: Chart)**

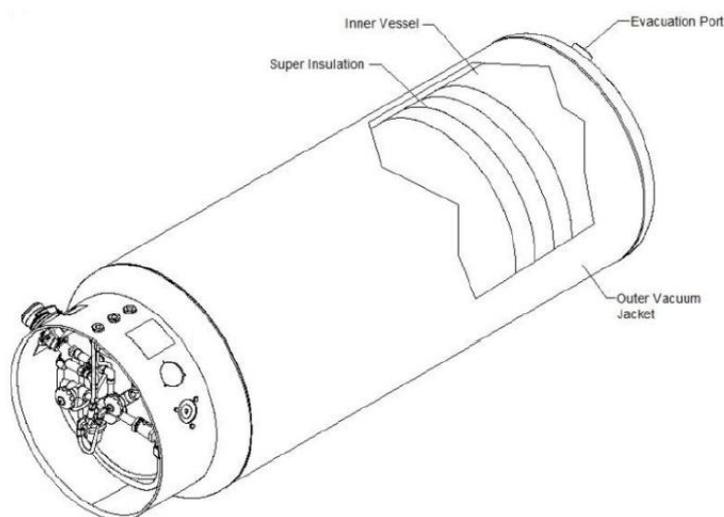
### **10.3.2 Características técnicas**

Los depósitos de LNG deben cumplir las normativas ECE R110 relativa a la utilización del gas natural en vehículos a motor y la ISO 12991 Liquefied natural gas (LNG) -- Tanks for on-board storage as a fuel for automotive vehicles.

Para que el depósito criogénico pueda mantener el combustible líquido en su interior sin utilizar ningún sistema externo de refrigeración, debe estar extremadamente bien aislado térmicamente. Para conseguir este grado de aislamiento el depósito a presión de GNL se cubre con material aislante y se encierra en el interior de un recipiente al vacío. El depósito de GNL y la cubierta

exterior están separados por una cámara al vacío, lo que garantiza el máximo aislamiento térmico. Esta combinación entre aislamiento y vacío se conoce como super-aislamiento y consigue los mayores valores de eficiencia térmica.

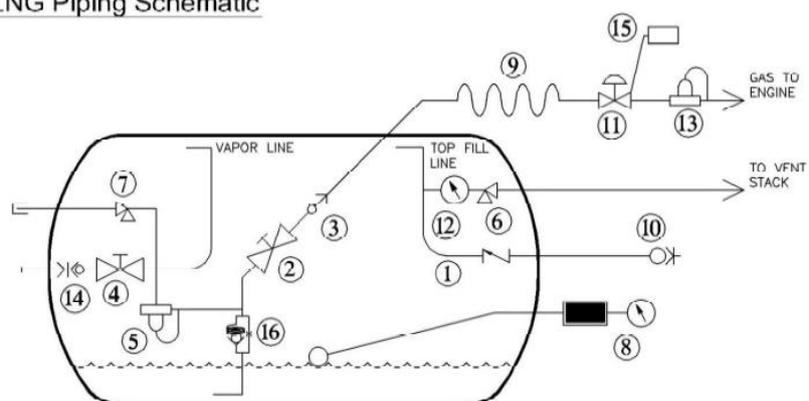
Con el super-aislamiento se consiguen períodos superiores a una semana sin pérdida de gas debido al boil-off. Tanto el depósito interior como el recubrimiento exterior se realizan en acero inoxidable, para garantizar las mejores prestaciones y longevidad del sistema.



**Figura 78 Depósito de GNL**

El esquema de funcionamiento de un depósito de GNL de acuerdo con las normativas es el siguiente:

LNG Piping Schematic



- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1- Fill check valve           | 9- Vaporizer                     |
| 2- Fuel shutoff valve         | 10- Fill valve                   |
| 3- Excess flow valve          | 11- Automatic fuel shutoff valve |
| 4- Vapor shutoff valve        | 12- Tank pressure gauge          |
| 5- Pressure control regulator | 13- Overpressure regulator       |
| 6- Primary relief valve PRV   | 14- Vent connector               |
| 7- Secondary relief valve     | 15- Gas temperatura sensor       |
| 8- Fuel contents gauge        | 16- LNG fuel valve               |

**Figura 79 Esquema de un depósito GNL**

El vaporizador de GNL, no afecta a la presión del combustible tan solo aumenta su temperatura provocando el cambio de líquido a gas.

El diseño del depósito de GNL debe garantizar el mantenimiento en su interior del líquido sin realizar ningún venteo durante un mínimo de 5 días, lo que garantiza que con uso normal no se producirán emisiones de gas a la atmósfera.

### **10.3.3 Benchmarking de depósitos criogénicos**

Se ha realizado un estudio de mercado analizando los productos de los proveedores de depósitos criogénicos. Se valorarán las características técnicas, fiabilidad, mantenimiento, coste, soporte técnico y referencias de uso en condiciones similares.

#### **10.3.3.1 Descripción General**

La mayor parte de los fabricantes de depósitos criogénicos que hay en el mercado, fabrican depósitos criogénicos para dos aplicaciones básicas:

- Utilización estacionaria, es decir el depósito criogénico se instala y permanece siempre en el mismo lugar.
- Para el transporte de líquidos criogénicos hasta la ubicación del depósito estacionario.

Estas aplicaciones son las que tienen mayor demanda en el mercado y por ello los fabricantes destinan la mayor parte de su catálogo a cubrir estas necesidades.

La utilización de depósitos criogénicos para suministrar GNL al motor de un vehículo en movimiento es un mercado muy minoritario y por tanto con un número de fabricantes limitado.

Se han analizado los productos suministrados por los siguientes fabricantes:

- i. Chart Industries - USA
- ii. Cryo Diffusion - USA
- iii. Cryogenic Fuels Inc.- USA
- iv. Wesport Innovations – CAN
- v. SAG – Austria

De todas las empresas anteriores, tan solo Chart Industries y SAG disponen de depósitos criogénicos con la certificación ECE R110.

Atendiendo al liderazgo de Chart en el mercado, a su disposición para colaborar en el proyecto y a la calidad de su producto, se han seleccionado depósitos de este fabricante para su utilización en el proyecto.

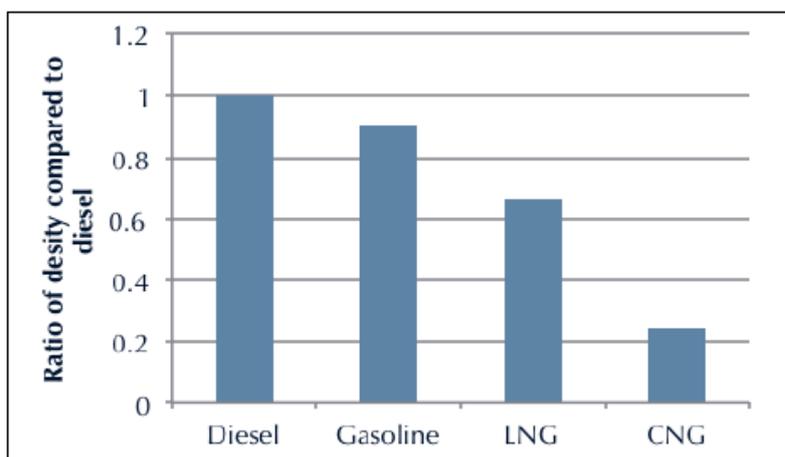
#### **10.3.4 Capacidad de los depósitos**

Se dispone de la siguiente tabla con los datos de consumo de combustible diésel (2015) de las locomotoras Tipo 310 y Tipo 311 que prestan sus servicios de maniobras en las instalaciones de Autoridad Portuaria de Tarragona y en Tarragona Mercancías (Tarragona Clasificación).

Año	Total (l)	Total (h)	Total (km)	Consumo (l/km)
2007	270.730	14.904	73.983	3,66
2008	239.344	13.200	73.838	3,24
2009	140.378	7.711	45.919	3,06
2010	147.638	8.465	43.506	3,39
2011	198.021	9.923	54.713	3,62
2012	185.252	9.029	50.541	3,67
2013	161.733	8.555	44.466	3,64
2014	173.181	9.582	47.870	3,62

**Tabla 24 Consumo de combustible locomotoras Puerto de Tarragona (2015)**

De la tabla anterior se obtiene un consumo medio de 3,49 litros de gasóleo por kilómetro recorrido. La densidad de energía del GNL es del 60% de la del gasóleo, por lo que se necesitará disponer de mayor cantidad de combustible líquido almacenado para obtener la misma energía.



Source: US Energy Information Administration

**Figura 80 Densidad energética comparada con el gasóleo**

De forma simplificada un litro de gasóleo equivale a 1,63 litros de GNL.

La locomotora Tipo 310 dispone de un depósito de combustible de 2700 litros de gasóleo que se llena, de acuerdo con la información facilitada por el Puerto de

Tarragona, una vez a la semana. Para mantener una capacidad equivalente debería disponerse de una capacidad de almacenamiento de GNL de 4400 litros.

En el siguiente apartado se realiza un estudio sobre la ubicación del depósito de combustible, en el que se indica varias alternativas para la correcta ubicación de los depósitos de GNL, obteniéndose una capacidad máxima de 2164 litros de GNL. Esta capacidad viene a significar que la autonomía de la locomotora de GNL se verá reducida a la mitad de la que tenía con el motor diésel. Los depósitos de GNL de la locomotora deberán llenarse dos veces a la semana.

Esta frecuencia de llenado limita el boil-off y garantiza la ausencia de venteos durante el uso de la locomotora.

#### ***10.3.4.1 Análisis de la capacidad según la ubicación del depósito GNL en la locomotora***

Una vez definidas las características del depósito de GNL, se realiza el análisis sobre su mejor ubicación en la locomotora. También, se determinará la ubicación de la válvula de carga del depósito.

Se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- La seguridad en la instalación
- Minimizar su influencia en la modificación del CDG
- Facilidad de uso y mantenimiento

##### 10.3.4.1.1 Ubicación depósito GNL

La locomotora Tipo 310 dispone de un depósito de combustible (gasóleo) con una capacidad de 2700 litros.

El depósito se encuentra situado aproximadamente en el centro de la locomotora y se extiende de un lado al otro de la misma. Dispone de acceso para el llenado en ambos lados.

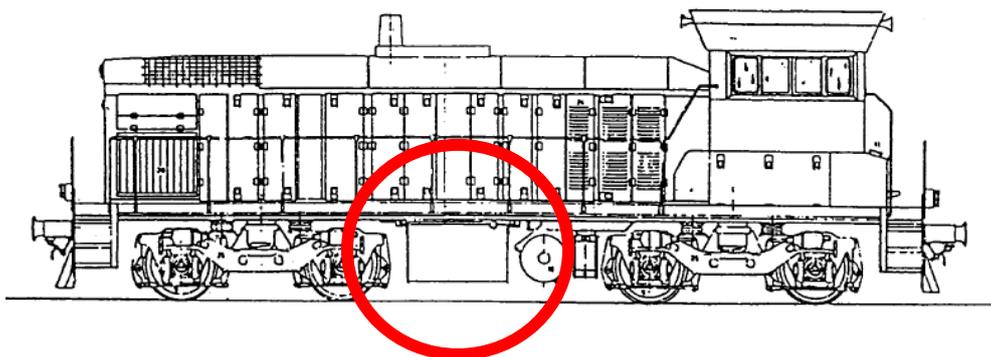


Figura 81. Ubicación del depósito de combustible (gasóleo)



Figura 82. Locomotora Tipo 310 – Vista general

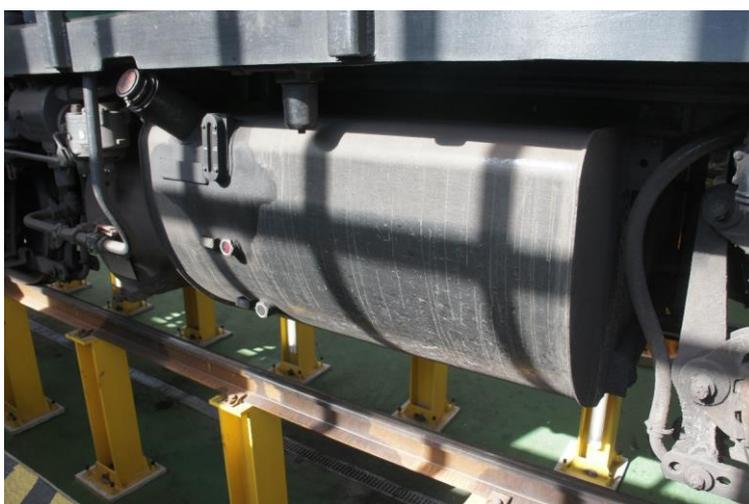


Figura 83. Locomotora Tipo 310 – Detalle depósito de combustible

Las dimensiones del espacio disponible para ubicar los depósitos GNL son:

Ancho: 1450 mm (longitudinal a la locomotora)

Alto: 900 mm

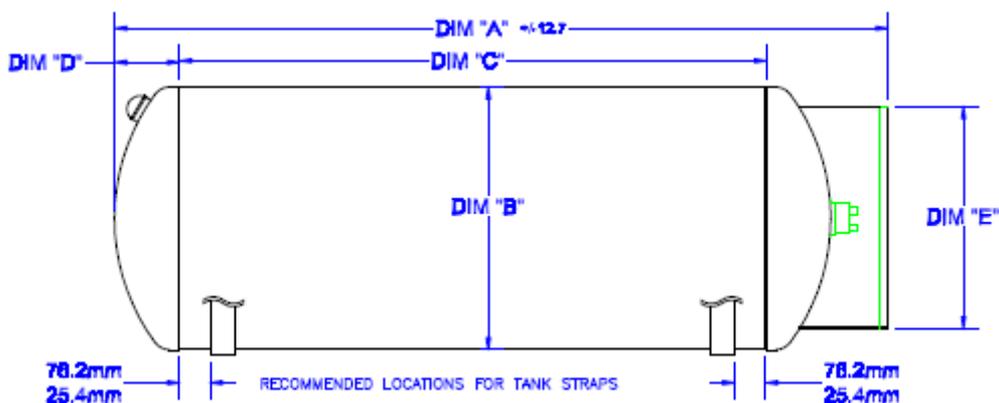
Largo: 3100 mm (anchura total de la locomotora)

Para el suministro de los depósitos de GNL, se ha seleccionado la empresa CHART Inc., referencia mundial del sector. El depósito a utilizar debe estar homologado según el Reglamento ECE R110 relativo a cilindros para el almacenaje de gas natural.

Las dimensiones de los depósitos del catálogo de CHART figuran en el cuadro siguiente:

SEMI-FINAL PART NUMBER	DESCRIPTION	DIM "A"	DIM "B"	DIM "C"	DIM "D"	DIM "E"	LIQUID CAPACITY		ESTIMATED TARE WT
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	GROSS (L)	NET (L)	(KG)
20786015	HLNG 158 BONUS	2291	660	1829	162	609,6	598	538	304
20786017	HLNG 150 LITE	2196	660	1734	162	609,6	564	511	300
20786019	HLNG 127 BONUS	1916	660	1454	162	609,6	494	435	254
20786022	HLNG 119 LITE	1821	660	1359	162	609,6	450	410	252
20768392	HLNG 150	2291	660	1829	162	609,6	564	511	297
20768389	HLNG 119	1916	660	1454	162	609,6	450	410	247
20820718	HLNG 95	1586	660	1124	162	609,6	359	319	214
20822231	HLNG 52	1027	660	565	162	609,6	196	170	164
20822387	HLNG 65	1109	706	606	178	609,6	246	217	148
20822229	HLNG 72	1281	660	819	162	609,6	272	246	193
20822381	HLNG 85	1287	706	784	178	609,6	322	289	197
20822383	HLNG 97	1414	706	911	178	609,6	367	332	213
20822230	HLNG 100	1638	660	1176	162	609,6	378	333	219
20822227	HLNG 103	1681	660	1219	162	609,6	389	350	222
20822226	HLNG 112	1815	660	1353	162	609,6	425	383	233
20822228	HLNG 140	2189	660	1727	162	609,6	529	473	283
20822225	HLNG 144	1922	706	1419	178	609,6	544	490	340
20822385	HLNG 171	2227	706	1724	178	609,6	647	582	375
20850602	HLNG 73	1186	706	683	178	609,6	287	253	211
20929729	HLNG 50	1372	559	857	137	546,1	190	171	211
20929724	HLNG 61	1575	559	1060	137	546,1	231	208	217
20999935	HLNG 86	2083	559	1568	137	546,1	325	293	237
20999945	HLNG 85	1829	609,6	1314	137	546,1	337	303	227

**Tabla 25 Depósitos GNL – CHART HLNG R110**



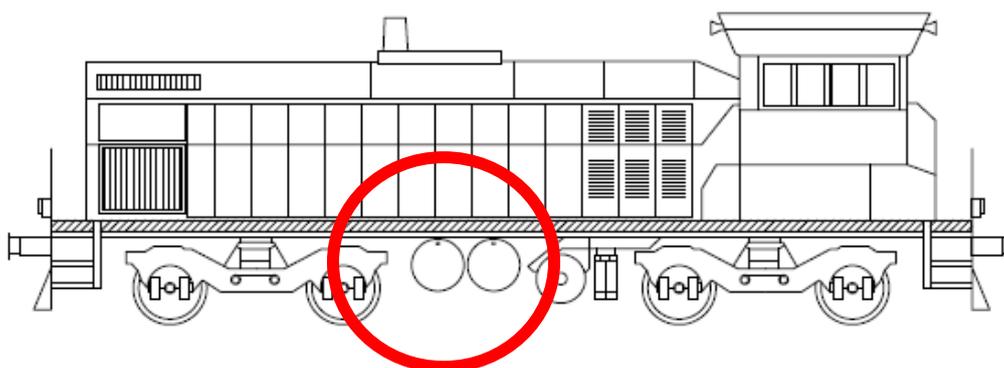
**Figura 84. Depósitos de GNL de CHART, Serie HNLG R110**

Con el espacio disponible, y las dimensiones de los depósitos del catálogo, se ha seleccionado la utilización del depósito HLNG 171.

Se instalarán dos depósitos HLNG 171 de forma transversal al eje de la locomotora. Se instalarán de forma que la boca de llenado sea única y común a los dos depósitos.

- HLNG 171 (A x B): 2227 mm x 706 mm

La capacidad neta unitaria de cada depósito es de 582 litros de GNL. La capacidad total neta será de 1164 litros de GNL. Esta capacidad es muy inferior a la capacidad original de gasóleo, lo que afectará a la autonomía de la locomotora.



**Figura 85. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 171**

#### 10.3.4.1.2 Alternativas para aumentar la capacidad de los depósitos de GNL

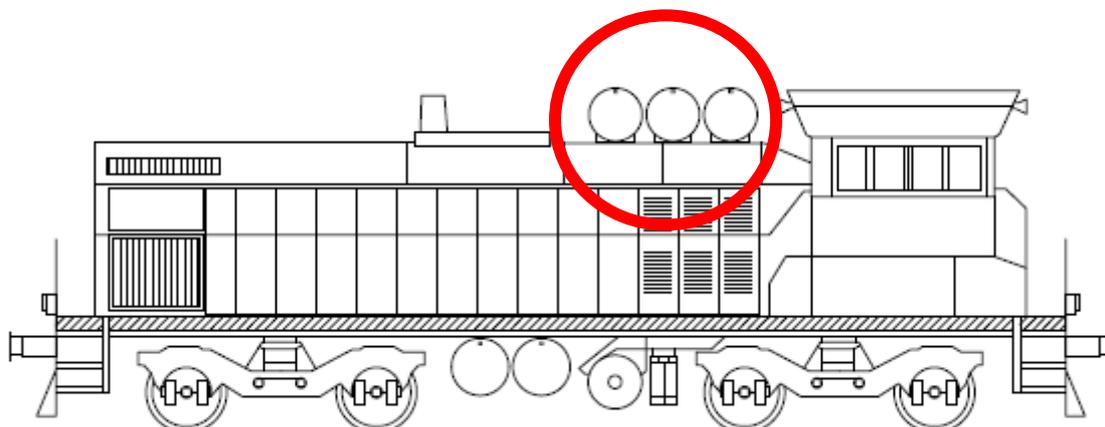
En el caso de que se considere insuficiente la autonomía conseguida con la instalación de dos depósitos HLNG 171 se propone complementar estos depósitos con la instalación en la cubierta del motor de una serie de depósitos adicionales.

##### 10.3.4.1.2.1 Instalación transversal

Se instalarán tres depósitos Chart HLNG 100 de forma transversal al eje de la locomotora. La boca de llenado será única y común a todos los depósitos.

- HLNG 100 (A x B): 1638 mm x 660 mm

La capacidad neta unitaria de cada depósito es de 333 litros de GNL. La capacidad total neta será de 999 litros de GNL



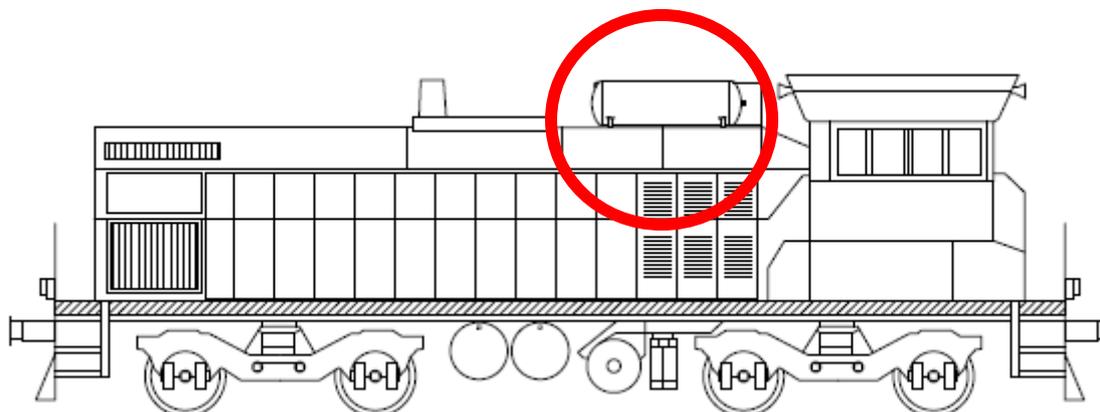
**Figura 86. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 100**

#### 10.3.4.1.2.2 Instalación longitudinal

Se instalarán tres depósitos Chart HLNG 86 de forma longitudinal al eje de la locomotora. La boca de llenado será única y común a todos los depósitos.

- HLNG 86 (A x B): 2083 mm x 559 mm

La capacidad neta unitaria de cada depósito es de 293 litros de GNL. La capacidad total neta será de 879 litros de GNL.



**Figura 87. Ubicación de los depósitos de GNL, Chart HNLG 86**

Durante la fase de proyecto detallado, se podría estudiar la utilización de una cubierta aislante sobre los depósitos que minimice la radiación solar sobre los mismos y ayude a integrar visualmente los depósitos en el conjunto de la locomotora.

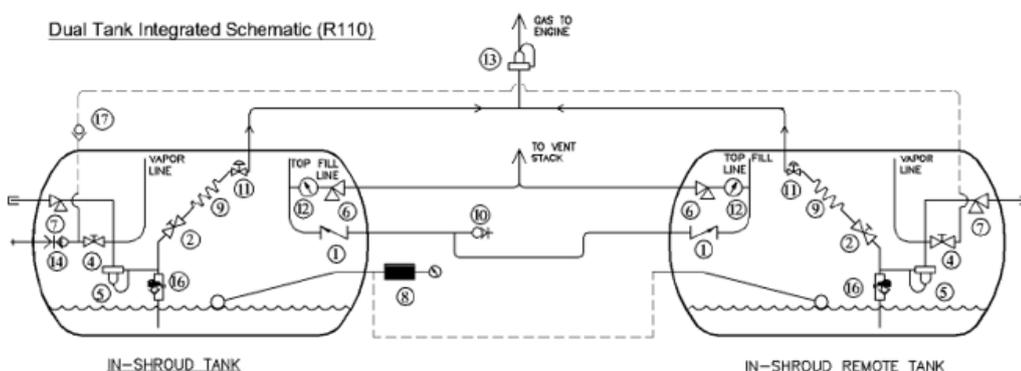
La instalación de los depósitos deberá someterse a un análisis de riesgos que garantice la seguridad de todo el sistema.

### 10.3.5 Integración de los depósitos

La necesidad de aumentar la capacidad de combustible GNL en la locomotora, para aproximarse en autonomía a la conseguida con el funcionamiento con gasóleo, obliga a la instalación de varios depósitos. La posible ubicación de los depósitos se detalla en el apartado anterior 10.3.4.

En todos los casos los depósitos se integrarán de forma que exista una única boca de llenado de GNL y una única salida de combustible hacia el motor. El conducto de venteo también estará unificado.

La integración de los depósitos se realizará de acuerdo la normativa ECE R110 en la que se indica que los tubos de combustible hacia el motor deben juntarse antes del regulador de sobrepresión. Para garantizar un correcto funcionamiento, la sección de los tubos debe ser la misma que se utiliza para el caso de un único depósito. Como la sección de los tubos de todos los depósitos es la misma, la presión en todos los depósitos también lo será, excepto inmediatamente después del llenado.



**Figura 88 Esquema de integración de depósitos GNL**

## 10.4. Identificación fabricantes y proveedores interesados

Con base a los estudios de mercado realizados, se ha identificado y relacionado los fabricantes y proveedores que pudieran estar interesados en la realización del proyecto.

### 10.4.1 Conversión del motor

Como se indica anteriormente la conversión del motor diésel GM 8-645-E a gas natural se realizará utilizando un kit de conversión a gas natural desarrollado por la empresa Energy Conversions Incorporated – ECI.



**ENERGY CONVERSIONS INC.**  
alternative fuel systems for high output engines

**Material:** Spark Ignited Pre-chamber Conversion System – SIP

**Contacto:**

Scott Jensen

Chief Designer and Project Coordinator

[scott@energyconversions.com](mailto:scott@energyconversions.com)

<b>ENERGY</b>	<b>CONVERSIONS,</b>	<b>INC.</b>	
6411	Pacific	Highway	East
Tacoma,	WA	98424,	USA
Telephone:	(253)	922-6670	
Fax: (253) 922-2258			

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

## 10.4.2 Depósito de combustible

Los depósitos de GNL los suministrará la empresa CHART Inc. a través de su representante en España. La fabricación de los depósitos criogénicos se realiza en la filial situada en la República Checa.



**Material:** Depósitos GNL – HLNG R110

**Contacto:**

Jaime Alamo

Project Manager – LNG Vehicle Fuel Systems

[Jaime.Alamo@chartindustries.com](mailto:Jaime.Alamo@chartindustries.com)

Mobile: +34 659 50 7984

▪ <b>Chart</b>	<b>Ferox,</b>	<b>a.s.</b>
Ustecka		30
405	30	Decin
Czech		Republic
Telephone: +420	412	50 7111
Fax: +420 412 510 200		

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

### 10.4.3 Empresa integradora

La empresa integradora podría ser ARMF.



**Material:** Integración del proyecto

**Contacto:**

Manuel Ramos

Director

[mramos@armf.net](mailto:mramos@armf.net)

**ARMF Mantenimiento y Proyectos Ferroviarios, SL**

Talleres: Antiguos Talleres Renfe

Polígono Industrial "El Segre"

25191 LLEIDA (SPAIN)

+34973216441

<http://www.armf.net/>

#### 10.4.4 Acreditación de la locomotora

Los trabajos de acreditación y puesta en servicio de la locomotora modificada los realizaría la empresa Bureau Veritas.



**Actividad:** Acreditación de la locomotora modificada

**Contacto:**

Miguel Ángel BERZOSA LOSADA

Responsable del Centro Técnico de Industria  
Industry Technical Center Manager

[miguel-angel.berzosa@es.bureauveritas.com](mailto:miguel-angel.berzosa@es.bureauveritas.com)

**BUREAU VERITAS**

C/Valportillo Primera 22-24  
28108 Alcobendas (MADRID)

T. 912702256 Mov. +34647331614)

<http://www.bureauveritas.com>

## 10.5. Análisis de la transformación y su afectación en peso y centro de gravedad

En los apartados anteriores, se ha definido que el proyecto se centrará en:

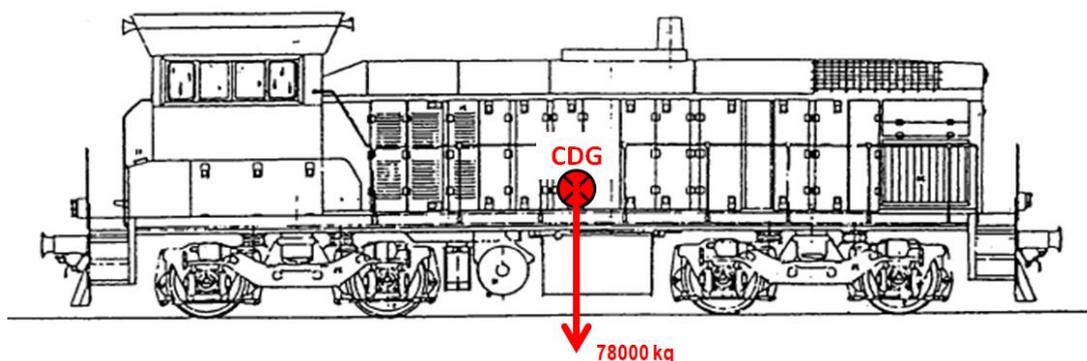
- Adaptar a GNL la locomotora tipo Adif 310.
- Transformar el motor GM de dos tiempos modelo GM-8-645-E, a combustible GNL, mediante la sustitución de piezas originales por otras proporcionadas por la firma especialista ECI (Energy Conversions Inc) de USA.
- Aumentar la capacidad de refrigeración del radiador de agua-motor, por el Integrador que finalmente se decida.
- Sustituir el depósito de gasóleo actual, por un conjunto de depósitos criogénicos suministrados por la firma Chart Inc, también de USA con implantación global.

Una vez determinadas la locomotora a modificar, las características de la transformación del motor y la sustitución del depósito de gasóleo por criogénicos de GNL, se ha llevado a cabo el análisis de su impacto en el peso total de la locomotora así como la modificación del centro de gravedad (CDG) que la modificación comporta.

### 10.5.1 Situación actual, antes de la transformación

Para realizar el estudio del impacto de la transformación en el peso y en la situación del CDG, deben conocerse los valores de la locomotora actual, para su comparación con los del nuevo diseño.

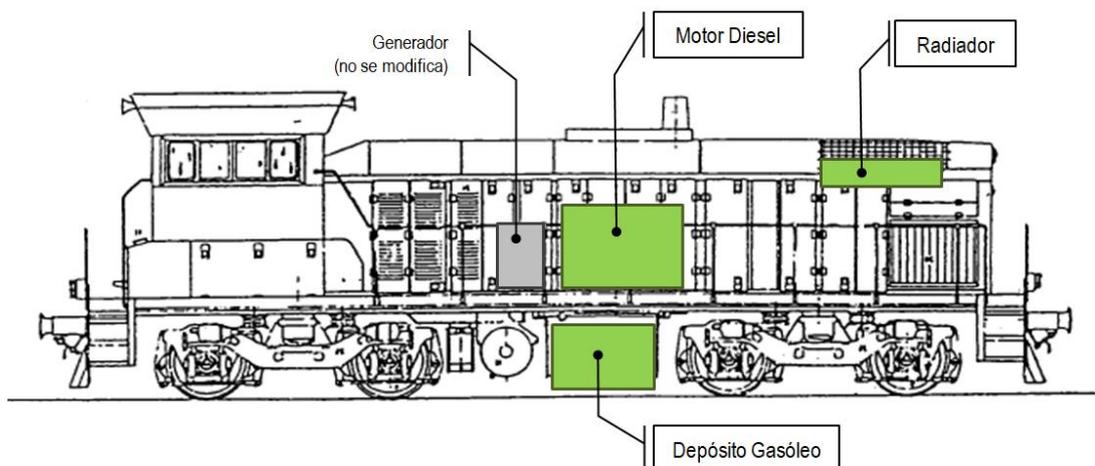
Se conoce únicamente el valor del peso de la Adif 310, de acuerdo con el catálogo, 78000 kg, y no se dispone de un plano de la locomotora con las coordenadas del CDG. En consecuencia, los cálculos a realizar deberán considerarse aproximados.



## 10.5.2 Impacto de las modificaciones en la distribución de masas y posición del CDG

Como se ha comentado antes, se realizará una aproximación de los cambios de peso y de la posición del CDG ocasionados por la transformación de la locomotora 310 a GNL.

Los elementos a transformar se expresan gráficamente en la siguiente figura:



**Figura 89 Elementos a modificar**

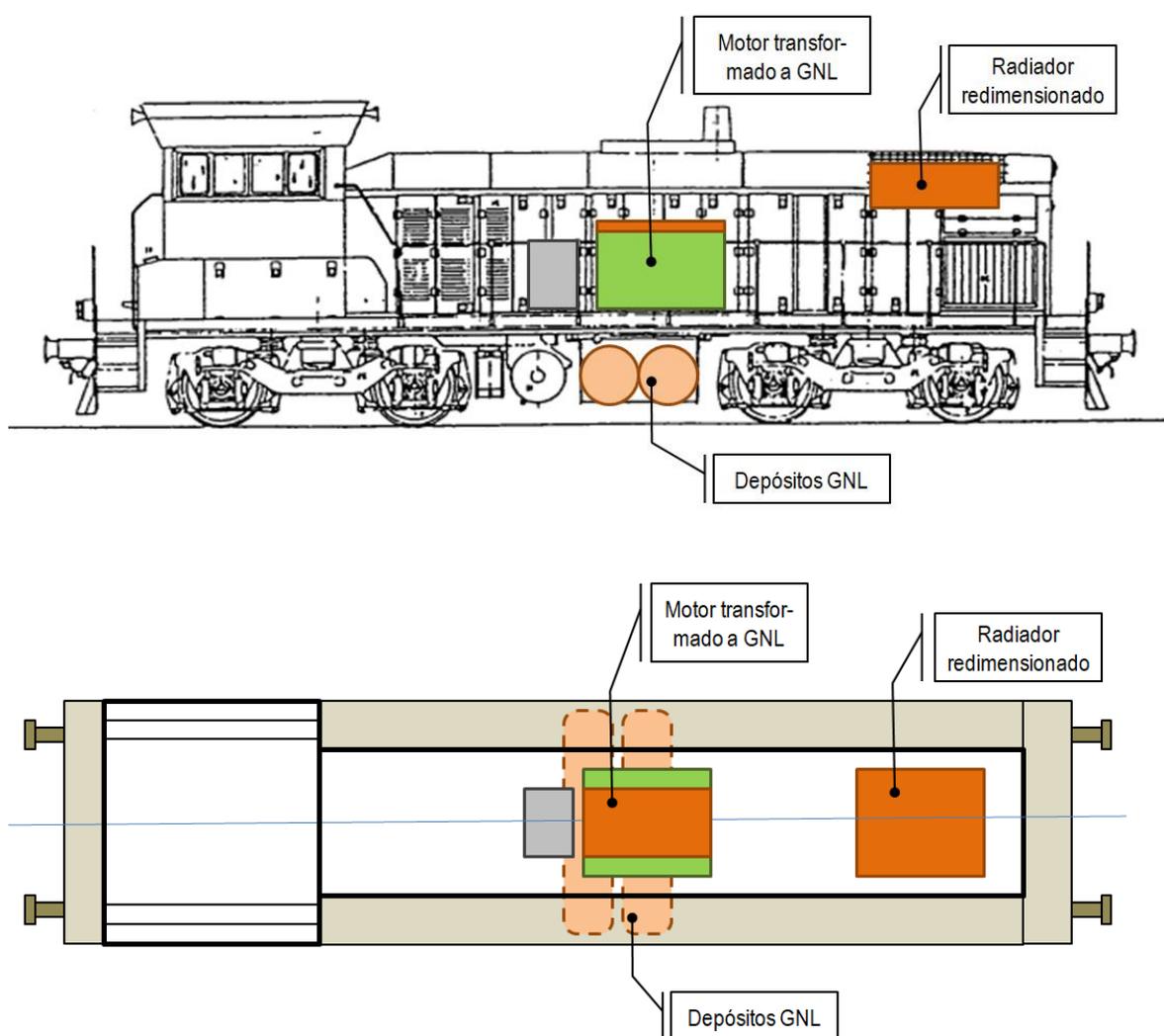
A continuación, se exponen las variaciones de peso por las modificaciones:

En la parte superior del motor diésel se instalará un conjunto de piezas, unas que sustituirán a las originales y otras que se añadirán, cuyo sobrepeso en relación al estado original se estima en .....	+ 60 kg
El depósito de gasóleo se sustituirá por dos depósitos criogénicos para GNL, cuya diferencia en peso con relación al original, ambos llenos de combustible, se estima en .....	- 1080 kg
El radiador de agua de refrigeración del motor se sustituirá por otro mayor o se suplementará con más elementos, cuyo sobrepeso respecto el original se estima en .....	+ 80 kg
<b>Total variación de peso (reducción):</b>	<b>- 1060 kg</b>

**Tabla 26 Variaciones de peso por la modificaciones**

Esta reducción en peso de la locomotora, representa un **1,36%** del peso original, que era de 78000 kg según catálogo. Por ello, se considera que es un factor irrelevante y no tendrá influencia en el funcionamiento de la locomotora transformada a GNL.

Por otro lado, todas las modificaciones a realizar son simétricas en relación al plano central, vertical y longitudinal, por lo que no existirá variación transversal de la posición del CDG. El nuevo CDG seguirá estando en ese mismo plano de simetría, de lo que se deduce que tampoco influirá en la dinámica de la locomotora transformada.



**Figura 90 Planos de la ubicación de los elementos modificados**

En cuanto a la posición del CDG, con las hipótesis de variaciones en peso antes mencionadas y tras cálculos geométricos de la nueva distribución de masas, se

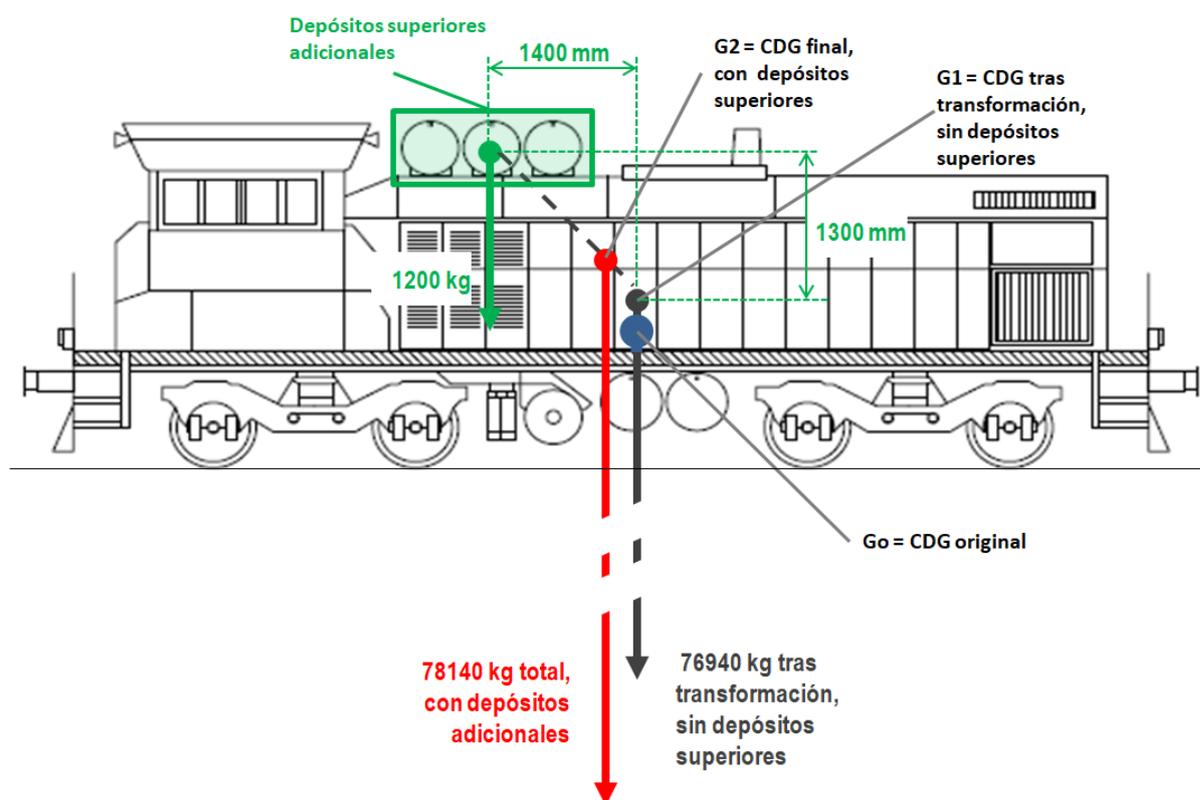
desprende que el nuevo CDG estará en una posición de **3,2 cm más elevada** que su posición original, lo que tampoco influirá en la dinámica de la locomotora por ser una cantidad irrelevante (0,77% de la altura total).

Los cálculos realizados deberán confirmarse con los pesos reales de las partes modificadas y con los datos reales de la locomotora, que actualmente se desconocen.

En el caso que, por causas de logística y autonomía, finalmente se decidiera instalar depósitos adicionales de GNL sobre la capota de la locomotora, se producirá una segunda variación de su CDG.

Dado que en la fecha de este Informe se desconocen las coordenadas exactas y reales del CDG original de la locomotora, el objetivo del cálculo a efectuar se limitará a determinar el desplazamiento del CDG y no sus nuevas coordenadas.

En la figura siguiente están representados los valores considerados y por lo dicho antes, las distancias en color verde deben considerarse como aproximadas:

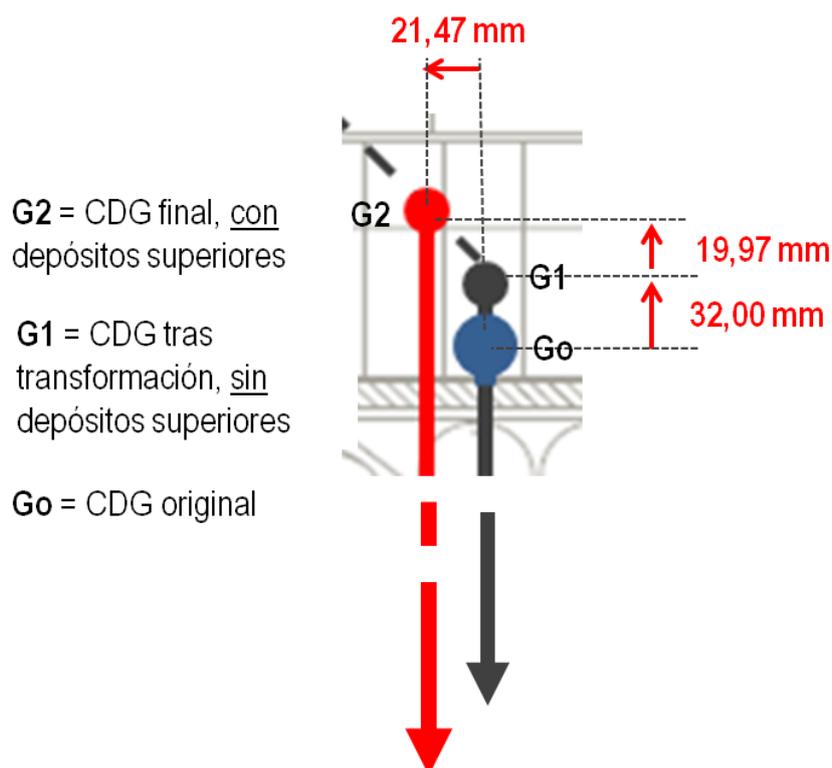


**Figura 91 Representación gráfica de los valores considerados añadiendo los depósitos superiores adicionales**

Una vez realizados los cálculos y consiguientes operaciones trigonométricas, se manifiesta que el nuevo CDG con depósitos adicionales (G2), en relación al

anteriormente calculado (G1), se desplaza hacia atrás una distancia de **21,47 mm** y hacia arriba, **19,97 mm**.

Como resumen, en la figura siguiente, se exponen las variaciones del CDG tras la transformación a GNL (**G1**), y con la adición de depósitos suplementarios sobre la capota de la locomotora (**G2**):



**Figura 92 Variaciones del CDG tras la transformación a GNL (G1) y con la adición de los depósitos adicionales superiores (G2)**

Como conclusión de las modificaciones, el desplazamiento total del CDG es:

- Hacia atrás: 21,47 mm
- Hacia arriba: 51,97 mm

Este desplazamiento total se considera que **no influye en el funcionamiento ni en la dinámica** de la locomotora.

## 10.6. Redacción de planes

### 10.6.1 Plan de mantenimiento y operatividad

La locomotora modelo **Adif 310**, dispone de un Plan de Mantenimiento y de Operatividad según su condición actual con motor diésel, que está desarrollado en el documento MANUAL DESCRIPTIVO DEL VEHICULO cuya portada, prefacio e índice son los siguientes:



El objetivo es definir el contenido de un **ANEXO** (ver Anexo 1) al mencionado Manual Descriptivo, que deberá redactarse tras la transformación de la locomotora a GNL, y en el que se incluirán las nuevas particularidades del motor EMD transformado, y en especial del nuevo sistema de combustible (depósitos, circuito y control del GNL).

Está previsto, según se explica en otros apartados, que el motor EMD 8-645-E de la locomotora 310 sea transformado a GNL, utilizando piezas y tecnologías procedentes de la firma **ECI (Energy Conversions Inc)** de USA, que tiene probadas y exitosas referencias en la realización de proyectos similares. Por tanto, el nuevo ANEXO al Plan de Mantenimiento y de Operatividad se basará en la experiencia y la documentación que se reciba de ECI, y de los datos que proporcione el **Integrador** que finalmente realice la transformación.

Se adjunta como anexo (ANEXO 1) una propuesta del Plan de Mantenimiento del motor convertido a gas natural.

#### **10.6.1.1 Estructura del ANEXO al Plan de Mantenimiento y Operatividad**

Se propone que el ANEXO al Plan de Mantenimiento y Operatividad se estructure según los capítulos que se detallan a continuación:

- 0) Introducción e Índice
- 1) Precauciones durante la Manipulación del GNL
- 2) Descripción general de la Transformación
- 3) Motor Térmico (partes mecánicas)
- 4) Sistema de GNL
- 5) Control del Motor (ECU)
- 6) Sistema Hidráulico
- 7) Sistema de Refrigeración
- 8) Instrumentación
- 9) Localización de Averías
- 10) Datos de Referencia para Mantenimiento
- 11) Listado de Componentes

A continuación, se desarrollarán las líneas generales del contenido de los capítulos más significativos, teniendo en cuenta que la redacción final y definitiva deberá ser editada después de realizada la transformación, con los datos concretos de los diferentes proveedores que hayan proporcionado componentes, y del Integrador que haya ejecutado la transformación.

Con el objetivo de dar continuidad y facilitar la comprensión de ese nuevo ANEXO, su redactado y edición deberán seguir el estilo del documento original, *MANUAL DESCRIPTIVO DEL VEHICULO - Locomotora Diesel Eléctrica de Maniobras y de Línea - Modelo SW-1001AC - Serie 310*, especialmente en lo que concierne a los capítulos 10) *Localización de Averías*, y 11) *Datos de Referencia para Mantenimiento*.

En el ANEXO al Manual, se incluirán todos los dibujos, fotografías o esquemas que sean necesarios para facilitar el montaje y desmontaje de los diferentes elementos que componen la transformación de la locomotora

En ese ANEXO y en todos los manuales y textos descriptivos de la locomotora transformada, deberá ponerse especial cuidado en las **Condiciones de Seguridad** que deberán tenerse en cuenta en la manipulación de GNL. El gas natural es tan seguro como cualquier combustible, incluida la gasolina y el gasóleo, pero como cualquier otro combustible, tiene propiedades que requieren precauciones especiales para su manejo.

Para la seguridad de personas y bienes, todo el personal involucrado en el mantenimiento y en la operación de la locomotora transformada y de su planta de llenado, deberán disponer y entender toda la información suficiente y necesaria sobre el GNL, y cumplir con todas las normas establecidas para su manipulación.

En consecuencia, tras la *Introducción e Índice* del nuevo ANEXO se incluirá el capítulo 1) *Precauciones durante la Manipulación del GNL*, que describirá las propiedades del gas natural licuado y las precauciones básicas a tener en cuenta.

Asimismo, a lo largo del texto y en todos los capítulos que su temática lo aconseje, deberán incluirse **señales de advertencia y recordatorios** sobre los peligros de una manipulación defectuosa.

A título de ejemplo, en el apartado siguiente se presentan unos textos que pueden servir de guía para el mencionado capítulo 1) y para la Introducción de cualquier Manual o Curso de Formación, que complementan y no sustituyen a las normas oficiales obligatorias.



*Advertencia de gas inflamable*



*Advertencia general de peligro*



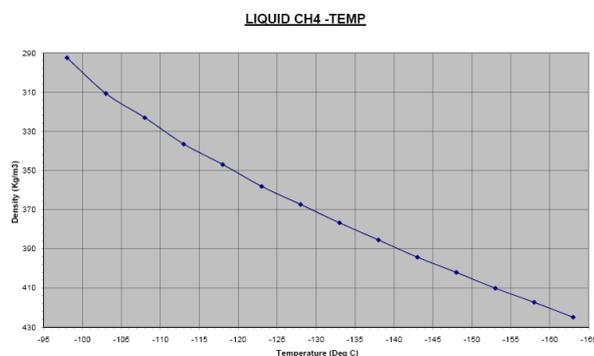
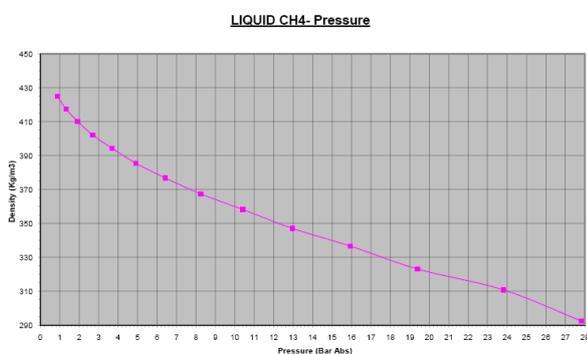
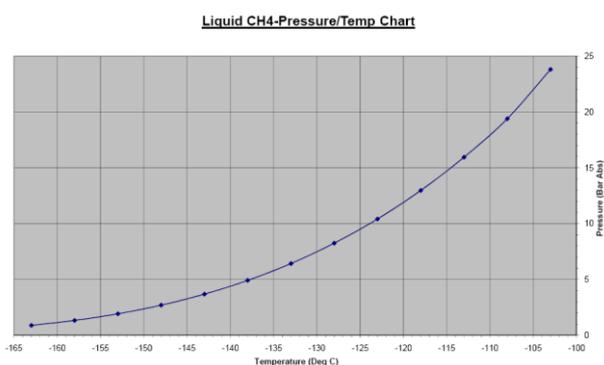
*Advertencia de baja temperatura*

#### 10.6.1.1.1 Precauciones durante la Manipulación del GNL

El gas natural consiste principalmente (> 90%) en metano, que es un gas incoloro, inodoro y no tóxico y que, para su utilización como combustible, se almacena y transporta en fase líquida. Para ello, el metano debe enfriarse por debajo de su punto de ebullición, que es de **-161 °C**, y el resultado se conoce como "GNL en estado criogénico".

El GNL se cargará en la locomotora en estado criogénico y se almacenará en depósitos convenientemente aislados. Antes de su admisión al motor, se vaporizará o reconvertirá a forma gaseosa mediante la aportación de calor, para ser quemado en el cilindro del motor. El GNL nunca debe llegar al motor en estado líquido.

En caso de cualquier fuga en los circuitos de GNL, debe tenerse en cuenta que el "olor a gas" familiar no es del gas en sí mismo, sino de un aditivo que se añade para seguridad. Si el motor convertido usara gas de red, es probable que se haya agregado un odorífero y se podrían oler las fugas de gas. Sin embargo, con combustible GNL, probablemente no podrán olerse las fugas de gas pues no estará odorizado. Esto se debe a que, aunque puede agregarse odorante al GNL, ello es difícil en condiciones de extremas bajas temperaturas. Por tanto, no debe confiarse en el olor para detectar fugas de GNL. Deben usarse los procedimientos que se describirán en el Manual para verificar la integridad de las conexiones y juntas de los circuitos, preferiblemente un **detector electrónico portátil** de metano para



verificar fugas.

Las propiedades químicas de los gases criogénicos como el GNL en estado líquido, son prácticamente las mismas que en estado natural *caliente*. Pero deberá tenerse muy presente que en su estado criogénico hay la propiedad física adicional de **frío extremo** o *criogenia*. Por lo tanto, es muy importante considerar la extremada baja temperatura cuando se maneje GNL.

No debe tocarse nunca el GNL, vapor de gas natural recién hervido o una tubería con escarcha. Están extremadamente fríos y causan congelación inmediata. En caso de contacto accidental con GNL, no debe frotarse la quemadura. Debe remojarse el área afectada en agua tibia (no caliente) y buscar atención médica inmediatamente.

El GNL no se quemará a menos que su concentración esté entre el 5 y 15 vol %. El gas natural como el helio, se eleva en el aire. Estos dos hechos significan que, siempre que haya una ventilación adecuada en las proximidades del motor convertido y del suministro de GNL, existe poco peligro de incendio. Sin embargo, puede surgir un problema grave cuando el GNL en estado gaseoso se acumula en un área cerrada sin ventilación. En ese caso, el gas natural acumulado es muy peligroso. Por tanto, siempre deberá mantenerse una **ventilación adecuada** en las áreas del motor convertido y del suministro de GNL. Deberán revisarse con frecuencia los ventiladores y filtros de ventilación en el habitáculo del motor.

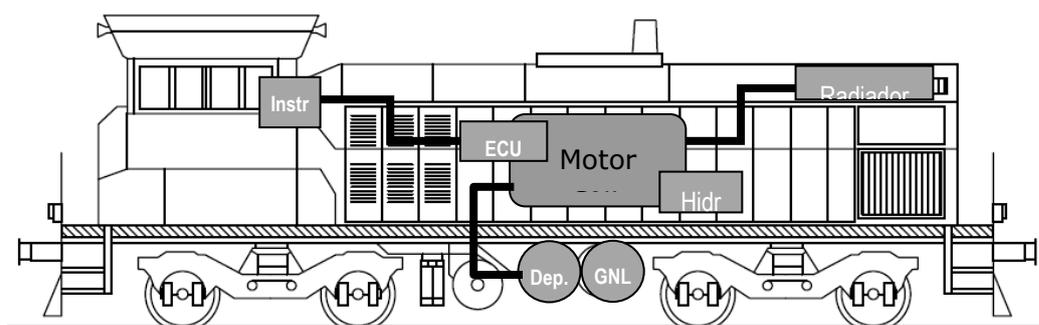
Antes de trabajar sobre el motor de GNL, deberá cerrarse la válvula manual de paso general, ubicada cerca del conjunto del filtro de combustible. Después del apagado del motor, el gas natural podría permanecer bajo presión en el circuito de combustible. Las operaciones de mantenimiento en ese circuito podrían permitir que se libere el gas atrapado y pase a áreas mal ventiladas cercanas al motor. Para evitar este problema, el sistema dispone de una **válvula de ventilación de gas**, ubicada cerca del conjunto del filtro de suministro de gas. Es muy importante, por las razones expuestas anteriormente que el gas atrapado se libere por la válvula de ventilación antes de comenzar el mantenimiento del suministro de gas. Deberá incluirse un recordatorio en el texto del manual siempre que se requiera la ventilación de gas.

Además, al igual que cuando se manipula cualquier combustible, antes de empezar a trabajar deberán **eliminarse todas las fuentes posibles de ignición**, incluidos cigarrillos encendidos, soldadores, generadores portátiles, calentadores de queroseno, motores eléctricos o cualquier otra cosa que pudiera generar chispas o llama. Si es necesario soldar para reparar una tubería de gas, siempre deberá purgarse el circuito de GNL con gas no inflamable, antes de comenzar a trabajar.

#### 10.6.1.1.2 Descripción General de la Transformación

En este capítulo se desarrollará una descripción sucinta y general de la transformación realizada sobre la locomotora 310, con suficiente información gráfica para facilitar su comprensión y la identificación de las principales partes incorporadas o modificadas. Se tratará de ofrecer una visión general del conjunto y su principio de funcionamiento. En los capítulos que siguen, se desarrollará con detalle las características de cada uno de los conjuntos siguientes:

- Motor térmico (partes mecánicas)
- Sistema de GNL
- Control del Motor (ECU)
- Sistema Hidráulico
- Sistema de Refrigeración
- Instrumentación

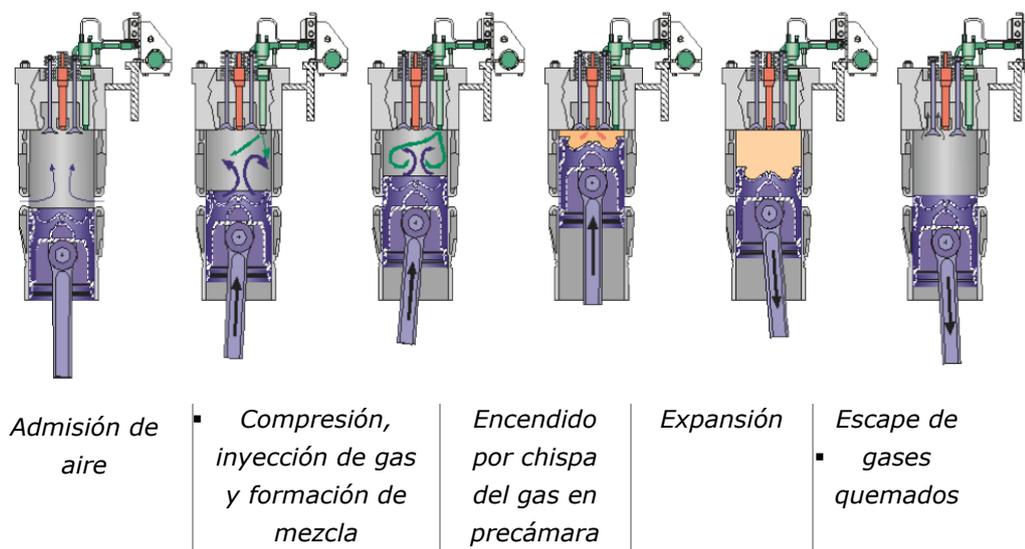


**Figura 93 Disposición de los conjuntos considerados**

#### **Motor Térmico (partes mecánicas)**

Se describirán las partes mecánicas que se hayan modificado o sustituido en el motor EMD 8-645-E para su transformación a GNL. Se resumirán sus respectivas funciones, sus características técnicas y se especificarán las operaciones de mantenimiento necesarias.

Asimismo, se explicará el nuevo ciclo termodinámico que seguirá el motor después de la transformación. Previamente *ciclo Diesel* y después, *ciclo Otto* o de *encendido por chispa*.



**Figura 94 Ciclo del motor transformado a GNL**

Se especificarán las características técnicas, instrucciones de montaje/desmontaje y las posibles averías de las partes mecánicas modificadas o sustituidas del propio motor, que son:

- Pistones
- Culatas
- Inyección de GNL
- Sistema de ignición

Las especificaciones técnicas se acompañarán con suficiente información gráfica aclaratoria, como, por ejemplo:

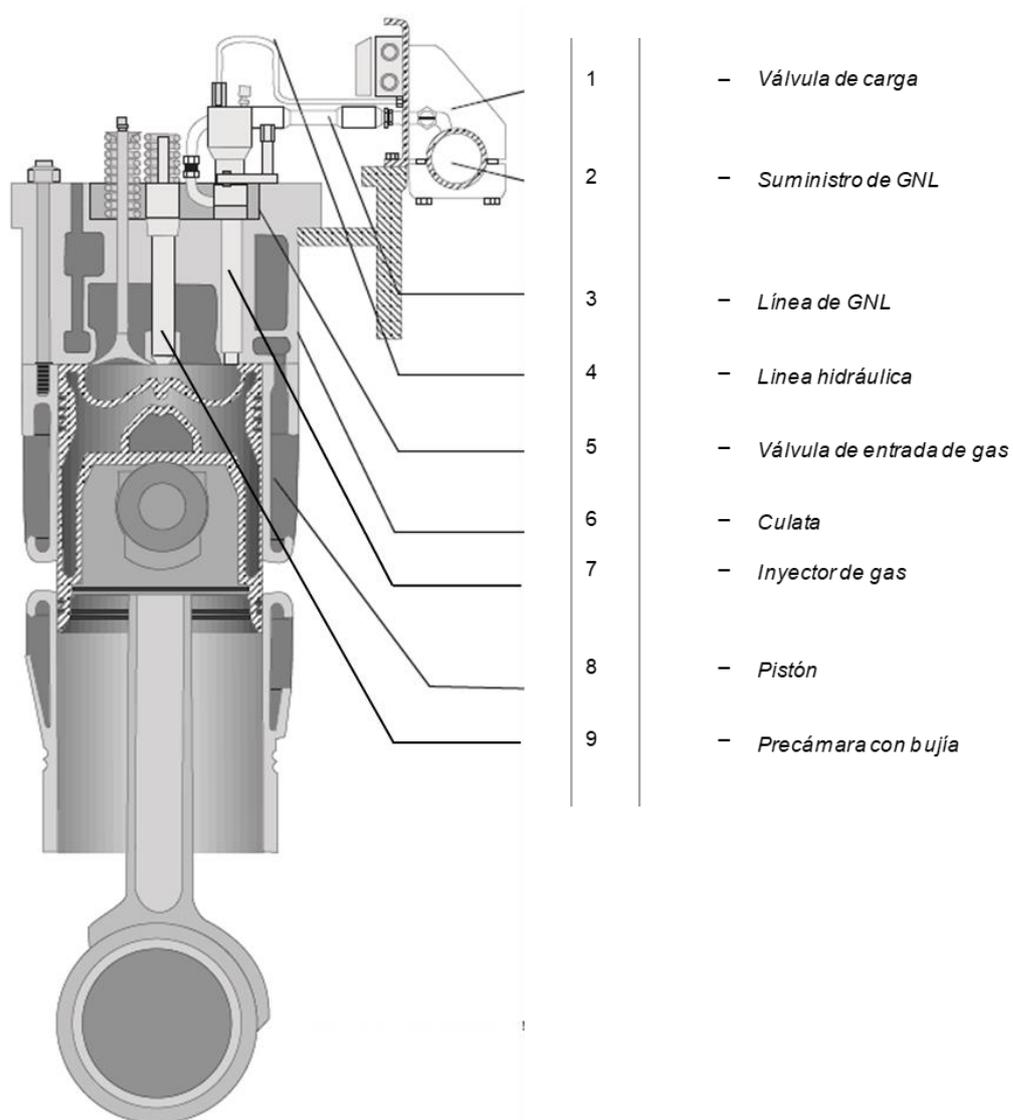
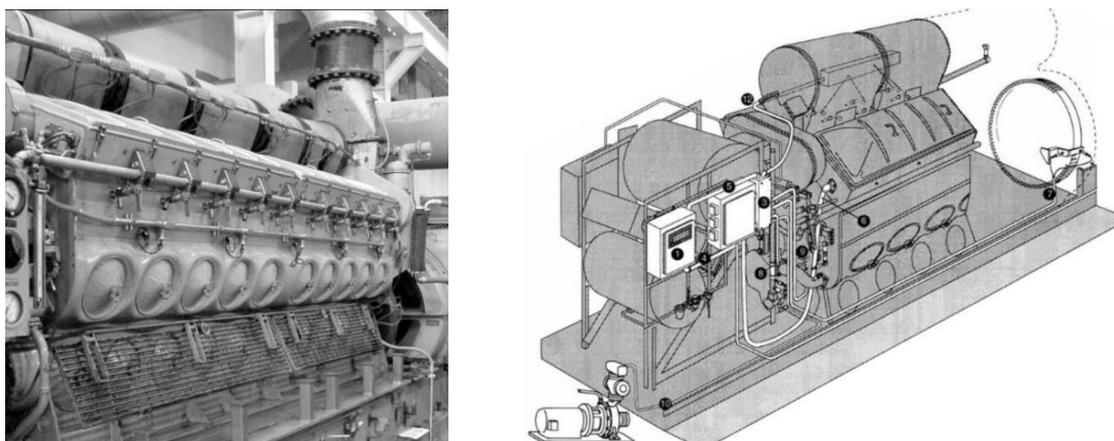


Figura 95 Sección del motor



**Figura 96 Vista lateral del motor modificado a GNL (izquierda) y situación de componentes (derecha)**

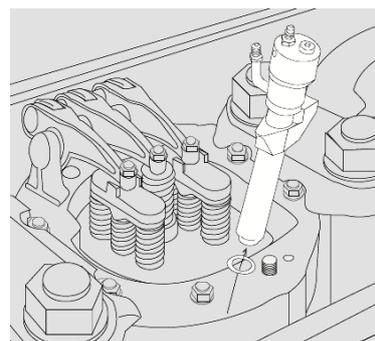
*Pistón modificado  
(menor relación de  
compresión)*



*Conjunto Culata  
modificada*



*Instalación del Inyector  
de GNL*



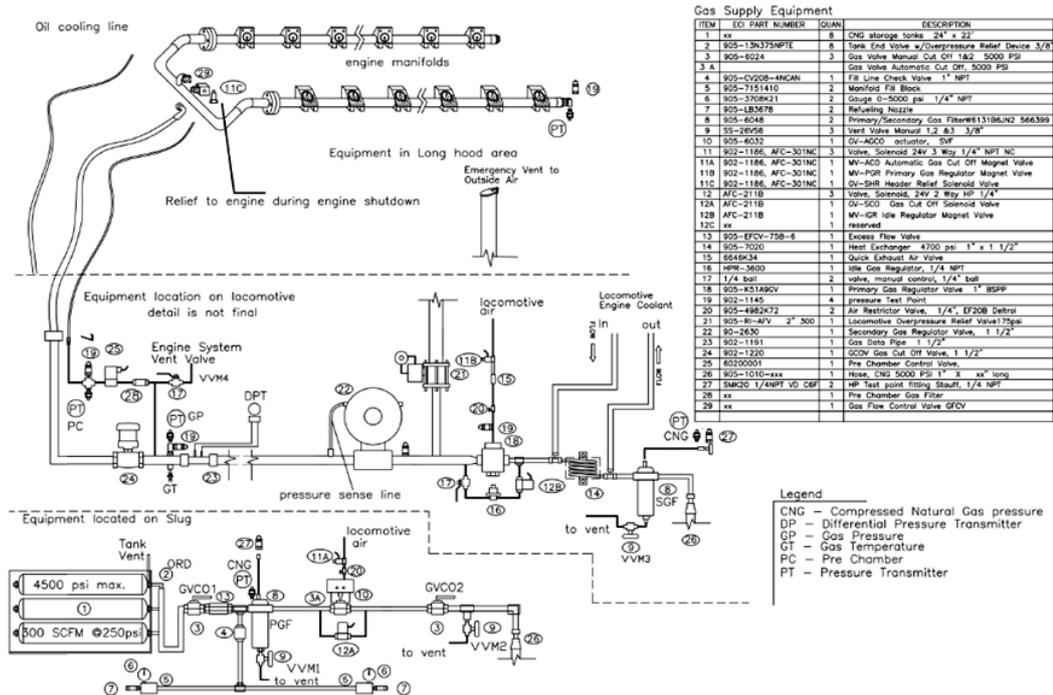
**Figura 97 Detalle de los componentes**

### **Sistema de Combustible GNL**

En este capítulo deberá desarrollarse el esquema del circuito de GNL, desde el llenado de sus depósitos hasta su entrada al motor. Incluirá, por tanto:

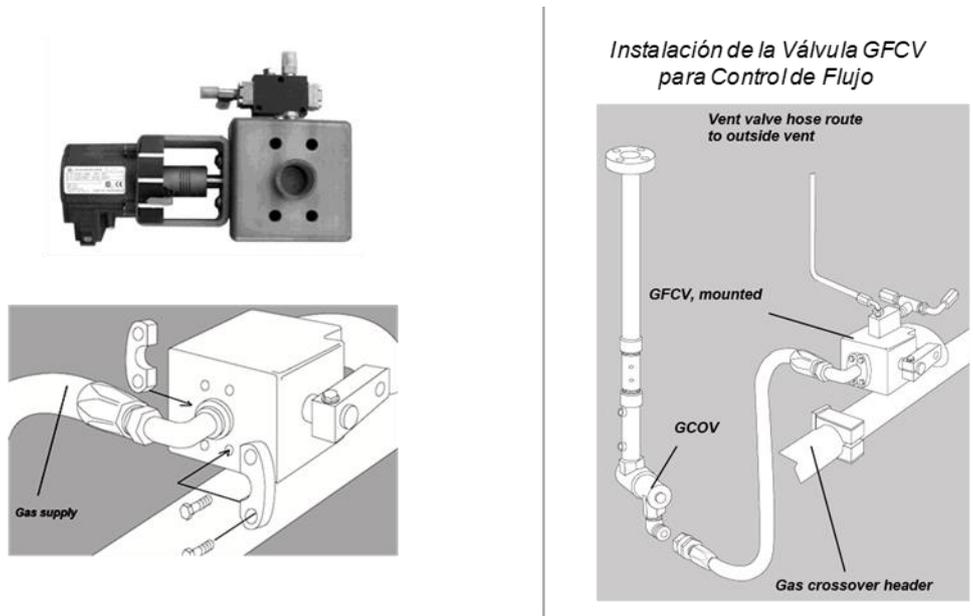
1. Sistema de llenado y almacenaje criogénico de GNL
2. Circuito de GNL hasta el motor, con sus válvulas, sensores, reguladores, etc
3. Distribución de GNL sobre el motor hasta culatas

A título de ejemplo, se inserta a continuación un diagrama de una transformación equivalente:

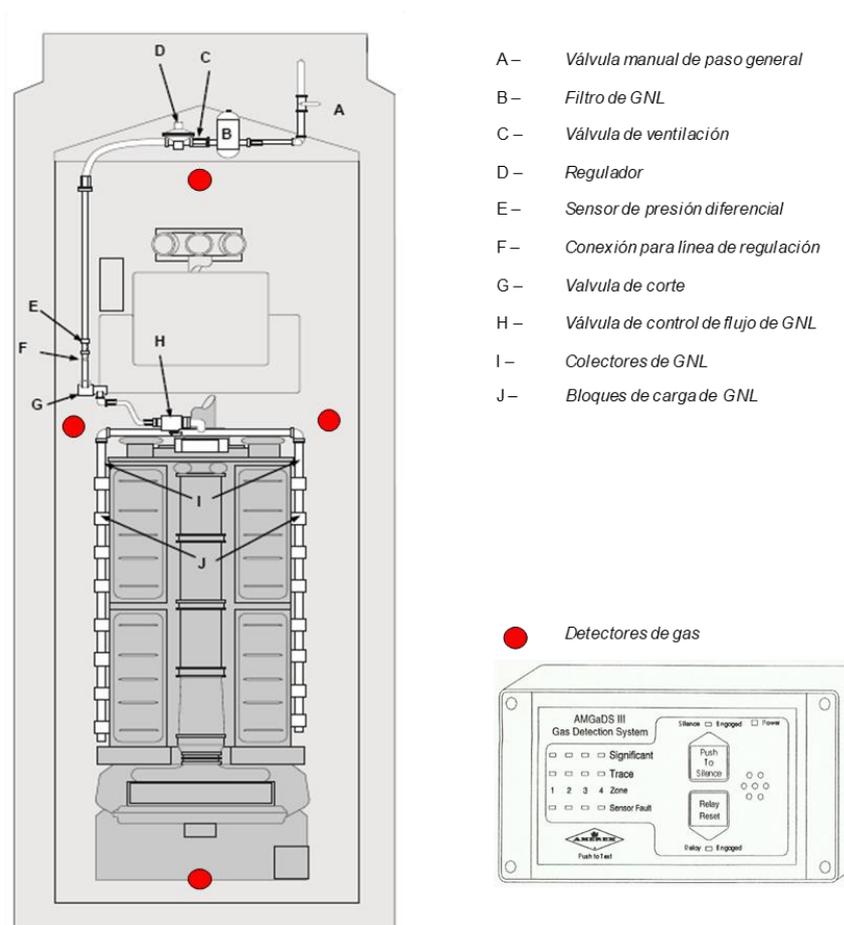


**Figura 98 Diagrama de transformación equivalente**

En cuanto a la identificación de los componentes y sus características, se relacionarán con el mismo estilo y detalle tal como se ha dicho en el apartado anterior para el Motor Térmico:



**Figura 99 Diagrama de la identificación de los componentes**



**Figura 100 Circuito de GNL alrededor del motor**

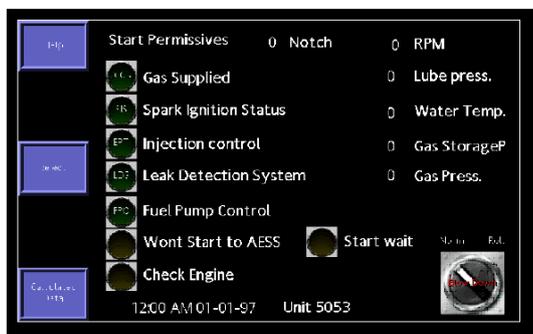
Tiene especial importancia el sistema de **detección de fugas de gas**, que consiste en cuatro sensores estratégicamente ubicados en el compartimento del motor, que disparan un primer nivel de alarma cuando la concentración de gas alcanza el 20% del nivel inferior del inflamabilidad (1% de gas en aire). Si la concentración alcanza el 50% de ese límite (2,5% de gas en aire), el sistema activará automáticamente el cierre de las válvulas principales de paso de GNL.

### **Control del Motor (ECU)**

En este capítulo del ANEXO al Manual, deberán explicarse las características y funciones del nuevo sistema electrónico para el control del motor, o sea, la Unidad de Control del Motor o **ECU** (*Engine Control Unit*) propiamente dicha y sus **unidades periféricas**, que son:

- Display de Control del Motor (EDC)

- Caja de conexiones para señales digitales
- Caja de conexiones para señales analógicas
- Caja de conexiones para salida de señales digitales de control

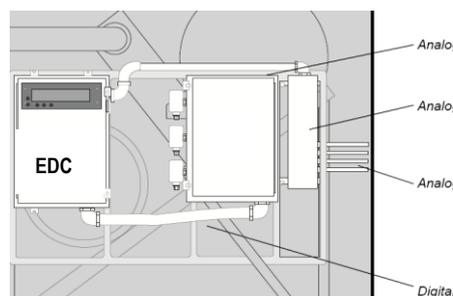
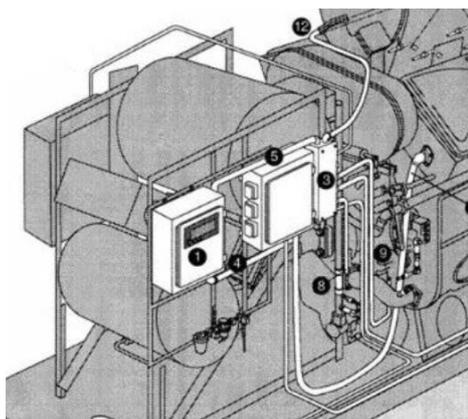


*Pantalla principal de la EDC*



*Pantalla de comprobación de detonación*

La ECU es la herramienta básica para la operación y mantenimiento del sistema motor de la locomotora transformada, para lo que dispone de una **pantalla interactiva (EDC)** para información del estado del sistema y notificaciones de funcionamiento y errores.



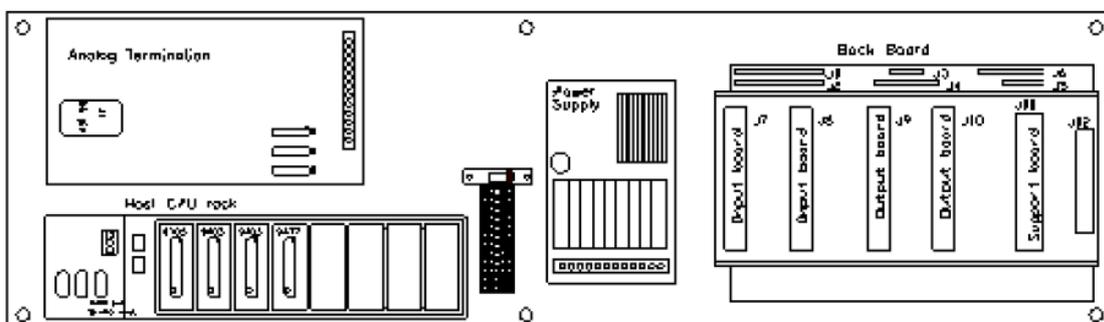
**Figura 101 Pantallas de la EDC y su ubicación y cajas de conexiones**

La ECU es el sistema básico de control para el buen funcionamiento del conjunto, tras la adaptación del motor (antes diésel) al nuevo proceso de combustión de gas

natural, y es una unidad electrónica basada en microprocesador, que monitoriza y controla los principales parámetros del motor, tales como:

- Velocidad de rotación
- Circuito de gas
- Rendimiento del motor
- Parámetros de vigilancia y diagnóstico

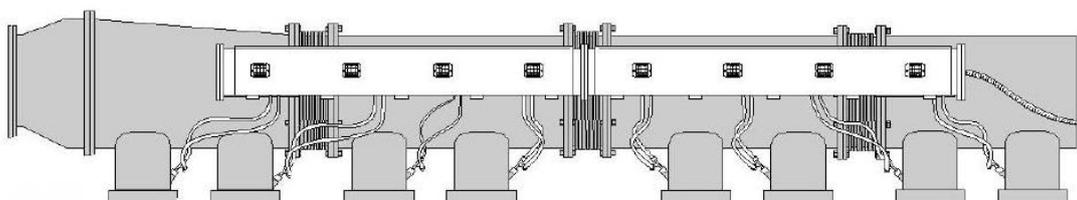
El hardware principal de la ECU se instalará en el lugar de la anterior centralita del motor diésel y consistirá en un chasis normalizado tipo rack para tarjetas electrónicas. En el ANEXO al Manual se especificará la situación de sus componentes, cableado, puntos de prueba, etc



**Figura 102 Vista posterior del chasis de la ECU y ubicación de sus componentes**

Igualmente se listarán todas las señales analógicas y digitales de entrada y salida, así como la descripción de los códigos de notificaciones, especialmente de los errores en el sistema.

Se incluirán los esquemas eléctricos de todo el sistema de medida y control, con dibujos descriptivos de las rutas de cables y ubicación de los sensores y válvulas. Por ejemplo:



**Figura 103 Instalación de termopares para la medida de temperatura en el colector de escape**

### **Sistema Hidráulico**

El sistema de conversión a GNL, utiliza un circuito hidráulico para actuar las válvulas de inyección de gas en los cilindros del motor transformado.

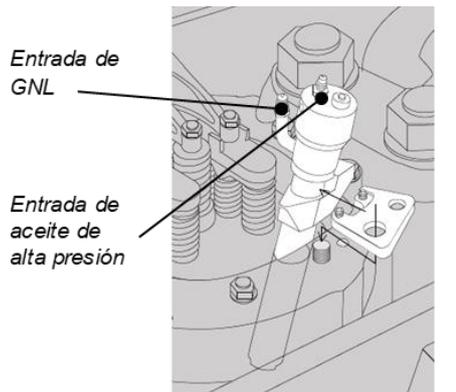
Se especificarán el circuito y las características del nuevo sistema hidráulico de alta presión, con mención de las operaciones necesarias para su correcto funcionamiento y mantenimiento.

El sistema consta de un depósito de aceite, bomba de alta presión, filtros, acumuladores, bloque de válvulas de distribución y conexiones.

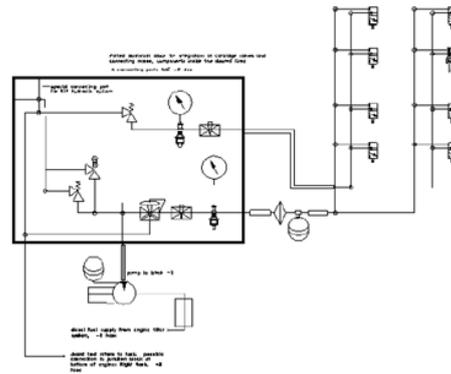
El bloque de distribución incorpora seis válvulas para realizar diferentes operaciones de control, y sensores de presión.

Se hará constar que, en cada una de las inyecciones de gas, se perderá una pequeña cantidad de aceite, por lo que deberá tenerse en cuenta ese consumo en las operaciones de mantenimiento.

Las averías más comunes del sistema hidráulico son la contaminación del aceite y el sobrecalentamiento. Deberá recomendarse un control frecuente del nivel de aceite y del circuito para detectar posibles fugas. Igualmente deberá especificarse la frecuencia del cambio de aceite y filtros.



Válvula de inyección de GNL



Esquema del circuito hidráulico



Bomba de alta presión hidráulica



Bloque de válvulas de distribución

**Figura 104 Esquema del circuito hidráulico y componentes**

## Sistema de Refrigeración

En toda transformación a GNL de un motor diésel, es necesario recalcular las necesidades de enfriamiento del agua de refrigeración del motor, debido a las más altas temperaturas que se producen en la combustión de gas.

Una vez calculada la potencia de refrigeración necesaria, se decidirá si es conveniente cambiar el radiador existente en la locomotora 310 o si es suficiente añadir un elemento adicional al actual. Para ambos casos, el principio de funcionamiento y las operaciones de mantenimiento serán las mismas que para la actual configuración de la locomotora.



**Figura 105 Sistema de refrigeración**

## Instrumentación

Como consecuencia de la transformación a GNL, en los puestos de control de la cabina de mando deberán instalarse una serie de indicadores de las medidas procedentes de los sensores incorporados en los nuevos circuitos, para permitir un control efectivo del conjunto:

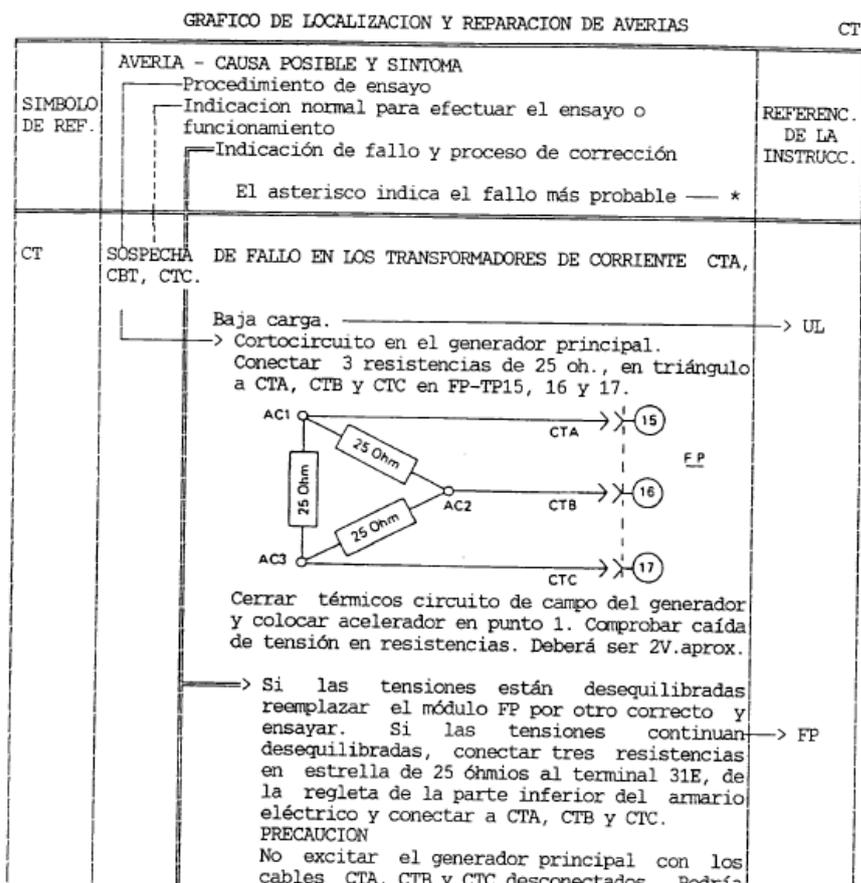
1. Revoluciones del motor
2. Presión del aceite de lubricación del motor (entrada/salida)
3. Temperatura del aceite de lubricación del motor (entrada/salida)
4. Presión del gas a la entrada del conducto de alimentación
5. Presión del gas al final del conducto de alimentación
6. Temperatura del gas
7. Temperatura del aire de admisión en el colector
8. Presión del aire de admisión en el colector
9. Temperaturas del agua de refrigeración (entrada/salida)
10. Temperaturas de gases de combustión en colector de escape
11. Presión del aceite del circuito hidráulico (entrada/salida)

## 12. Temperatura del aceite del circuito hidráulico

Además, se recomienda instalar un repetidor del Display de Control del Motor (ECD), lo que permitirá disponer de mejores datos de cara a mantenimiento, tales como códigos de error y lecturas especiales como la indicación de detonación en cilindros.

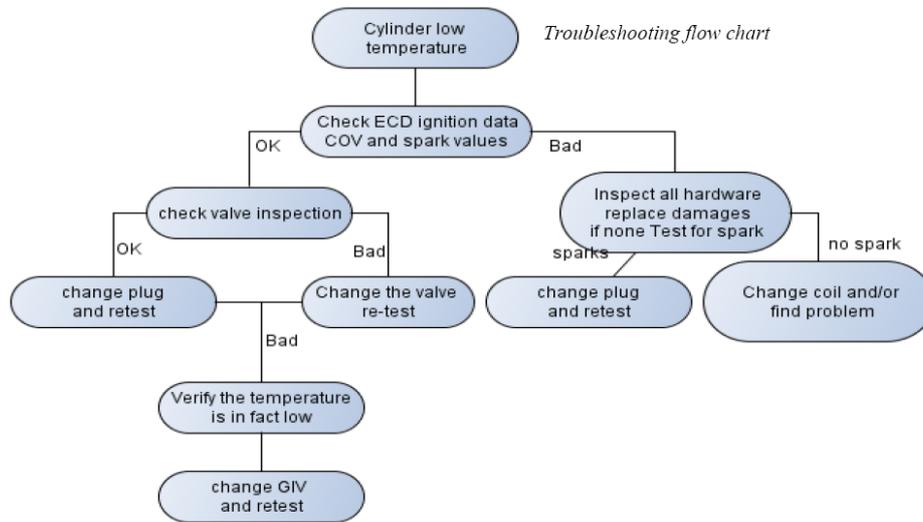
### Localización de Averías

Se seguirá un esquema similar al empleado en la sección 13, parte B (Plan General de Localización de Averías) del MANUAL DESCRIPTIVO DEL VEHICULO - Locomotora Diesel Eléctrica de Maniobras y de Línea - Modelo SW-1001AC - Serie 310 (página 257 y siguientes), con el fin de mantener el mismo sistema lógico utilizado para el resto de sistemas de la locomotora y facilitar así su comprensión y la labor de los especialistas y operarios de mantenimiento.



**Figura 106 Ejemplo de grafico de localización y reparación de averías**

Se incluirán diagramas de decisión para facilitar la localización de averías, como el siguiente ejemplo:



**Figura 107 Ejemplo de diagrama de decisión**

Asimismo, se redactará un apartado especial dedicado a las posibles **fugas de gas** en el circuito de GNL, con mención de su mantenimiento, calibración de sensores y de la electrónica relacionada.

### Datos de Referencia para Mantenimiento

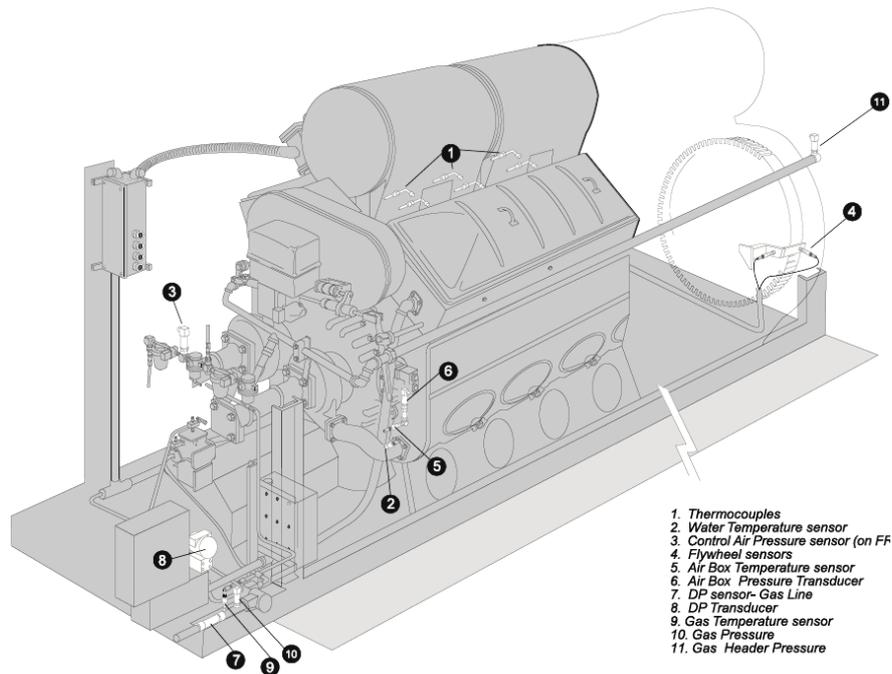
Se tratará de completar la sección 16 del MANUAL DESCRIPTIVO DEL VEHICULO - Locomotora Diesel Eléctrica de Maniobras y de Línea – Modelo SW-1001AC – Serie 310 (página 328 y siguientes), con los nuevos datos de referencia que deberán comprobarse en operaciones de mantenimiento, para asegurarse que el funcionamiento de los nuevos sistemas o conjuntos modificados están dentro de sus especificaciones correctas.

DATOS GENERALES DE MANTENIMIENTO.	SECCION 16
-----	-----
MECANICOS.	
-----	
Carrera cilindros de freno 57 mm.	
Prueba de estanqueidad de radiadores 4,2 Kg/cm <sup>2</sup> durante 10 minutos.	
Altura de centrotepe a cara superior carril 1040 mm.	
Cojinetes de apoyo motor tracción: eje montado	
Holgura total longitudinal, testas,	0'99 ÷ 2'66 mm.
Holgura total radial	0'381 ÷ 0,782 mm.

**Figura 108 Ejemplo datos generales de mantenimiento**

Como anexo, se incluirán todos los esquemas de principio, diagramas PID, esquemas de cableado, instrumentación, indicadores, etc, que sean necesarios para la correcta y fácil lectura de las mediciones o comprobaciones a realizar.

En especial se listarán los nuevos sensores y transmisores incorporados al motor y circuito de gas, con mención de los valores esperados de la señal de salida de cada uno.



**Figura 109 Localización de los sensores de control**

Para cada sensor y transmisor, deberán especificarse datos para su correcta calibración y el proceso a seguir para ello.

### Listado de Componentes

En el capítulo final del ANEXO al Manual, se incluirá una tabla con la lista y descripción de cada uno de los componentes, partes o subconjuntos que componen la transformación, con mención detallada de:

1. Nombre del elemento
2. Sistema o conjunto al que pertenece
3. Descripción y función
4. Marca / Modelo
5. Especificaciones y datos técnicos
6. Observaciones

7. Proveedor (nombre, dirección, teléfono, e-mail)
8. Disponible en almacén [si (cantidad)] - [no]

## **10.6.2 Plan de formación**

El objetivo de este apartado es establecer las bases que deberán seguirse para la redacción del Plan de Formación de Operadores y Mantenedores, con los contenidos formativos necesarios.

Respecto a los Operadores, se incluirán los cambios en el manejo de la locomotora asociados al cambio en la motorización y a aquellas indicaciones y alarmas que sean de nueva incorporación en la locomotora.

Respecto a los Mantenedores, se incluirán los cambios en mantenimiento preventivo y correctivo que, de acuerdo a la normativa EN13306, sean precisos para la localización de fallos y para las operaciones o revisiones preventivas de nueva incorporación en las gamas o rutinas de mantenimiento.

### **10.6.2.1 Antecedentes**

Se establecen como documentos de referencia, el MANUAL DESCRIPTIVO DEL VEHICULO - Locomotora Diesel Eléctrica de Maniobras y de Línea – Modelo SW-1001AC – Serie 310, y su futuro ANEXO, según se describe en el apartado anterior 10.6.1 dedicado al Plan de Mantenimiento y Operatividad, que especifica los cambios en cuanto al mantenimiento de la locomotora por la transformación de su sistema propulsor de diésel a GNL.

El ANEXO basado en el Plan de Mantenimiento y Operatividad pendiente de editar en detalle, pues deberá redactarse una vez realizada la transformación, seguirá una estructura similar al Manual Descriptivo, y desarrollará las nuevas particularidades de la locomotora con el motor EMD transformado.

Los tres documentos anteriores, desconociendo de momento la existencia de otros equivalentes, incluyen capítulos y descripciones generales de la locomotora 310 y de su transformación a GNL, y pueden servir perfectamente como guía o libro de texto para la formación de Operadores y Mantenedores.

Se sugiere estructurar la ampliación del Plan de Formación específico por la transformación a GNL, añadiendo los capítulos siguientes al programa general actualmente existente:

1. Curso Básico Inicial (común a Operadores y Mantenedores)
- 2a. Curso Específico para Operadores
- 2b. Curso Específico para Mantenedores

A continuación, se describe el contenido general de cada uno de esos cursos y un ejemplo de sus posibles programas.

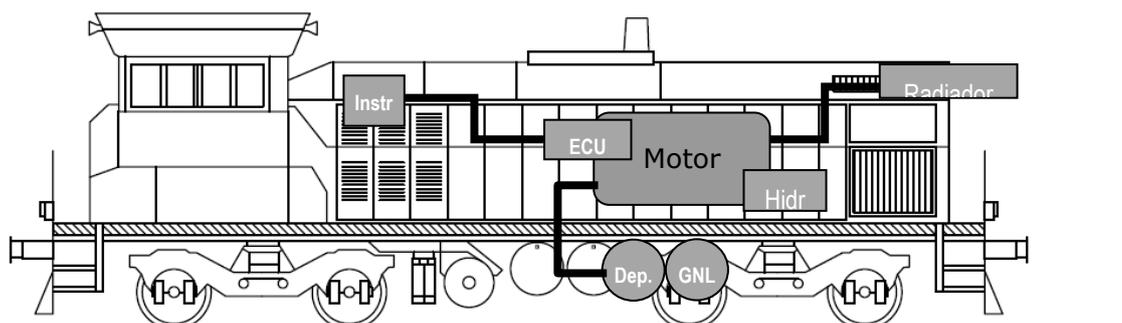
### 10.6.2.2 *Curso Básico Inicial (Operadores y Mantenedores)*

Todo curso de formación deberá iniciarse con una descripción de las propiedades del GNL y de las precauciones a tener en cuenta durante su manipulación. Asimismo, se sugiere que el proveedor de GNL aporte su conocimiento y textos al respecto.

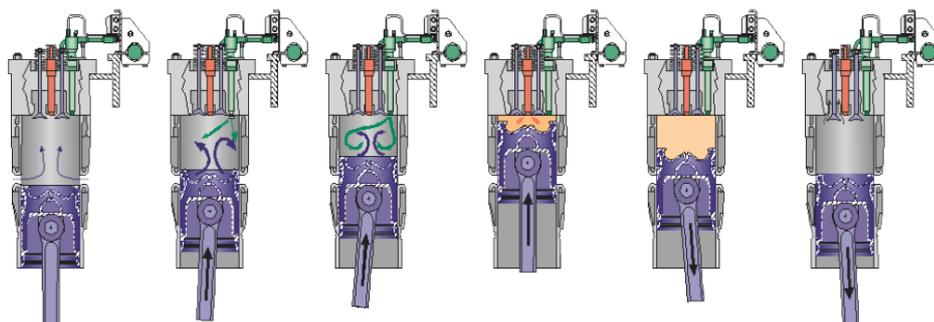
Seguirá una descripción general de las modificaciones realizadas para la conversión a GNL, con suficiente información gráfica para facilitar su comprensión y la identificación de las principales partes incorporadas o modificadas. Se tratará de ofrecer una visión general del conjunto y su principio de funcionamiento.

Concretamente se mostrarán sucintamente los cambios realizados en:

- Motor térmico (partes mecánicas)
- Sistema de GNL
- Control del Motor (ECU)
- Sistema Hidráulico
- Sistema de Refrigeración
- Instrumentación



**Figura 110 Visión general de los sistemas transformados**


**Figura 111 Ciclo del motor a GNL**

El curso acabará con una demostración del arranque y paro de la locomotora.

El programa de este curso adicional al programa completo para la locomotora 310, podría ser similar a lo siguiente:

	<b>Tema</b>	<b>Duración (h)</b>
1	Propiedades del GNL	1
2	Precauciones durante la carga de GNL	1
3	Precauciones durante la operación y el mantenimiento	1
4	Visión general de la transformación a GNL	2
5	Motor transformado (ciclo, nuevas prestaciones, etc)	2
6	Sistema de GNL (depósitos, circuito, sensores, etc)	2
7	Control del motor (objeto y pantalla de la ECU)	1
8	Sistema hidráulico (objeto y situación de componentes)	0,5
9	Sistema de refrigeración (objeto)	0,5
10	Instrumentación en cabina (situación de mandos e indicadores)	1
11	Demostración del arranque y paro de la locomotora (inspección previa de los sistemas, precauciones, etc)	2
	Duración total:	14

**Tabla 27 Curso Básico Inicial (Operadores y Mantenedores)**

### 10.6.2.3 *Curso para Operadores*

En este curso se intensificará en las características de cada uno de los sistemas modificados, con especial atención en el funcionamiento de cada uno, ubicación y objeto de la ECU e indicadores, valores de referencia de parámetros (temperaturas, presiones, etc), síntomas de las averías más frecuentes, inspección y precauciones antes del arranque y paro de la locomotora, etc. Este curso se impartirá parte en aula y parte sobre la misma locomotora.

Una idea del programa de este curso puede ser el siguiente:

	<b>Tema</b>	<b>Duración (h)</b>
1	Inspección previa al arranque de la locomotora	1
2	Funcionamiento del motor a GNL (inyección, encendido, etc)	2
3	Ubicación de sensores y actuadores en el motor	1
4	Funcionamiento del circuito de GNL	2
5	Ubicación de sensores y válvulas en el circuito de GNL	1
6	Prácticas en locomotora	4
7	Funcionamiento de la ECU (pantallas, errores, etc)	2
8	Prácticas en locomotora	4
9	Sistema hidráulico (circuito, funcionamiento, sensores)	1
10	Listado de valores de referencia de parámetros	1
11	Instrumentación en cabina	2
12	Arranque, movimiento y paro de la locomotora	4
	Duración total:	25

**Tabla 28 Curso para Operadores**

#### **10.6.2.4 Curso para Mantenedores**

En este curso se intensificará en las características de cada uno de los sistemas modificados, con especial atención a las necesidades de mantenimiento de cada uno de ellos, así como en los síntomas de las averías más frecuentes y su reparación. Este curso se impartirá parte en aula y parte sobre la misma locomotora.

Una idea del programa de este curso puede ser el siguiente:

	<b>Tema</b>	<b>Duración (h)</b>
1	Información general y arranque del motor GNL	1
2	Mantenimiento del sistema de combustible	2
3	Vaciado de los depósitos GNL	0,5
4	Sistema de encendido por pre cámara	1
5	Inyectores de gas – (Gas Inlet Valve - GIV)	2
6	Control de la velocidad del motor	0,5
7	Revisión y mantenimiento de los conductos de gas	1
8	Válvula de carga – Ajuste y balanceo del motor	2
9	Sensores (Temperatura, presión diferencial, vueltas, detonación...)	3
10	ECU – Diagnóstico y monitorización	3
11	Circuito hidráulico	1
12	Detector de fugas de gas	1
13	Prácticas en locomotora	4
	Duración total:	22

**Tabla 29 Curso para Mantenedores**

## 10.7. Definición de las pruebas necesarias a realizar

### 10.7.1 Pruebas de estanqueidad del circuito de GNL

Se basa en la elaboración del protocolo de pruebas específico para la estanqueidad del circuito de GNL, definido de acuerdo con las indicaciones de los fabricantes del motor y del depósito criogénico.

Una vez unidos todos los componentes del circuito de gas natural mediante tuberías, es necesario comprobar que la instalación es completamente estanca, pues de lo contrario el gas saldría al exterior y se podrían producir situaciones de riesgo. La prueba de estanqueidad consiste en introducir un gas inerte, normalmente se utiliza nitrógeno en el interior de la instalación a una presión suficiente que permita comprobar la existencia de fugas.

#### 10.7.1.1 *Material necesario*

Para la realización de esta prueba se requiere:

1. Botella de nitrógeno
2. Manómetro y mangueras
3. Agua jabonosa

#### **Botella de nitrógeno:**

El nitrógeno se almacena a presión en botellas de distintas capacidades, las cuales se identifican por ser íntegramente de color negro. Cuentan con una válvula de salida del gas a la cual se conecta un manorreductor, que permite reducir y regular la presión de salida. El manorreductor cuenta con dos manómetros: el de mayor amplitud (en torno a 300 bar) mide la presión reinante en el interior de la botella; el de menor amplitud (en torno a 40 bar) mide la presión de salida. El giro de la maneta de regulación permite controlar la presión de salida al valor deseado.

#### **Manómetro y mangueras:**

Para efectuar la prueba de estanqueidad existen en el mercado dispositivos consistentes en un conjunto de mangueras provistas de racores para la conexión a la botella de nitrógeno y a las válvulas de servicio de la instalación, así como de un

manómetro con la amplitud necesaria para efectuar dicha prueba. La llave de paso permite cerrar la manguera y retirar la botella una vez introducido el nitrógeno en la instalación.

### **Agua jabonosa:**

El agua jabonosa se utiliza frecuentemente como sistema de detección, ya que permite visualizar claramente el lugar exacto en el que se está produciendo la fuga. El agua jabonosa puede hacerse fácilmente en una proporción de 50% de agua, 40% de jabón líquido y 10% de glicerina.

Una vez obtenida la mezcla, se agita lo suficiente como para que se forme espuma en su superficie. Con un pincel se toma un poco de espuma y se deposita en la zona sospechosa de fuga; caso de haberla, se formarán al instante burbujas, señal inequívoca de su existencia. El agua jabonosa se comercializa también en forma de aerosoles, que permiten su aplicación de forma cómoda y rápida.

#### **10.7.1.2 Realización de la prueba de estanqueidad**

Para efectuar la prueba en el sistema de gas natural, es necesario tener la seguridad de que toda la instalación va a estar sometida a la presión de prueba. Al tratarse de una instalación de GNL, la presión en el circuito va a ser en todo momento moderada. Los depósitos de GNL estarán a una presión que dependerá de la temperatura del gas licuado de su interior y que puede oscilar entre 1 bar con el gas licuado a  $-162^{\circ}\text{C}$  y los 10 bar cuando la temperatura del líquido descienda hasta los  $-125^{\circ}\text{C}$ .

La prueba de estanqueidad se realiza en dos fases:

**Fase 1:** Detección de grandes fugas. Esta primera fase tiene como objetivo localizar grandes fugas detectables con el oído, como pueden ser las originadas por una manguera suelta, una unión roscada sin apretar, un orificio importante en una soldadura, etc. Consiste simplemente en introducir el nitrógeno a una presión relativamente baja (1,5 bar) y aplicar el oído para detectar las posibles fugas.

**Fase 2:** Prueba de estanqueidad a presión elevada. En esta segunda fase se introduce el nitrógeno a la presión recomendada por el fabricante de los depósitos de GNL es decir 15 bar.

La introducción del nitrógeno ha de ser lenta, con el fin de detectar posibles fugas perceptibles con el oído. Una vez alcanzada y estabilizada la presión de prueba, es

necesario que se mantenga invariable. Se recomienda, para mayor seguridad, mantener la instalación con la presión de prueba hasta el día siguiente.

Una bajada sensible de la presión durante ese tiempo será síntoma de que existen fugas, las cuales pueden presentarse en cualquier unión soldada o roscada de la instalación. Su detección se llevará a cabo mediante agua jabonosa.

## **10.7.2 Pruebas estáticas de puesta en marcha y aceleración en banco de ensayos**

Es necesaria la definición de las pruebas estáticas de puesta en marcha y aceleración del vehículo en banco de ensayos.

Se distingue entre la definición de tres protocolos de pruebas diferenciados:

1. Protocolo específico de las modificaciones introducidas en el motor.
2. Protocolo de conjunto de pruebas estáticas: puesta en servicio y fuera de servicio, carga de compresor, verificación de indicaciones ópticas y acústicas, circuito de marcha y freno de servicio, carga de tubería de freno, actuación de elementos de emergencia, etc.
3. Protocolo de pruebas dinámicas: aceleraciones, deceleraciones, distancias de frenado, rodadura, etc.

### **10.7.2.1 Descripción General**

Se detallan a continuación las pruebas a realizar para validar el funcionamiento de la locomotora una vez realizada la transformación consistente básicamente en la transformación del motor para su funcionamiento con gas natural, la adaptación de depósitos criogénicos para GNL que suministrarán gas al motor y el sistema de detección de fugas de gas.

#### 10.7.2.1.1 Validación de la instalación de GNL y distribución de gas en el motor

El procedimiento de validación de la instalación de gas contempla la realización de las siguientes pruebas:

#### **Pruebas de estanqueidad:**

Realización de las pruebas de estanqueidad del circuito de acuerdo con lo indicado en el apartado 10.7.1.

**Primer llenado de los depósitos de GNL:**

Un depósito de GNL cuando se instala por primera vez se considera que es un depósito caliente, por lo que generará presión rápidamente durante el llenado a la vez que el recipiente se enfría. Este hecho puede provocar que la instalación de suministro detenga el proceso de llenado al detectar el rápido incremento de presión.

Se recomienda que para el primer llenado de un depósito se introduzcan de 40 a 80 litros de GNL en el depósito, se verifique la ausencia de fugas y se proceda a poner en marcha el motor durante 20-30 minutos para que se empiece a consumir el combustible del depósito. De esta forma la presión del depósito bajará hasta normalizarse. A continuación, con el motor parado, puede continuarse normalmente con el llenado del depósito hasta su máxima capacidad. Este procedimiento es el mismo que se recomienda para depósitos que han sido vaciados y han estado fuera de uso durante más de 10 días.

**Prueba de aumento de presión en los depósitos de GNL:**

Para establecer el aumento de presión de un sistema de combustible LNG, se debe realizar la siguiente prueba. Llene el depósito entre 1/2 y 3/4. Ponga el motor en funcionamiento unos 10-15 minutos hasta estabilizar la presión y la temperatura del tanque. Detenga el motor y transcurridos 15 minutos en reposo anote la presión del depósito. Espere 8 horas y vuelva a registrar la presión del depósito. Verifique que la tubería esté descongelada, si es así, este es el aumento de presión para el sistema de combustible.

## 10.7.2.1.2 Validación del kit de conversión a GNL

El procedimiento de validación de la conversión del motor a funcionamiento con gas natural se inicia con una revisión de la correcta instalación de todos los componentes y la validación del sistema eléctrico asociado.

**Encendido del motor:**

El arranque del motor se realiza de forma muy similar a la del motor diésel original. Se recomienda parar el motor después de un tiempo de ajuste. La puesta en marcha del motor se realiza desde la cabina. La cabina dispone de un nuevo panel con informaciones sobre el estado del sistema.

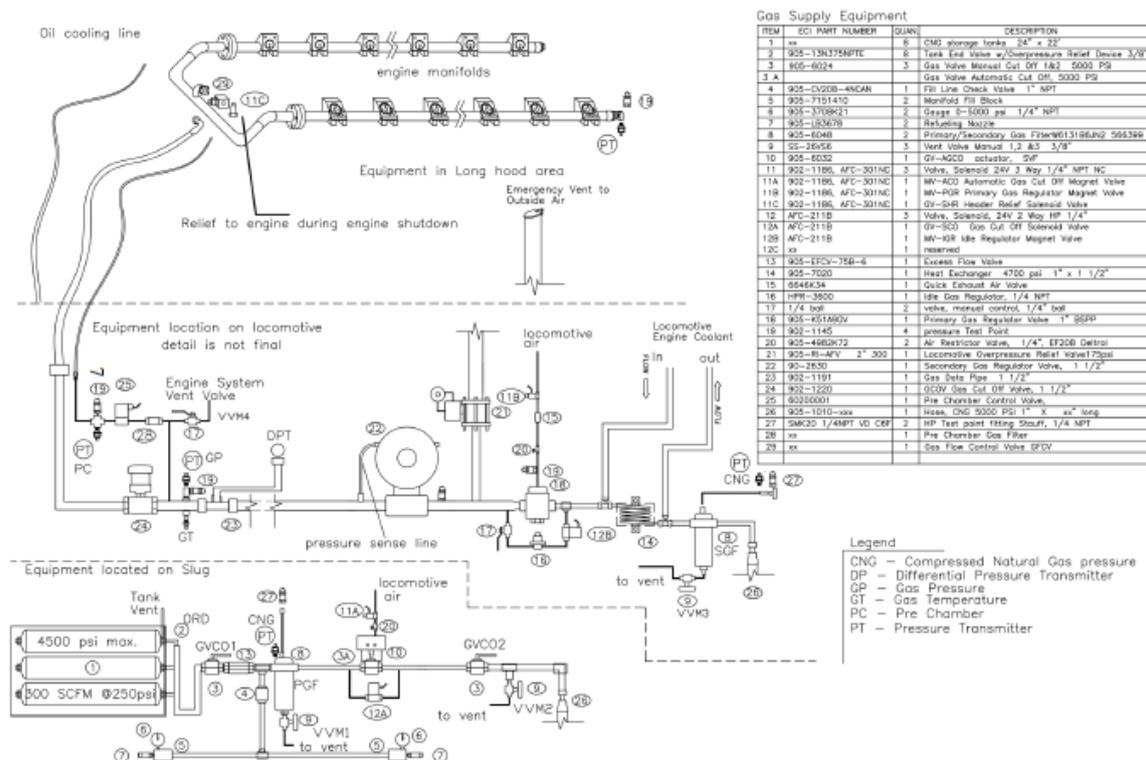
El motor no arrancará sin la ECU y las bujías con tensión. La ECU tarda unos 40 segundos en arrancar después del encendido inicial. Los valores que se muestran en la pantalla indican que la ECU está preparada. Cuando el motor está en parado, la ECU y el Spark Ignition System están esperando recibir las señales de velocidad del motor y de posición, así como la señal del relé FPC (Fuel Pump Contactor) para identificar el estado de arranque.

Cuando se presiona el botón de arranque, el relé de FPC se activará, alimentando el circuito de suministro de combustible. Con los enclavamientos del sistema de detección de fugas cerrados, las válvulas electromagnéticas de suministro de combustible se activarán y el gas estará disponible para su suministro al motor.

Cuando el motor empieza a girar para ponerse en funcionamiento, la ECU monitorea varias señales para asegurarse que el arranque funcionará correctamente. Las señales controladas incluyen el FPC, el estado del sistema de encendido, el estado del sistema de detección de fugas, la presión de gas, la presión del sistema hidráulico entre otros. Cualquier problema se indicará en la pantalla de control del motor situada en el interior de la cabina.

Cuando el motor se ponga en funcionamiento, la presión de aceite y la temperatura del agua son también monitorizadas. Además de las señales anteriores, se monitorean la posición del acelerador y el estado del interruptor de temperatura de la válvula (VTS). Estas señales se consideran esenciales y si no se encuentran en un estado normal, provocarán que el motor se detenga o no arranque.

Durante un ciclo de arranque normal, se reconocerá la señal de FPC y, a medida que la velocidad del motor supere los umbrales mínimos, el sistema de encendido dará chispa a las bujías e indicará correcto funcionamiento a la ECU.



**Figura 112 Esquema del sistema de gas natural**

La ECU controlará el estado de todas de las señales necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del motor. La válvula de control de flujo de gas (GFCV) y los inyectores de gas empezarán a funcionar, al tiempo que la válvula de corte de gas (GCOV) se mantiene abierta.

El gas inyectado comienza combustiona en el interior de los cilindros y el motor se pone en funcionamiento. Hay que mantener presionado el interruptor de arranque hasta que el motor haya alcanzado al menos las 125 min<sup>-1</sup>. La ECU continúa verificando el estado correcto de todas las señales del motor. El motor continúa funcionando al ralentí con la velocidad y el caudal de combustible controlados por la ECU.

Si la ECU determina que hay un problema que impide el arranque (es decir, no hay presión de gas), lo indicará en la pantalla y desconectará automáticamente el suministro de gas.

El sistema está diseñado para intentar arrancar el motor lo más rápido posible para reducir el tiempo de arranque. Se dispone de un interruptor selector para hacer girar el motor sin suministro de gas, que puede utilizarse para trabajos de mantenimiento.



**Figura 113 Pantalla del sistema de control del motor**

### **Ajuste y equilibrado del motor:**

La potencia desarrollada por cada uno de los cilindros del motor depende de la cantidad de combustible suministrado y es un elemento clave para un suministro de potencia constante y unas emisiones contaminantes minimizadas.

Para el ajuste y balanceado del motor se tendrán en cuenta el caudal de gas suministrado, así como la temperatura de los gases de escape de cada cilindro. Una temperatura de escape elevada, no necesariamente indica un exceso de combustible en el cilindro.

*NOTA: No se debe ajustar innecesariamente los bloques de carga.*

La presión de combustión es el mejor indicador del funcionamiento de la combustión en el cilindro. En este capítulo se tratará sobre el ajuste del motor en relación con la presión máxima de combustión, presentando un procedimiento para medir y ajustar el motor para que funcione dentro de unos límites correctos.

El ajuste debe inspeccionarse anualmente o cada vez que se produzcan fallos repetidos en la temperatura de escape que no se deban a una bujía defectuosa, fallos en la válvula de suministro de gas o el las válvulas GIV.

Hay dos situaciones en las que es necesario realizar un ajuste del motor:

1. La primera vez que se inicia el sistema
2. Durante las inspecciones de mantenimiento del motor o cuando se ha cambiado un inyector.

Los trabajos de balanceo del motor deben realizarse con una carga del motor superior al 75%. Se empieza la evaluación en la posición de carga 6 y se va aumentando la carga a la vez que se va ajustando el balance. Un motor ajustado para potencia máxima probablemente estará un poco desequilibrado al 50% de carga. Una vez que el motor está equilibrado, normalmente no debería necesitar ningún ajuste adicional, y debería evitarse su manipulación. En el caso de que sea necesario un nuevo ajuste, se recomienda anotar en primer lugar la posición de referencia de todas las válvulas de carga.



**Figura 114 Conjunto de bloque y válvula de carga**

Para un correcto ajuste y balance del motor se requiere de personal y herramientas adecuadas. Las válvulas de los bloques de carga permiten el ajuste del balance del cilindro en función de la temperatura de escape, de acuerdo con las mediciones realizadas por la ECU. Se dispone de una pantalla específica con las temperaturas de escape para realizar los ajustes.

El ajuste se realiza con el motor funcionando alta carga (más del 75% de la carga completa).

1. Seleccione la pantalla que muestra las temperaturas de los cilindros.
2. Revise las lecturas y anote las temperaturas de los cilindros.
3. Vaya al motor e inspeccione las posiciones de la válvula de carga, y anote su posición inicial antes de realizar ningún cambio. Si un cilindro muestra una temperatura gire la válvula una vuelta en sentido anti horario. Si un cilindro da una lectura de temperatura elevada y tiene expuestas más de 5 hilos de la rosca gírela en aproximadamente 1 vuelta en sentido horario.
4. Continúe realizando estos ajustes con todos los cilindros hasta conseguir un equilibrio de temperaturas razonable.

5. Después de ajustar todas las válvulas, sostenga el tornillo de la válvula de carga con un destornillador, y apriete la contratuerca a 15-20 pies-lbs.

*NOTA: hay que tener en cuenta que algunos desequilibrios del motor pueden ser causados por otros elementos del motor y no necesariamente por el sistema de inyección de gas. Ajustes regulares del sistema no deberían ser necesarios si el motor se encuentra en buen estado de mantenimiento.*

La práctica y la experiencia son necesarias para reconocer el funcionamiento normal del motor.

#### **Validación del sistema de refrigeración del motor:**

Sin entrar a analizar los ciclos termodinámicos de los motores de ciclo Otto y de ciclo Diésel, resulta clara la necesidad de aumentar la capacidad de refrigeración de motor convertido a gas natural debido a la menor eficiencia del ciclo Otto.

Por este motivo dentro de las modificaciones realizadas a la locomotora, se incluye el sobredimensionamiento del sistema de refrigeración, mediante la instalación de un nuevo radiador de mayor capacidad. El incremento de refrigeración necesario es aproximadamente un 15-20% adicional.

El ensayo de potencia que se describe anteriormente, debe utilizarse para validar la idoneidad del nuevo radiador instalado. Para ello se deberán controlar las temperaturas de entrada y salida del agua en el motor y en el radiador, validando que no se superen los valores máximos admisibles por el fabricante durante el ensayo de potencia máxima.

#### **Ensayo de potencia del motor:**

Se presenta a continuación el procedimiento para realizar ensayos de carga y normalización de potencia. Deben utilizarse datos normalizados y exactos de potencia para evaluar el funcionamiento del motor y del equipo auxiliar e indicar posibles anomalías o excesiva potencia de salida. La corrección de las anomalías mejorará las prestaciones del motor y evitará desgastes prematuros del mismo.

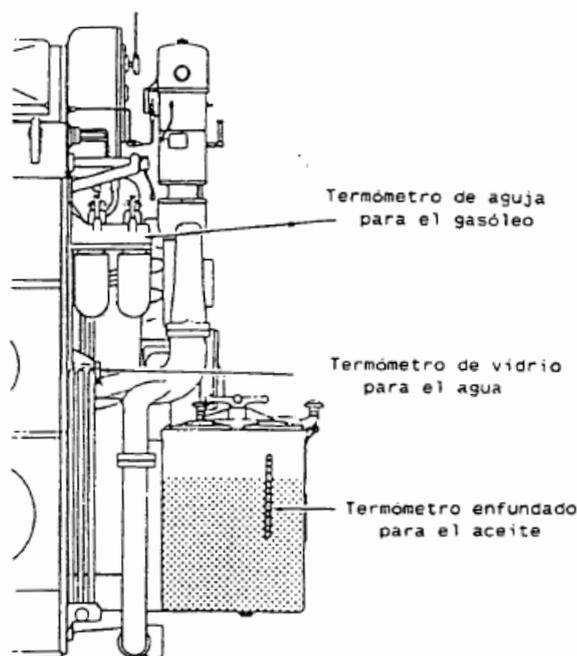
Las páginas de datos de servicio proporcionan la información siguiente:

- Referencias de planos y otras publicaciones
- Equipo de mantenimiento
- Especificaciones que afectan a componentes y circuitos

- Gráficos de potencia y resistencia de carga, así como factores de corrección de potencia.

### **Preparación de la prueba de carga**

1. Parar el motor y retirar el fusible de arranque
2. Comprobar que los depósitos de combustible disponen de una cantidad suficiente para la realización de toda la prueba de carga. (unos 1200 litros de GNL para 90 minutos de funcionamiento)
3. Comprobar el nivel de aceite en:
  - a. Motor
  - b. Compresor de aire
  - c. Gobernador
  - d. Circuito hidráulico
4. Comprobar el nivel de agua refrigerante del motor
5. Realizar una inspección de la cámara de barrido del motor. Comprobar el estado de los segmentos y de las superficies de los cilindros.
6. Disponer de un termómetro para la medida de la temperatura ambiente.



**Figura 115 Localización de los termómetros para el ensayo de potencia**

7. Obtener la temperatura del combustible (gas) en el panel de control.
8. Medir la temperatura del aire a la entrada del motor

9. Medir la temperatura de aceite del motor.

### **Preparación para el ensayo de carga**

*ATENCIÓN: Se deberá asegurar que todas las conexiones se han realizado correctamente*

1. Conectar dos cables 775724 al bus GP del generador principal. Conectar el otro extremo de los cables al positivo de la carga externa.

*NOTA: no se debe completar la conexión del paso 2 antes de poner en marcha el motor, a menos que la carga externa esté equipada con un interruptor que aíse la carga durante el arranque del motor.*

2. Conectar dos cables 775724 al terminal GN del bus del generador principal. Conectar el otro extremo de los cables al positivo de la carga externa.
3. Conectar un voltímetro al positivo y negativo del shunt de test de carga en el panel de prueba (TP1 y TP2)
4. Desconectar y retirar el bus del panel de shunt del generador principal
5. Situar el interruptor de prueba del panel de prueba en la posición Prueba de Carga.
6. Conectar un voltímetro de 0-1500 VDC para indicar la tensión de Generador Principal (Positivo en GP y negativo en GN del panel de Prueba).
7. Seleccionar la resistencia de carga adecuada para la curva de carga dada en Datos de Servicio.

### **Realización del ensayo**

1. Volver a colocar el fusible de arranque. Poner en marcha el motor y colocar los controles para la operación en potencia (interruptor IS en la posición MARCHA).
2. Colocar el acelerador en la posición 1 y comprobar que:
  - a. Presión de aceite del motor satisfactoria
  - b. No hay fugas de combustible, aceite ni agua.
  - c. Compresor descargado
  - d. Ventiladores de la caja de carga funcionando
  - e. Hay lecturas de tensión y corriente del generador

3. Avanzar el acelerador al punto 3 y dejar que el motor alcance una temperatura de, al menos 55°C antes de aplicar plena carga.
4. Avanzar el acelerador paso a paso hasta alcanzar la carga y velocidad plenas. Una vez se han alcanzado, observar el funcionamiento del ventilador del radiador y de las persianas. Hay un pulsador de prueba en el interruptor de temperatura del motor.
5. Con el acelerador en el punto 8 observar que el regulador de carga se encuentra en su punto medio y no en la posición de campo máximo.
6. Conectar el pulsador normalmente abierto entre G1 de SCC y H de BF. Entonces cerrará el interruptor. El regulador de carga se debe desplazar rápidamente a la posición de campo mínimo. Al soltar el interruptor de prueba el regulador de carga debe volver a su punto medio.
7. Cerrar todas las puertas del recinto del motor y dejar en marcha el motor a plena carga hasta que las condiciones se estabilicen (alrededor de 30 minutos si solo se comprueba la potencia y 60 minutos si se comprueba el funcionamiento del enfriador de aceite). Las persianas se pueden bloquear parcialmente si se requiere un control más ajustado de la temperatura.
8. Comprobar la temperatura del agua del motor hasta que no haya diferencias entre dos lecturas efectuadas con 15 minutos de diferencia.
9. Cuando las condiciones sean estables, observar y registrar las temperaturas siguientes:
  - a. Temperatura del combustible
  - b. Temperatura del agua a la salida de la bomba de agua
  - c. Temperatura del aceite del motor en el colador
  - d. Temperatura del aire a la entrada del radiador
10. Hacer una segunda medición de temperaturas 15 minutos después y una tercera a los 15 minutos de la segunda.

### ***Cálculo y normalización de la potencia***

1. A partir de las observaciones, calcular la potencia corregida usando las fórmulas, factores de corrección y valores de potencia de auxiliares que aparecen en los datos de servicio.
2. Si la potencia total corregida del motor en condiciones normales no está dentro de los límites admisibles que se reseñan en la página de Datos de Conservación hay que efectuar comprobaciones para encontrar el motivo de

discrepancia: el reglaje de las cremalleras, la sincronización de los inyectores y de las válvulas, el reglaje del regulador, el calibrado de los inyectores, la limpieza de los filtros de aire, el estado de los conjuntos de potencia y la excitación del generador principal.

- Si la temperatura de entrada del aceite lubricante del motor es superior al máximo indicado en la instrucción de conservación M.I.928 para el correcto funcionamiento del refrigerador, hay que limpiar el refrigerador de aceite.

### **Datos de Servicio**

La siguiente tabla muestra la potencia del motor diésel y la del motor de gas natural transformado.

	<b>Diesel</b>	<b>GNL (ECI Conversion)</b>
<b>Manufacturer</b>	General Motors / EMD	General Motors / EMD
<b>Model</b>	GM 8-645-E	GM 8-645-E
<b>Type</b>	8V Supercharged 2-stroke 45°V	8V Supercharged 2-stroke 45°V
<b>Power</b>	684 KW / 930 CV 900 min-1	745 KW / 1013CV 900 min-1

**Tabla 30. Especificaciones de los motores diésel y GNL**

### **Fórmulas**

*Entrada al Generador = Potencia del Generador =*

$$= \frac{V(\text{Gen. Prin.}) \times I (\text{Gen. Prin.})}{\text{Factor de conversión } W \text{ a HP } (*)}$$

(\*) Se recomienda un valor de 700

Potencia total ajustada a las condiciones AAR Standard=

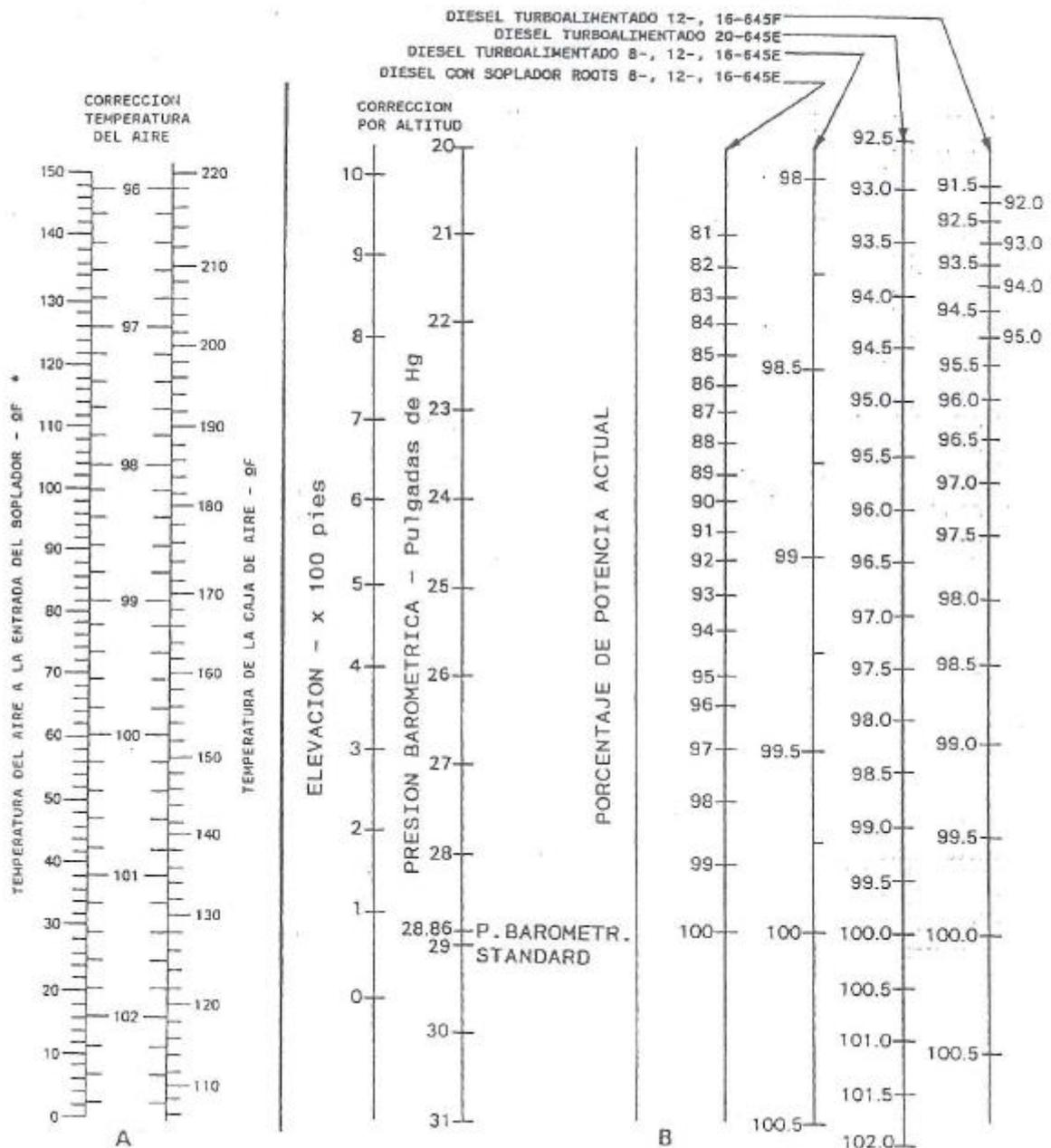
$$= \frac{HP(\text{Gen. Prin.}) + HP (\text{Aux.})}{A \times B \times C \times D}$$

*Dónde:*

- A: Factor de corrección por temperatura del aire. Standard 15,5°C
- B: Factor de corrección de altitud. Standard al nivel del mar: 759,5 mmHg
- C: Factor de corrección para densidad de combustible
- D: Factor de corrección por temperatura de combustible. Standard 15,5°C

TABLA DE POTENCIAS DE AUXILIARES	HP	kW
Generador Auxiliar	7.0	5.2
Ventilador Generador y Motores Tracción	19.0	14.2
Ventilador Refrigeración (Pers. Abiertas)	55.0	41.1
Compresor (Descargado)	15.0	11.2
<b>TOTAL DE AUXILIARES</b>	<b>96.0</b>	<b>71.7</b>

**Tabla 31 Potencias de los elementos auxiliares**



**Figura 116 Nomógrafos de factores de corrección barométrica por modelos (1/2)**

Estos nomógrafos deben utilizarse según las instrucciones dadas en el manual de Servicio de la Locomotora para la corrección de la potencia a la presión barométrica de 28.85 pulg.Hg. La presión barométrica standard es de 28.86 pulg.Hg

\* Sumar 24°C a la temperatura ambiente para obtener la temperatura del aire de entrada.

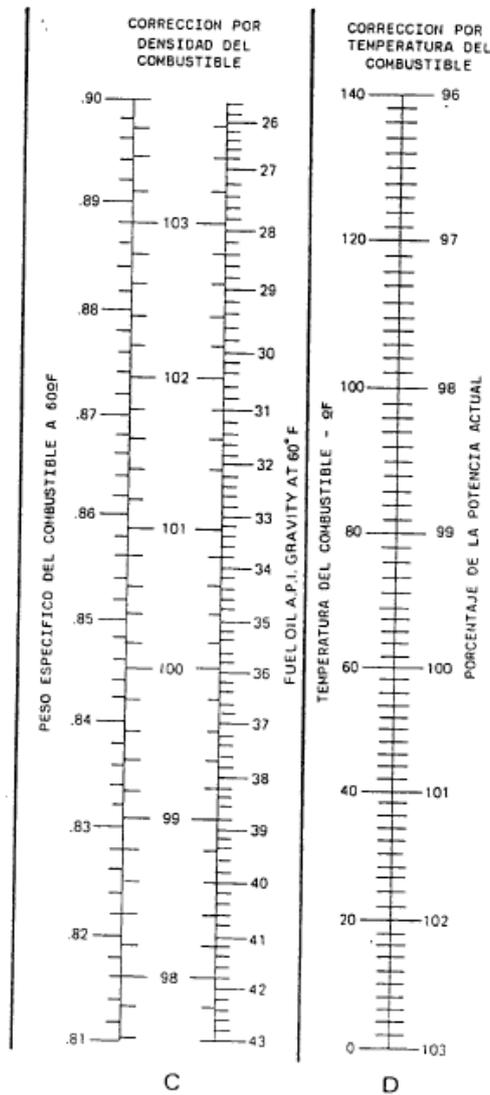


Figura 117 Nomógrafos de factores de corrección barométrica por modelos (2/2)

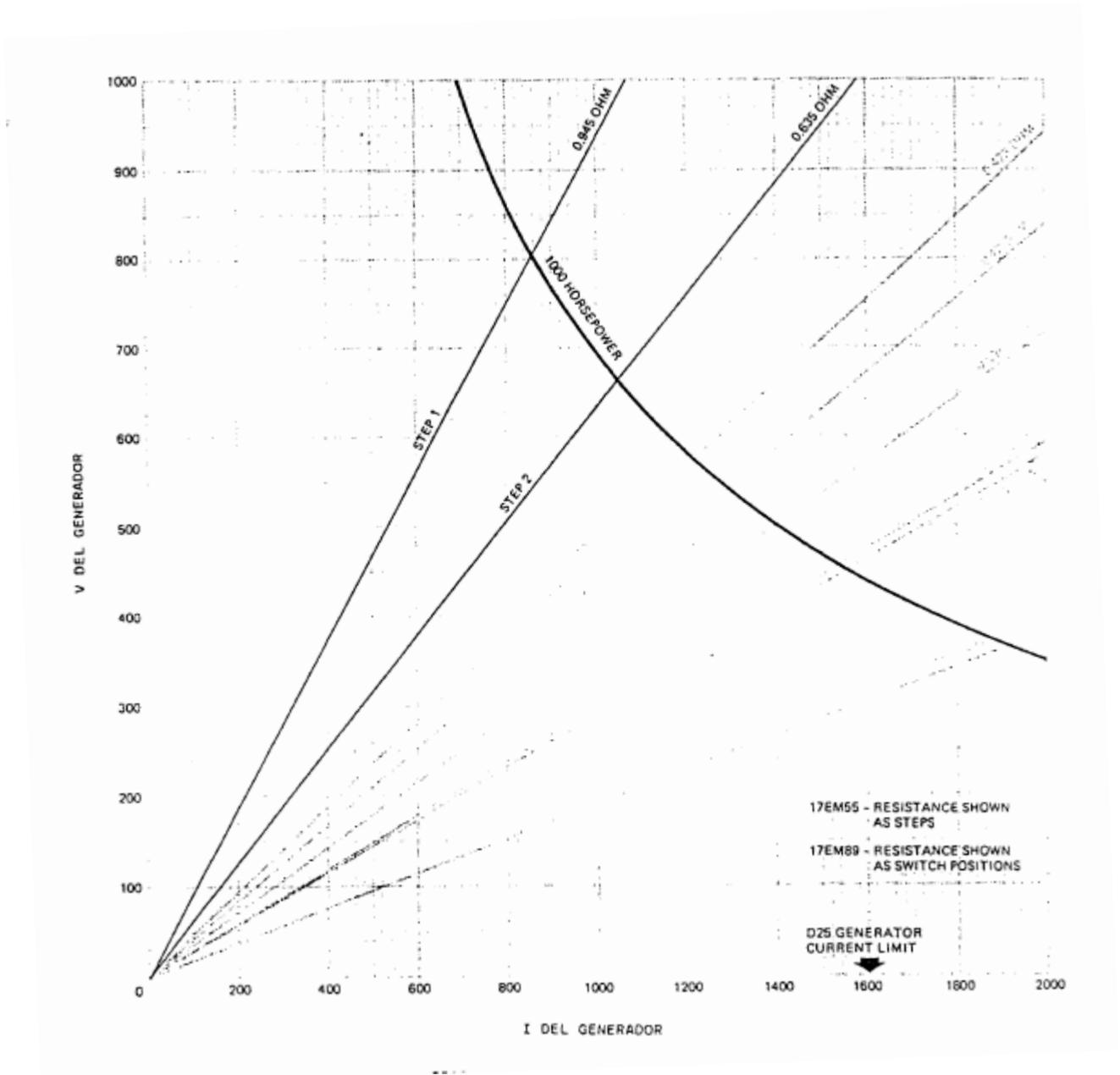
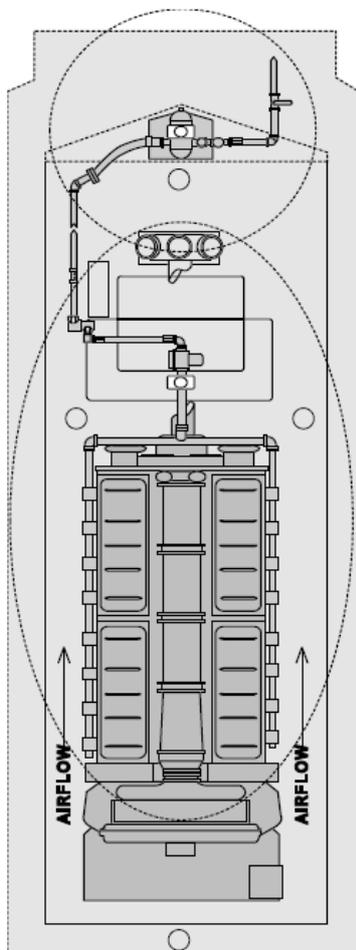


Figura 118 Gráfico para la carga del generador de 1000 HP

#### Validación del sistema de detección de fugas de gas:

Se recomienda la utilización de un sistema de detección de fugas de gas de monitoreo continuo, incluso si no es requerido por la normativa local. El sistema de detección de fugas es un sistema autónomo que utiliza 4 sensores para para monitorear de forma continua el aire en la zona del motor.

Si la concentración de metano en el aire es del 20% o superior al límite inferior de inflamabilidad (1% de gas en aire) el sistema lo indicará mediante una alarma. Cuando la concentración alcance el 50% del límite inferior de inflamabilidad (2,5% de gas en aire) el sistema activará un relé que activará el cierre de todas las válvulas de suministro de gas.



**Figura 119 Localización de los sensores de gas**

El gas natural es más ligero que el aire, por lo que todos los sensores deberán ubicarse en la parte superior de la zona a controlar. Un sensor se colocará en el armario eléctrico principal. Otro sensor se colocará a cada lado de la parte delantera del motor (parte trasera de la locomotora) y un cuarto sensor se colocará encima de la válvula de regulación de presión del gas.

Los sensores son elementos robustos, sin embargo, deberán mantenerse alejados del colector de escape del motor y fijados firmemente para que las vibraciones no provoquen lecturas erróneas y falsas alarmas.

La validación de la instalación deberá realizarse por personal cualificado que valide la ubicación de los sensores y compruebe el correcto funcionamiento de los sensores y de la maniobra que se deriva de una alarma provocada por detección de gas.

#### **Validación general de la locomotora:**

A las pruebas estáticas definidas en los capítulos anteriores, se añadirán algunas pruebas dinámicas que se realizarán en las vías del proveedor.

A la validación de la locomotora se añadirán las pruebas solicitadas por Adif, detalladas en el apartado de a continuación, siempre que sea factible su realización dentro de las instalaciones del integrador.

### **10.7.3 Definición e identificación de las pruebas necesarias solicitadas por Adif**

Como se ha introducido en el apartado anterior, se definirá la documentación y el procedimiento a utilizar para materializar la reforma realizada a efectos de disponer de la documentación precisada por Adif y la AESF.

Con fecha 3 de mayo de 2016, la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, en adelante AESF publicó una "Guía sobre el contenido del Expediente de Modificación de un Vehículo Ferroviario".

Así pues, a continuación, se presenta el procedimiento para la acreditación y autorización de puesta en servicio de la locomotora modificada a GNL objeto del este proyecto de acuerdo con esta guía.

#### **10.7.3.1 Procedimiento**

El Real Decreto 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de Interés General (en adelante RFIG), incorporó al derecho español la Directiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad.

En su artículo 15, sobre la entrada en servicios de subsistemas existentes después de una renovación o rehabilitación, se establece que, en este caso, la entidad contratante o el fabricante presentarán a la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria (AESF), un expediente con la descripción del proyecto, con el fin de que

este organismo estudie el expediente y, teniendo en cuenta la estrategia de entrada en práctica indicada en la ETI que le sea de aplicación, decida si la envergadura de las actuaciones a realizar hace necesaria, o no, una nueva autorización de entrada en servicio (en adelante AES).

Este procedimiento será de aplicación en el caso de que la modificación vaya a ser implementada para su explotación comercial.

En el siguiente cuadro se enumeran las Directivas, Ordenes FOM y Recomendaciones de la Comisión, que deben tenerse en cuenta para la realización del proceso.

DOCUMENTO	DESCRIPCIÓN
Real Decreto 1434/2010, de 5 de noviembre	Interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de Interés General (en adelante RFIG)
Directiva 2008/57/CE de 17 de junio de 2008	Interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad
Directiva 2004/49/CE de 29 de abril de 2004	Sobre la seguridad de los ferrocarriles comunitarios
Orden FOM/233/2006	Regula las condiciones para la entrada en servicio de subsistemas
Reglamento de Ejecución (UE) nº 402/2013 de la Comisión, de 30 de abril de 2013	Método común de seguridad para la evaluación y valoración del riesgo
Reglamento (UE) nº 1077/2012 de la Comisión de 16 de noviembre de 2012	Método común de seguridad
Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad relativa a los subsistemas Material Rodante	Guía de aplicación
Orden FOM/167/2015, de 6 de febrero	Modifica FOM anterior. Regula las condiciones para la entrada en servicio de subsistemas
Recomendación de la Comisión de 29 de marzo de 2011	Recomendación sobre las condiciones para la entrada en servicio de subsistemas
Recomendación 2014/897/UE de la Comisión de 5 de diciembre de 2014	Sustituye Recomendación anterior. Cuestiones relacionadas con la entrada en servicio y la utilización de los subsistemas de carácter estructural y de los vehículos contemplados en las Directivas 2008/57/CE y 2004/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

**Tabla 32 Documentos de referencia y normativa de aplicación**

#### 10.7.3.1.1 Requerimiento de una nueva AES

El material rodante modificado, autorizado previamente, sólo requerirá una nueva AES que sustituya a la anterior, de acuerdo con el procedimiento establecido en el capítulo II (procedimiento de autorización de entrada en servicio) del título VI (vehículos) de la Orden FOM 167/2015, cuando se dé alguno de los supuestos siguientes:

- a) Que la modificación afecte a la declaración "CE" de conformidad o de idoneidad para el uso de algún componente de interoperabilidad o subsistema y siempre que el nivel global de seguridad del vehículo pueda verse afectado.
- b) Que se superen los umbrales que se establezcan en las propias Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETIs) o Instrucciones Ferroviarias (IFs) de aplicación, que determinan que la modificación tiene un impacto en las características básicas de diseño del subsistema y que dicha modificación requiere una nueva AES.
- c) Que la modificación afecte a la compatibilidad del vehículo con la infraestructura.
- d) Que la modificación introducida en el vehículo suponga una variación de las prestaciones iniciales definidas en la AES o un cambio de la categoría en la que fue encuadrado el vehículo en su autorización inicial.
- e) Que el vehículo modificado, por sus nuevas características básicas, pueda considerarse como un tipo diferente al que sirvió de base para su autorización inicial.
- f) Que la modificación exija un cambio de la numeración europea del vehículo.

#### 10.7.3.1.2 Consideración de modificación significativa

Independientemente de la necesidad o no de emisión de una nueva AES para el vehículo modificado, las alteraciones introducidas en el material rodante ferroviario que ya dispusiera de autorización tendrán la consideración de modificación significativa cuando, afectando a alguno de los equipos o componentes recogidos en el Anexo 2, se dé alguna de las siguientes circunstancias:

- Que las consecuencias derivadas de un fallo de los elementos modificados, considerando la existencia de barreras de seguridad fuera de los mismos,

podieran suponer graves daños a personas, infraestructuras o al propio material.

- Que se trate de una modificación de gran complejidad técnica.
- Que se trate de un cambio con un grado elevado de innovación tecnológica en su implementación, refiriéndose tanto a lo que es innovador en el sector ferroviario como a lo que es novedoso para la organización que introduce el cambio.
- Que se trate de un cambio que se considere irreversible.
- Que existan dificultades para el seguimiento del comportamiento de la modificación a lo largo de la vida útil del vehículo y de poder por tanto intervenir adecuadamente.
- Cualesquiera otras que estén consideradas modificaciones significativas de forma expresa por la normativa de aplicación.

Para la evaluación de estas circunstancias se tendrá en cuenta el efecto acumulativo de las sucesivas modificaciones que ha podido sufrir el vehículo durante su vida en explotación, en relación con el estado original que sirvió de base a su AES, ya que una acumulación de modificaciones menores podría dar lugar a una modificación importante.

Asimismo, se tendrá en cuenta la antigüedad del vehículo a modificar, debiéndose considerar la vida útil de determinados elementos o componentes del mismo. En particular, será criterio de esta Agencia el considerar como significativos los cambios que afecten a bastidor y a cualquier elemento de seguridad en vehículos de gran antigüedad, debiéndose llevar a cabo el proceso de valoración y evaluación del riesgo del Reglamento de Ejecución (UE) nº 402/2013.

Corresponde al poseedor del vehículo que figure en el registro nacional de vehículos asignado al vehículo existente, bien por sí mismo o bien a través de delegación realizada a la entidad encargada del mantenimiento (EEM), la empresa ferroviaria o el fabricante (en lo sucesivo, el "solicitante"), la valoración de estos aspectos y el pronunciamiento, basándose en el juicio de expertos, sobre si las modificaciones pueden considerarse o no significativas. En el caso en que el solicitante no dispusiera de un sistema de gestión de la seguridad regulado en el Reglamento sobre seguridad en la circulación de la RFIG, aprobado por el Real Decreto 810/2007, ni se trate de una EEM certificada de conformidad con el Reglamento (UE) nº 445/2011 que disponga del correspondiente sistema de gestión del mantenimiento, la consideración de la modificación como no significativa deberá contar necesariamente con la conformidad, previa a la implantación de la

modificación, de la AESF, que podrá solicitar informe del administrador de infraestructuras ferroviarias, que se presumirá favorable si no lo emite dentro del plazo establecido por la citada AESF.

#### 10.7.3.1.3 Elaboración y presentación de la solicitud de modificación

La solicitud de modificación de material rodante ferroviario que deberá presentarse a la AESF constará de los siguientes datos y documentación:

- a) Datos del solicitante.
- b) Datos identificativos de los vehículos afectados por la modificación, incluyendo el número europeo del vehículo (NEV) de los mismos.
- c) Conformidad del propietario del vehículo y de la EEM que aparecen asignados al mismo, con la modificación que se pretenda introducir.
- d) Informe técnico descriptivo de la modificación, al que se adjuntarán los siguientes documentos e información:
  - d.1) Relación de las características técnicas de los equipos y/o componentes fundamentales correspondientes a sus estados original y modificado previstos.
  - d.2) Planos, esquemas, u otros documentos técnicos definitorios de la modificación.
  - d.3) Número o identificador de la modificación. Para cada uno de los vehículos referidos en el epígrafe b) anterior, se aportará el historial de modificaciones que forma parte del respectivo expediente de mantenimiento, explicando su relación con otras modificaciones realizadas anteriormente en el mismo, si las hubiera.
  - d.4) Plan de fabricación y plan de ensayos, cuando proceda.
  - d.5) Repercusión previsible de la modificación sobre el plan de mantenimiento del vehículo.
  - d.6) En el caso de que el vehículo o subsistema pueda estar sujeto a excepciones a la aplicación de las ETI, o posibles disconformidades con las normas nacionales, se enviará junto a los documentos técnicos sobre la modificación, como mínimo, una descripción de las partes del subsistema sujetas a la excepción o no conformidad, acompañado de un informe justificativo. Se deberá hacer referencia al párrafo de la ETI de aplicación, o norma nacional concreta, al que se refiera la excepción o no conformidad
- e) Cuando la modificación suponga afección a alguno de los componentes o conceptos fundamentales de seguridad incluidos en el Anexo de esta guía, se

aportará asimismo el pronunciamiento del solicitante, basándose en el juicio de expertos, sobre si la modificación puede considerarse significativa o no.

f) En caso de que la modificación se considerase significativa, se acompañará de un proceso de gestión del riesgo derivado de la implementación de la modificación propuesta y del informe del organismo de evaluación sobre el proceso de análisis y evaluación del riesgo, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Ejecución (UE) nº 402/2013. Dicho informe podrá completarse una vez finalizado el proceso de verificación de la modificación.

g) Asimismo, el solicitante aportará una propuesta de aquellas características y/o ensayos que van a requerir nueva verificación, que será llevada a cabo por parte de un organismo designado o notificado, según el caso.

h) Cuando los solicitantes dispongan de un sistema de gestión de la seguridad regulado en el Reglamento sobre seguridad en la circulación de la RFIG o bien se trate de EEM certificadas de conformidad con el citado Reglamento (UE) nº 445/2011, la solicitud deberá contener la conformidad del órgano responsable de la seguridad ferroviaria de la empresa o EEM certificada.

i) Informe de conclusiones del solicitante, que irá suscrito por un responsable, debidamente acreditado para estas competencias por su organización, en el que, a su juicio y en congruencia con los documentos antes mencionados, se concluya la necesidad, o no, de someter el material modificado a una nueva AES.

La solicitud de modificación de material rodante ferroviario se remitirá a la AESF en todos los casos, independientemente de la consideración final acerca de la necesidad o no de nueva AES, y siempre antes de iniciar el proceso de implantación de la modificación. La AESF podrá solicitar informe del administrador de infraestructuras ferroviarias, que se presumirá favorable si no lo emite dentro del plazo establecido.

Además de lo anterior, el solicitante, por sí mismo o bien a través del poseedor o EEM del vehículo modificado, debería informar a toda empresa ferroviaria que vaya a explotar el vehículo, acerca de la modificación introducida en el mismo, con el fin de que esta pueda realizar la correspondiente evaluación a través de su sistema de gestión de la seguridad sobre si la entrada en funcionamiento del vehículo modificado supone un cambio significativo, bien para el sistema ferroviario en su totalidad o bien sobre su sistema de gestión de la seguridad en particular.

#### 10.7.3.1.4 Modificaciones que precisan una nueva AES

En el caso de que la AESF, a la vista de la petición efectuada, decida que es necesaria una nueva AES, se seguirá el procedimiento general regulado en los capítulos II y III del título VI de la Orden FOM/167/2015.

Cuando se inicie la ejecución de los trabajos para la modificación del vehículo, quedarán suspendidas las autorizaciones de entrada en servicio correspondientes al mismo. La nueva AES supondrá la revocación de la anterior autorización de la que se dispusiera.

#### 10.7.3.1.5 Modificaciones que no requieren una nueva AES

En el caso de que la AESF, a la vista de la petición efectuada, decida que no es necesaria una nueva AES, seguirá vigente la autorización ya existente, siendo incorporada la petición al historial del vehículo. En este caso será suficiente que el solicitante remita a la AESF:

- a) La documentación técnica final de la modificación.
- b) Los resultados de las pruebas o informes de verificación del organismo designado o notificado de las características afectadas por la modificación.
- c) El nuevo plan de mantenimiento, aprobado por la EEM. En caso de no considerarse necesaria la modificación de dicho plan, se justificará debidamente.

La AESF solicitará las informaciones adicionales o aclaratorias que pudiera estimar necesarias, y asimismo podrá suspender y revocar en cualquier momento la autorización precedente de entrada en servicio si del análisis de la documentación remitida considerara que la citada autorización no queda adecuadamente justificada en la nueva situación, como consecuencia de la modificación a introducir.

Si con motivo de la modificación es necesaria la variación de alguno de los datos que figuran en la sección 5ª del Registro Especial Ferroviario (REF) y/o en el ERATV, se deberá cumplimentar el correspondiente formulario de registro en el REF.

Para los expedientes de modificación que no requieran la emisión de una nueva AES, pero sí requieran la actualización de los datos que figuran en la autorización de puesta en servicio y/o de circulación disponible en virtud del régimen establecido en la Orden FOM/233/2006, debido a la inclusión de nuevas restricciones, límites y

condiciones de uso, o nuevas características técnicas del material rodante, se procederá a la sustitución de la anterior autorización por una nueva autorización en la cual se indicarán las características de la infraestructura de la red de manera genérica y no circunscrita exclusivamente a una o varias líneas en particular.

#### 10.7.3.1.6 Modificaciones experimentales o prototipos

No tendrán la consideración de vehículos modificados aquellos en los que, de manera temporal y para comprobar su funcionamiento, se les hayan realizado modificaciones para instalar elementos nuevos con fines experimentales.

La realización de las pruebas con el vehículo al que se le ha introducido algún cambio conlleva la imposibilidad de prestar servicio comercial fuera del horario de pruebas, quedando esta imposibilidad corroborada con la suspensión de la correspondiente autorización de la que disponía el vehículo. No obstante, podrá darse el caso en el que las condiciones de uso de la autorización de la que disponga el vehículo en cuestión permitiesen realizar tales pruebas sin necesidad de suspender su autorización, en cuyo caso sería necesario demostrar que no existe ningún riesgo en la circulación.

Todo ello sin perjuicio de la necesidad de la realización, por parte del proponente del cambio en el vehículo con carácter experimental, del proceso de gestión del riesgo y evaluación independiente, establecido por medio del Reglamento de Ejecución (UE) nº 402/2013.

En el caso de que, después del periodo de pruebas, se decidiera no volver a reponer el vehículo a su configuración inicial, sería de aplicación el régimen establecido en la Orden 167/2015, debiendo presentarse el correspondiente expediente.

#### 10.7.3.1.7 Aplicación al proyecto de aplicación de una locomotora a GNL

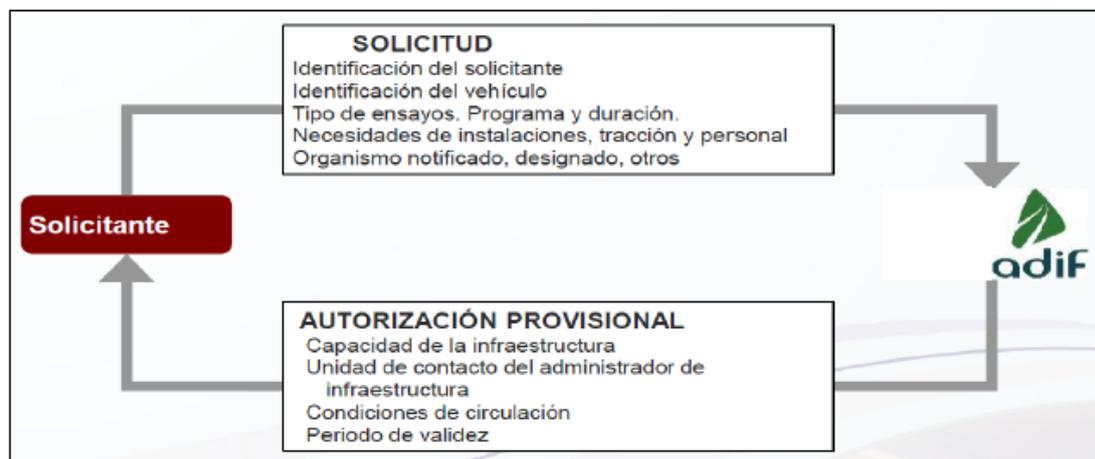
El proceso de acreditación y puesta en servicio de material motor modificado es esencial para la implementación de la tracción ferroviaria con GNL en las maniobras en entorno portuario, pero no obligatorio en fase de pruebas.

Podemos distinguir dos casos:

- **Construcción de un prototipo:**

En este caso será suficiente obtener una Autorización Provisional de Circulación, emitida por Adif cuando la unidad vaya a circular por infraestructuras de su

competencia. Esta autorización permite realizar los ensayos y pruebas necesarios para el desarrollo del prototipo

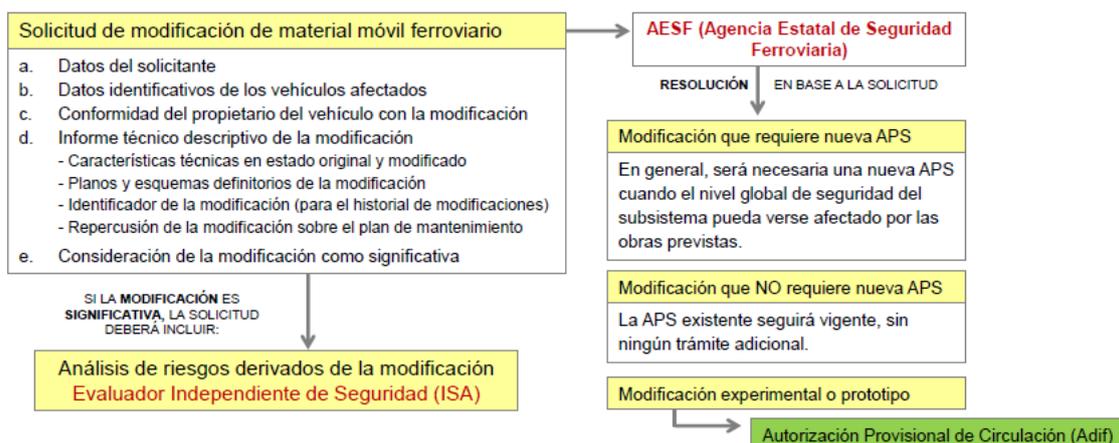


**Figura 120 Proceso obtención autorización (uso prototipo)**

• **Desarrollo para explotación comercial:**

Si la modificación va a ser implementada para su explotación comercial, deberá realizarse el procedimiento descrito en el presente documento, determinando cuales son los elementos que pueden tratarse como una modificación significativa y por tanto requerir la realización de:

- Análisis de riesgos
- Informe de un evaluador independiente



**Figura 121 Proceso obtención autorización (para uso de explotación comercial)**

De la revisión del listado del Anexo 2, los componentes que pueden requerir la realización de un informe de un organismo de evaluación son los siguientes:

## 8. SISTEMA DE. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

### 8.1. SISTEMA DE CONTROL DE INCENDIOS (incluyendo software)

Habría que analizar la necesidad de adaptar el sistema existente al uso de GNL, y extender el sistema a los depósitos GNL en caso necesario.

El nuevo sistema de detección de fugas de gas, deberá integrarse en el sistema de alarmas de la locomotora.

### 8.5. COMPARTIMENTACIÓN

En principio la compartimentación existente se mantiene inalterada, pero los depósitos de GNL añadidos pueden implicar alguna modificación o ampliación.

## 10. OTROS CONCEPTOS Y SISTEMAS

### 10.2. DINÁMICA DE MARCHA

La sustitución del depósito de gasóleo por depósitos de GNL, así como las modificaciones realizadas en el motor, cuadros eléctricos etc...pueden provocar una variación en el peso total y la distribución de pesos en la locomotora, y en consecuencia en su CDG.

Las actividades previstas por el Bureau Veritas para la Acreditación de la locomotora modificada consisten en:

- Evaluación de conformidad ETH's (Especificación Técnica de Homologación)
- Evaluación y valoración de riesgo

En los dos casos, la ingeniería que realice el proyecto redactará los informes necesarios para que Bureau-Veritas pueda tramitar ante la AESF las acreditaciones necesarias.

Además de las actividades anteriores, es posible que se solicite por parte de la AESF, la verificación por una 3ª parte del estudio de riesgos del sistema de GNL en su conjunto. Este estudio debe realizarse por una empresa distinta a la ingeniería que realiza el proyecto.

En caso necesario, se realizarán los estudios de seguridad necesarios para validar la ubicación e instalación de los depósitos criogénicos, siempre de acuerdo con los requerimientos realizados por la AESF.

En el Anexo 5 del presente documento, se adjunta el listado de los aspectos considerados en el análisis de riesgos realizado para el proyecto de sustitución del motor diésel por un motor de gas natural sobre un automotor de la Serie 2600 el año 2017.

## 11. Integración

### 11.1. Análisis del mercado de empresas integradoras

Se ha realizado un análisis del mercado de las distintas empresas que podrían realizar la integración del sistema. Se valorarán la experiencia, la capacidad técnica y las referencias en proyectos similares

#### 11.1.1 Antecedentes

La seguridad ferroviaria está presente en todos los elementos que componen el sistema ferroviario, desde las líneas a los trenes que circulan sobre ellas, al personal o las normas y procedimientos que regulan su explotación. Todos los agentes del sistema, desde los más directamente implicados -como los administradores de la infraestructura o empresas ferroviarias- a los que les prestan servicios -como entidades encargadas de mantenimiento, centros o fabricantes-, participan en lograr la seguridad, cada cual desde su ámbito de competencias.

La **Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria** – AESF, es una pieza más dentro de ese sistema, en el que viene a ejercer el papel de autoridad responsable de la seguridad ferroviaria, tal y como se desprende de la Directiva 2004/49 de seguridad ferroviaria, para la Red Ferroviaria de Interés General.

La AESF tiene entre sus competencias el conceder la homologación y, en su caso, suspenderla y revocarla, de los centros de mantenimiento, así como la certificación de las entidades encargadas de mantenimiento.

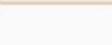
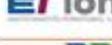


De conformidad con la Orden FOM 233/2006, los centros de mantenimiento de material rodante ferroviario han de disponer de una homologación emitida por la autoridad de seguridad.

### 11.1.2 Empresas Integradoras

Para la selección de la empresa integradora, se ha tenido en cuenta la necesidad de que estuviera homologada por la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria – AESF.

Las empresas homologadas por la AESF para la realización de trabajos de mantenimiento de material rodante ferroviario son las siguientes:

 <b>REDALSA</b> REDALSA	 <b>BTREN</b> BTREN MANTENIMIENTO FERROVIARIO, S.A.	 <b>FERROVIAS ASTUR, S.A.</b>
 <b>MANFEVIAS</b>	 <b>COMASFER</b>	 <b>FUNDACIÓN DOS FERROCARRILES DE GALICIA</b>
 <b>ACCIONA</b> ACCIONA INFRAESTRUCTURAS S.A.	 <b>CONSTRUCCIONES Y AUXILIAR DE FERROCARRILES, S.A.</b>	 <b>GMF, S.L.U.</b>
 <b>ACTREN</b> ACTREN MANTENIMIENTO FERROVIARIO, S.A.	 <b>CONTRATAS INTERVIAS DEL LEVANTE, S.L.</b>	 <b>INGENIERÍA DE MAQUINARIA FERROVIARIA, S.A.</b>
 <b>AGRUPACIÓN GUINOVART OSH, S.A.</b>	 <b>DESARROLLOS DE TECNOLOGÍA AVANZADA, SL</b>	 <b>INVATRA ALCÁZAR, S.L.</b>
 <b>AIR-RAIL, S.L.</b>	 <b>ENOMAR, S.A.</b>	 <b>IRVIA MANTENIMIENTO FERROVIARIO, S.A.</b>
 <b>ALBITREN MANTENIMIENTO Y SERVICIOS INDUSTRIALES, S.A.</b>	 <b>ERION MANTENIMIENTO FERROVIARIO, S.A.</b>	 <b>LEVEN DESARROLLOS, S.L.</b>
 <b>ALSTOM TRANSPORTE, S.A.</b>	 <b>FCC CONSTRUCCIÓN, S.A.</b>	 <b>MAQUIVIAS, S.A.</b>
 <b>ARMF</b>	 <b>FERROCARRILS DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA</b>	 <b>MATISA MATERIEL INDUSTRIEL, S.A.</b>
 <b>BOMBARDIER EUROPEAN HOLDINGS, S.L.U.</b>	 <b>FERROVIAL AGROMÁN, S.A.</b>	 <b>NERTUS MANTENIMIENTO FERROVIARIO Y SERVICIOS, S.A.</b>
 <b>PARRÓS OBRAS, S.L.</b>	 <b>TALLERES ALEGRÍA, S.A.</b>	
 <b>PATENTES TALGO, S.L.</b>	 <b>TALLERES CAÑO</b>	
 <b>PLASSER ESPAÑOLA, S.A.</b>	 <b>TECSA EMPRESA CONSTRUCTORA, S.A.</b>	
 <b>PRODUCCIONES FERROVIARIAS, S.L.</b>	 <b>TALLERES MECÁNICOS CELADA, S.A.</b>	
 <b>PROSUTEC, S.L.</b>	 <b>TALLERES MELEIRO, S.A.</b>	
 <b>RAILMAC, S.A.U.</b>	 <b>TALLERES JUNDI, S.L.</b>	
 <b>RENFE FABRICACION Y MANTENIMIENTO, S.A.</b>	 <b>TALLERES ROBLES, S.A.</b>	
 <b>SELF-RAIL IBERICA, S.L.</b>	 <b>TRADINSA</b>	
 <b>SIDERÚRGICA REQUENA, S.A.</b>	 <b>TRANSERVI</b>	
 <b>SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MONTAJES INDUSTRIALES, S.A. (SEMÍ)</b>	 <b>VEFCA, S. L.</b>	
	 <b>VIAS Y CONSTRUCCIONES, S.A.</b>	

**Figura 122 Empresas homologadas por la AESF**

De todas las empresas anteriores se seleccionaron las tres siguientes, por ser las que mejor se adaptaban a las necesidades del proyecto.

- ARMF
- DTA
- TRADINSA

Si bien todas las empresas anteriores demostraron capacidad y experiencia para desarrollar el proyecto, ARMF fue la seleccionada, al ser la única con experiencia previa en la transformación de locomotoras diésel a funcionamiento con gas natural.



**Material:** Integración del proyecto

**Contacto:**

Manuel Ramos

Director

[mramos@armf.net](mailto:mramos@armf.net)

**ARMF Mantenimiento y Proyectos Ferroviarios, SL**

Talleres: Antiguos Talleres Renfe

Polígono Industrial "El Segre"

25191 LLEIDA (SPAIN)

+34973216441

<http://www.armf.net/>

## **11.2. Definición de los trabajos y materiales necesarios para la integración**

En este apartado se abordará la definición de los trabajos y materiales necesarios para la integración del motor y del depósito criogénico.

Se realizará un cronograma detallado en el que se indicarán las actividades a realizar para la integración del motor y del depósito criogénico a la locomotora.

### **11.2.1 Descripción General**

El objetivo es describir los trabajos necesarios para la transformación de la locomotora Tipo 310 para su funcionamiento con GNL.

Como se ha indicado anteriormente, se ha elegido la conversión del motor diésel a original de la locomotora (GM 645-8 E) mediante la utilización de un kit de conversión desarrollado por la empresa Energy Conversions Incorporated- ECI.

Mediante esta transformación, el motor pasará a funcionar con un ciclo Otto, utilizando un 100% de gas natural como combustible.

El informe se basa en la documentación técnica facilitada por los proveedores del sistema, en especial ECI (Energy Conversions Inc.) suministrador del kit de transformación a gas natural y Chart Industries proveedor de los depósitos criogénicos.

Se ha dividido en las siguientes partes:

- Conversión del motor diésel a gas natural
- Instalación de los depósitos de GNL
- Sistema de refrigeración
- Integración de sistema
- Ensayos de puesta en marcha
- Acreditación y puesta en servicio

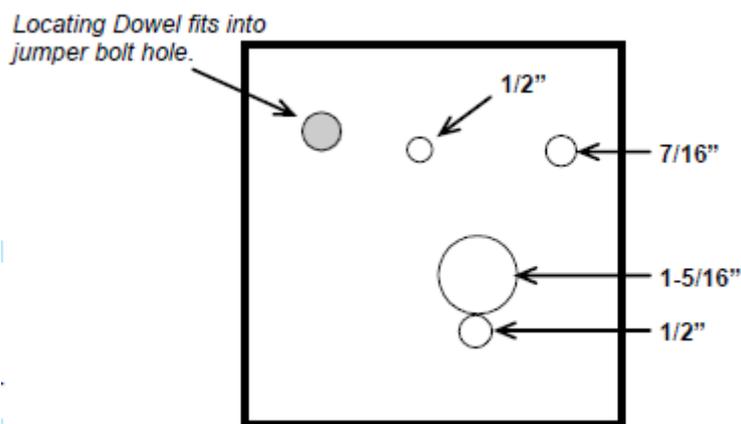
## 11.2.2 Conversión del motor diésel a gas natural

### 11.2.2.1 Preparación del motor

Durante todos los procesos de taladrado, es importante utilizar un aspirador de vacío que minimice la posibilidad de contaminación por virutas metálicas en el motor.

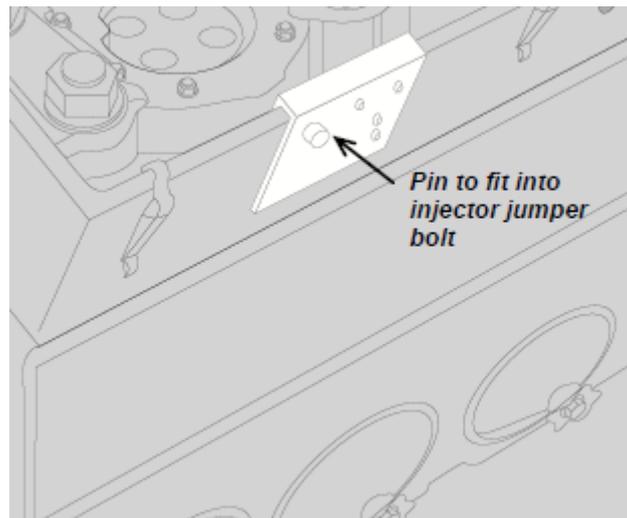
#### Taladrado para Load Blocks:

En la tapa de la culata deben realizarse taladros para el anclaje de los raíles de inyección de gas y otros elementos auxiliares. La plantilla para la realización de estos taladros forma parte del kit de transformación.



**Figura 123. Plantilla para los taladros de anclaje de los load blocks**

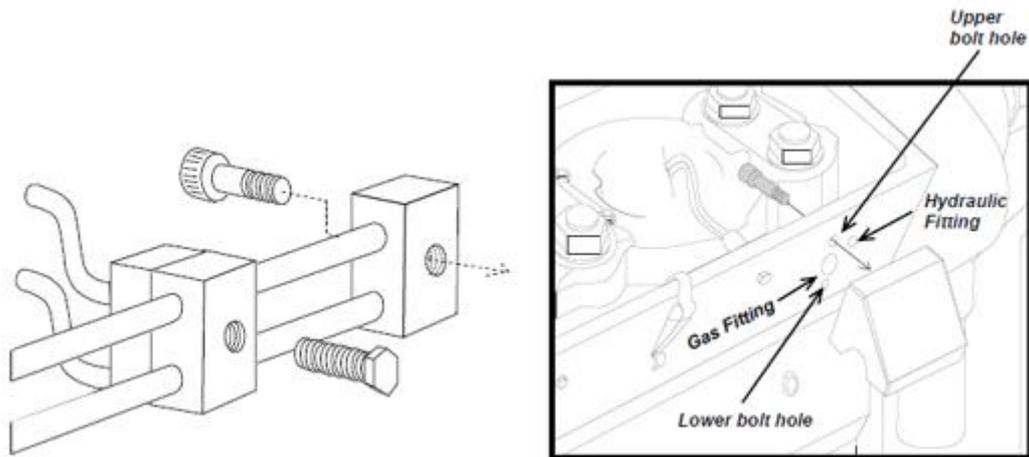
1. Retire el perno del conducto de combustible diésel de la culata e inserte la plantilla para los nuevos taladros de anclaje de acuerdo con la figura 124. Inserte el centrador de la plantilla en el agujero del perno original.



**Figura 124. Detalle de la instalación de la plantilla**

\*\*\* NOTA \*\*\* Se deberá asegurar mantener la plantilla apretada contra la base para garantizar la correcta realización de los taladros.

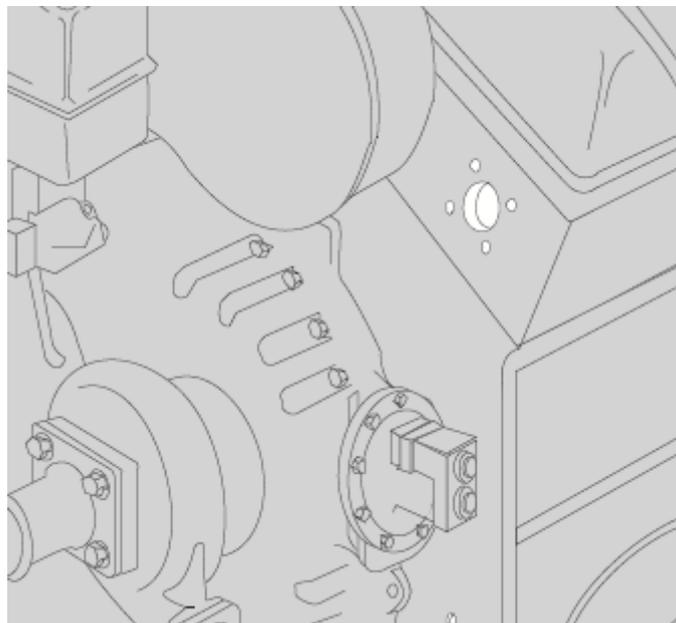
2. Perfore orificios piloto de 1/8 "a través de las guías de perforación de la plantilla.
3. Retire la plantilla y taladre los agujeros en los tamaños adecuados especificados en la Figura 123.
4. Elimine las rebabas de los agujeros.
5. Limpie cuidadosamente todas las astillas de taladrado restantes.
6. Retire el perno del riel de combustible del extremo, en el último cilindro en el lado izquierdo del motor.
7. Taladre el orificio roscado existente en el bloque del extremo del riel con un diámetro de 7/16".
8. Limpie cuidadosamente todas las astillas de taladrado restantes.
9. Utilice el perno de cabeza hueca suministrado (7/16 "X 2") para asegurar el load block del extremo. (Para detalles sobre la instalación del load block, vea el capítulo dedicado a los conductos de gas).



**Figura 125. Detalle de la instalación del load block**

**Taladrado para las GIV (Gas Inlet Valve):**

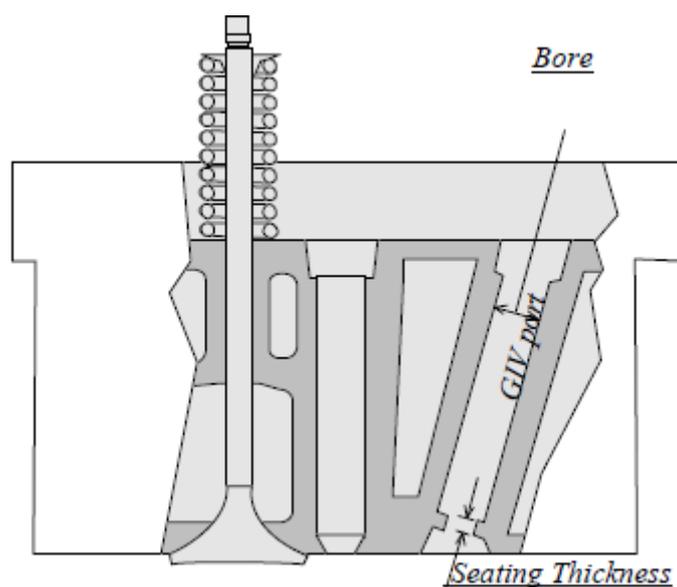
\*\*\* NOTA \*\*\* *Los dos lados de la tapa de la culata deben taladrarse como se muestra en la Figura 126, para acomodar el conector GIV y el sensor del cilindro. Los dos agujeros tienen las mismas dimensiones.*



**Figura 126. Localización de los anclajes**

1. Marque y centre los cinco agujeros en el centro de acuerdo con lo indicado en la figura 126.
2. Taladre agujeros piloto con broca de 1/8 ".





**Figura 128. Válvula de inyección de gas (GIV)**

<b>Diámetro interior</b>	1.1875"-1.1975"
<b>Espesor del asiento</b>	0.300" , 0.250" mínimo

**Pistón:**

Los pistones deben sustituirse por los proporcionados en el kit, con el fin de reducir la relación de compresión del motor hasta valores compatibles con la combustión del gas natural.



**Figura 129. Pistón del motor de gas natural**

La tolerancia de montaje de los nuevos pistones con el cilindro debe cumplir con los siguientes valores:

<b>Tolerancia nominal</b>	0.125"
<b>Tolerancia máxima</b>	0.145"
<b>Tolerancia mínima</b>	0.085"

### **11.2.2.3 Conductos de gas natural**

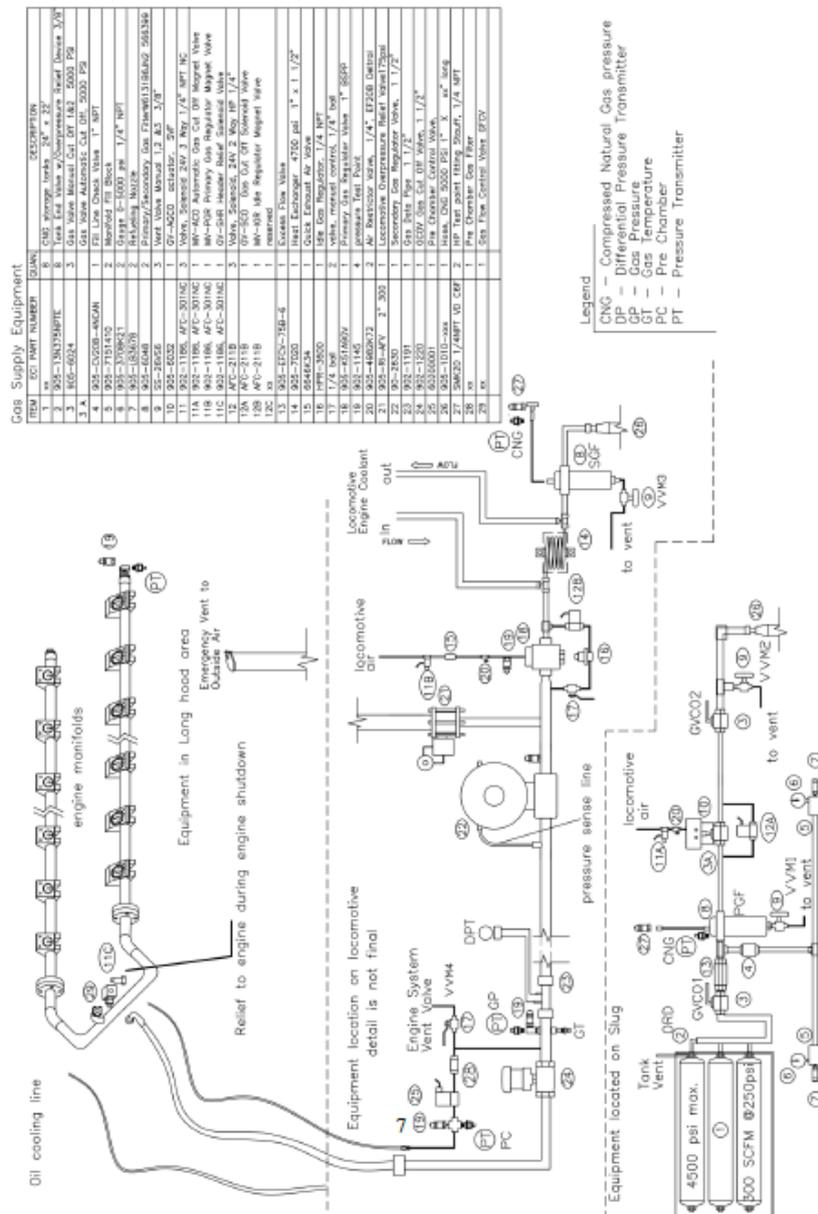
#### **Descripción general:**

El procedimiento de instalación del sistema de alimentación de gas natural se describe desde el punto de suministro al motor hasta el conjunto de depósitos de GNL.

Se recomienda ensamblar todas las tuberías principales y la manguera aguas arriba de la válvula de control de flujo de gas (GFCV) antes de soldar cualquiera de los soportes de tubería en su lugar, para que todo el ensamblaje pueda colocarse cómodamente, sin esfuerzos innecesarios en las juntas y conexiones.

Fije los soportes de la tubería a la base elegida mientras están unidos a la tubería. Luego desmonte la tubería antes de la soldadura final, para no derretir las mordazas plásticas de los soportes. Como cada aplicación será única, el enrutamiento de la tubería de suministro puede variar en la ubicación para adaptarse a su situación particular.

Para el montaje de los accesorios Swagelok, siga las pautas del fabricante y utilice las herramientas adecuadas.

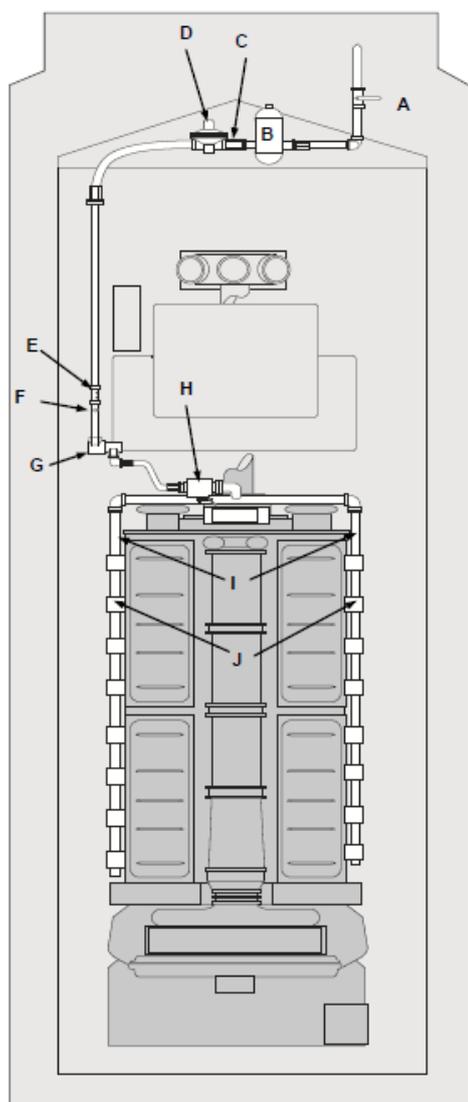


**Figura 130. Esquema del circuito de gas**

**Enrutamiento de las líneas de gas:**

La Figura 130 muestra un diseño general de las líneas de suministro de gas a baja presión.

Aunque es importante que se mantenga el orden de los componentes, su posicionamiento real y el enrutamiento de la tubería deben adaptarse a las necesidades del sistema.



- A. Manual shut-off valve (optional)
- B. Fuel filter assembly
- C. Vent valve
- D. Regulator
- E. Differential Pressure sensor
- F. Port for regulator sensor line
- G. Gas cutoff valve (GCOV)
- H. Gas flow control valve (GFCV)
- I. Gas headers (manifold)
- J. Load blocks

**Figura 131. Enrutamiento del circuito de gas**

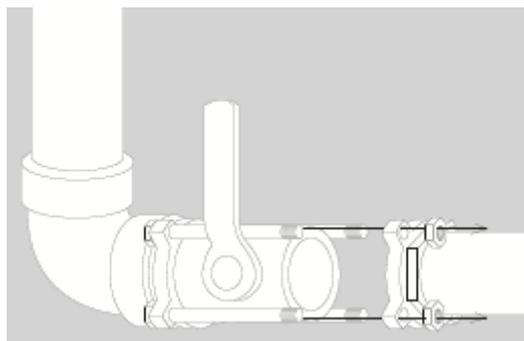
### **Instalación del circuito de gas:**

#### ***Conductos de gas***

1. La línea de combustible de conexión con los depósitos de GNL se realizará mediante una especial de GNC fabricada por Parker. La manguera de 1 "se conectará a la tubería de alta presión a través de la plataforma de la locomotora.
2. En general las fugas de gas provienen de los puntos de conexión. Se recomienda minimizar las conexiones doblando el tubo siempre que sea posible.

3. La válvula de cierre manual se ubicará en el circuito junto a una válvula de ventilación para liberar la presión para facilitar los trabajos de conexión y mantenimiento.

4. El sistema de acondicionamiento de combustible GNL debe instalarse en un lugar protegido. En general los depósitos de GNL se instalarán en el espacio de los depósitos de gasóleo.



**Figura 132. Válvula manual de cierre del suministro de gas**

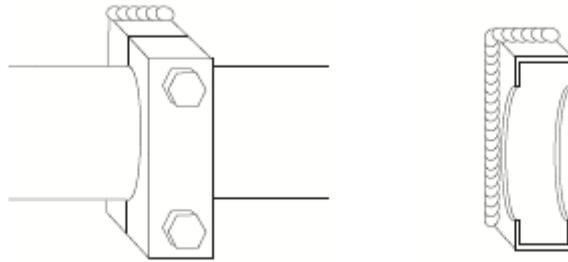
Una sección de tubería suministrada por ECI alberga las tomas y acoplamientos para varios sensores.

5. Verifique que la válvula de corte de gas (GCOV) esté firmemente instalada en el extremo aguas debajo de la sección de tubería suministrada.

6. Aunque el sensor de presión diferencial (DP) se encuentra preinstalado en la sección de tubería correspondiente se recomienda verificar la dirección de la flecha que indica el sentido de flujo en el sensor. (Gas en la dirección de suministro al motor). En sensor debe quedar accesible para facilitar las tareas de mantenimiento.

7. Conecte el extremo aguas arriba de este conjunto de tubería a la línea de suministro (ahora equipada con la válvula manual de corte de suministro y el filtro) garantizando el cierre correcto de todas las conexiones.

8. El conjunto puede modificarse para mejorar su funcionalidad. La ubicación de las tuberías no debe interferir con ninguna otra estructura existente. La tubería solo debe sujetarse mediante los soportes suministrados.



**Figura 133. Soportes para sujetar la tubería**

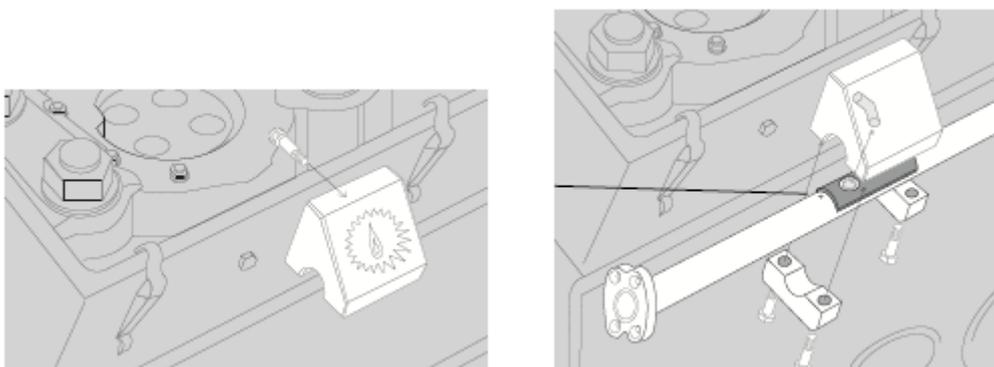
9. Coloque los soportes de los tubos en las posiciones deseadas, asegurando el ensamblaje mediante puntos de soldadura con el marco
10. Retire el conjunto de tubería y todas las piezas de plástico para evitar que se derritan o sufran daños al terminar de soldar el soporte.
11. Pinte las áreas soldadas con un color apropiado antes de reinstalar el conjunto de tuberías.
12. Reinstale la tubería y los soportes, y conecte la válvula manual de cierre de suministro de gas. Apriete todos los pernos por igual primero a 30 pies-lbs, y luego apriete hasta 65-70 pies-lbs.
13. Coloque la tubería de 1/2 "de diámetro desde el regulador de presión hasta el sensor de presión diferencial.

### ***Bloques de carga***

1. Después de taladrar todos los agujeros adecuados (ver capítulo 10.1.1 - Preparación del motor), lije la superficie de la tapa de la culata para prepararla para el cierre con las juntas tóricas de los bloques de carga. No dejar ningún resto de pintura o metal de más de 0,40 mm.
2. Inserte las juntas tóricas y coloque todos los bloques de carga sobre los soportes de la tapa de la culata. Ajustar el perno superior para permitir pequeños ajustes de alineación.

3. Suspenda el encabezado sin apretar (Ver Figura 134) dejando espacio para insertar las juntas.
4. Alinee los orificios del bloque de carga y el cabezal, posicionando las marcas de perforación del encabezado hacia arriba.
5. Alinee correctamente las juntas especiales de teflón entre los encabezados y los bloques de carga. Ajustar las abrazaderas, prestando mucha atención a la alineación entre el encabezado y la junta mientras se aprieta. Apretar los pernos solo lo suficiente para evitar que la tubería se mueva accidentalmente. Las tuberías pueden necesitar ser giradas ligeramente para alinearse con los pernos.

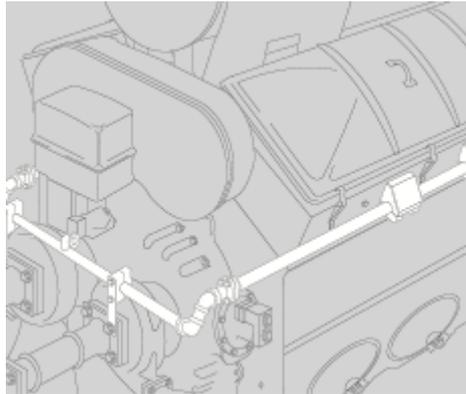
*NOTA: la marca de perforación en la parte superior del encabezado debe estar alineado con el borde frontal del bloque de carga, para garantizar que ambos lados tienen la longitud adecuada.*



**Figura 134. Instalación de los bloques de carga**

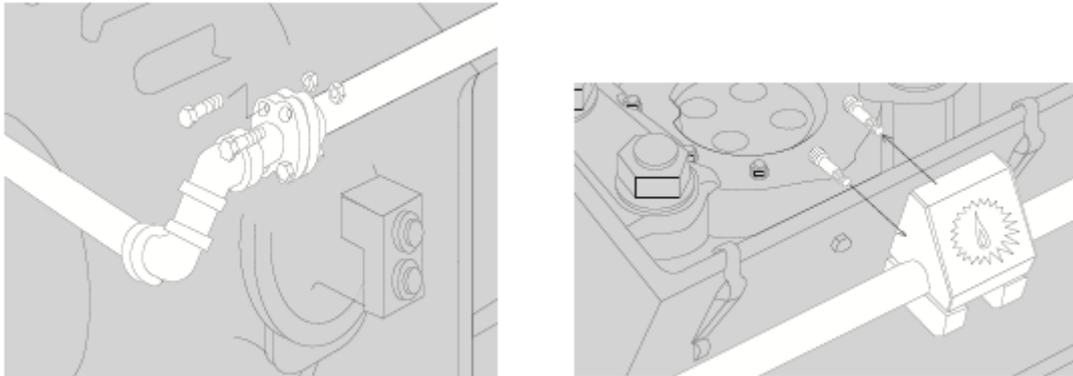
### ***Railes de gas***

1. Conecte los dos railes laterales con el conducto cruzado delante del motor. Inserte las juntas tóricas en las bridas los cuatro pernos de cada brida.
2. Sujete los soportes a las bombas de agua del motor utilizando los pernos superiores de las bombas. (Ver figura 135).



**Figura 135. Sujeción del rail a las bombas de agua**

3. Apriete todos los pernos de los bloques de carga a 30 pies-lbs y los pernos de la brida del colector a aproximadamente 40 pies.- lbs.



**Figura 136. Detalles de la instalación de los raíles de gas**

#### ***Gas Flow Control Valve (GFCV)***

La válvula de control de caudal de gas se instala justo en el centro del conducto de unión entre los dos raíles de gas. (Ver Figura 137).

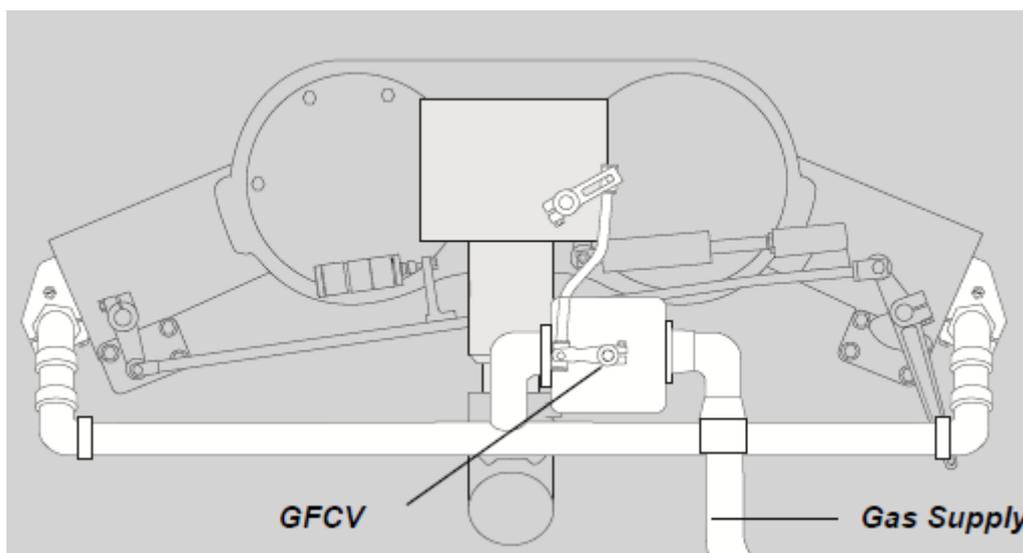


**Figura 137. Gas Flow Control Valve – GFCV**

1. Insertar la junta tórica en la brida.
2. Montar la válvula GFCV en la brida utilizando los 4 pernos suministrados. Apretar a 15-20 ft.-lbs.
3. Conectar la manguera de suministro de gas desde la válvula del corte GCOV hasta la GFCV. El extremo de la manguera es un conector cónico JIC. Apretar a 60 pies-lbs.

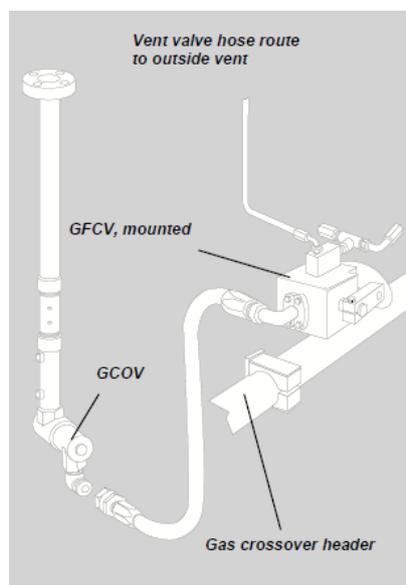
*Nota: En el caso de que la dirección del accesorio JIC (90°) deba ser ajustado, se tendrá cuidado de no apretar demasiado el accesorio para evitar daños en la válvula.*

4. El extremo de la válvula GFCV se conecta a través de una brida con una junta tórica montada directamente sobre la válvula. Aplicar un apriete a los cuatro pernos de 25-30 pies-lbs.

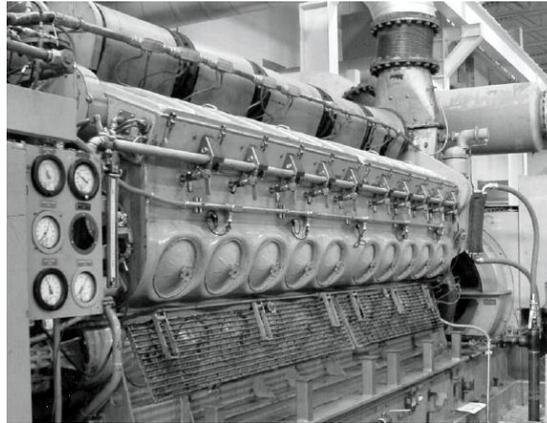


**Figura 138. Localización de la Gas Flow Control Valve - GFCV**

Una válvula de ventilación se instalará unida a la parte superior de la GFCV para purgar el exceso de gas y reducir la presión cuando el sistema de gas no está en uso. (Ver Figura 139). Como se describe en la sección sobre el enrutamiento de la manguera de aire, una manguera debe estar conectada desde la válvula a la toma de aire de admisión del motor o al filtro de aire.



**Figura 139. Conexión de la Gas Flow Control Valve – GFCV**

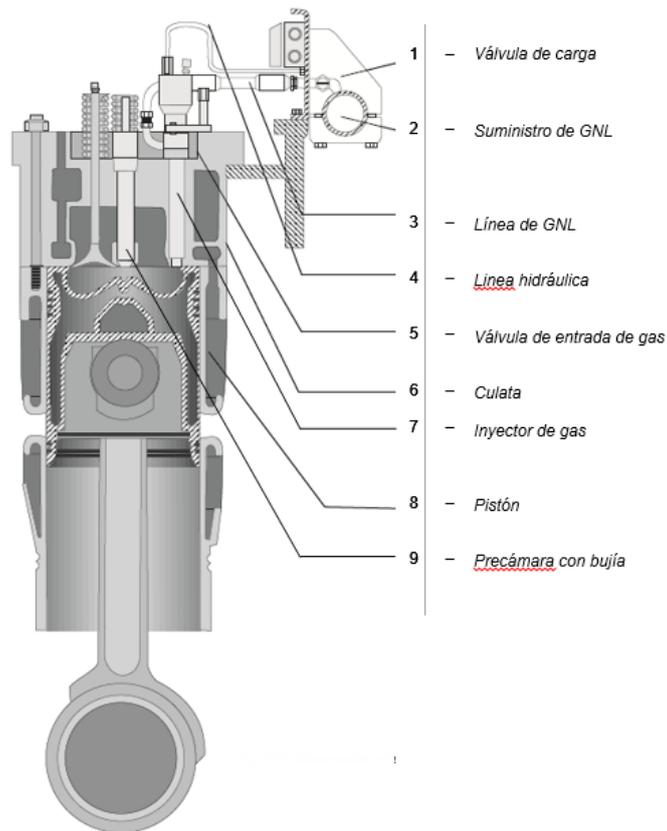


**Figura 140. Vista de los bloques de carga y los colectores de gas.**

#### **11.2.2.4 Power Pack**

##### **Descripción General:**

Se define como Power Pack, al conjunto de válvulas y conductos de gas que se añaden al motor para configurar su funcionamiento don gas natural.

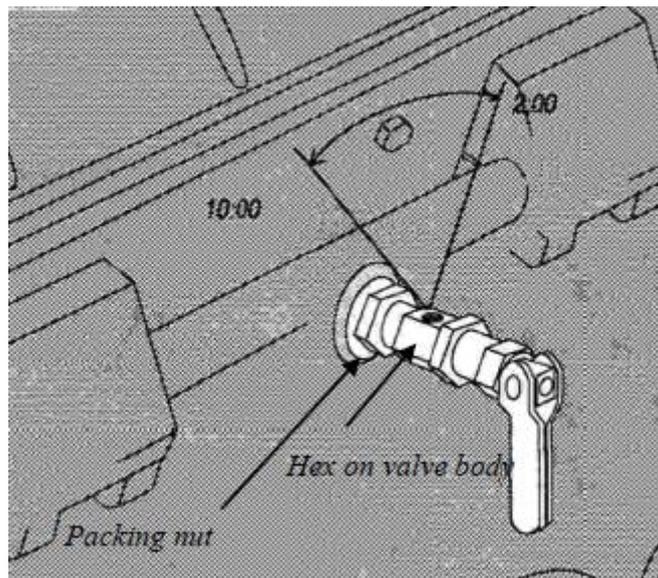


**Figura 141. Sección del ECI Power Pack.**

### **Montaje del Power Pack:**

#### ***Válvulas de alivio de presión del cilindro***

Las válvulas de alivio de presión suministradas por ECI, sustituyen a las válvulas de drenaje originales del motor. Reducen el exceso de presión del cilindro, que puede producirse debido a la alta presión de combustión. Estas válvulas no deben elevarse o tener fugas a ralentí o con baja carga.



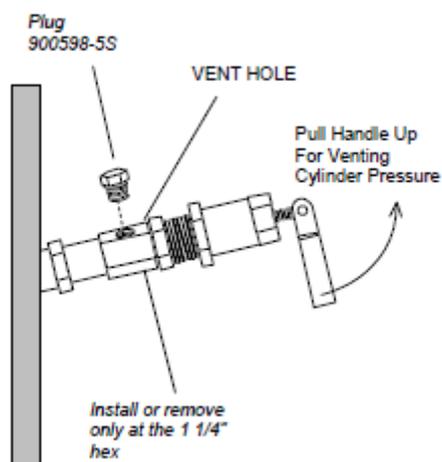
**Figura 142. Válvula de alivio de presión**

Cuando el motor está en funcionamiento la manija de la válvula debe permanecer floja para que no reduzca la presión de cierre del muelle.

El dispositivo puede estar equipado con un adaptador para que se pueda conectar un manómetro y medir la presión de disparo de la válvula. Esto es útil para diagnosis y análisis del balance del motor. El desplazamiento de la manija permite realizar medidas de presión, purgar el motor y realizar pruebas.

La elevación de las válvulas de alivio de presión del cilindro a cargas elevadas podría indicar un combustible de mala calidad, temperaturas de la caja de aire anormalmente altas o desequilibrio del motor. Si las válvulas de alivio se levantan frecuentemente con carga alta el sistema debe inspeccionarse para verificar su correcto funcionamiento.

El servicio y la calibración de las válvulas requieren personal debidamente equipado y capacitado.

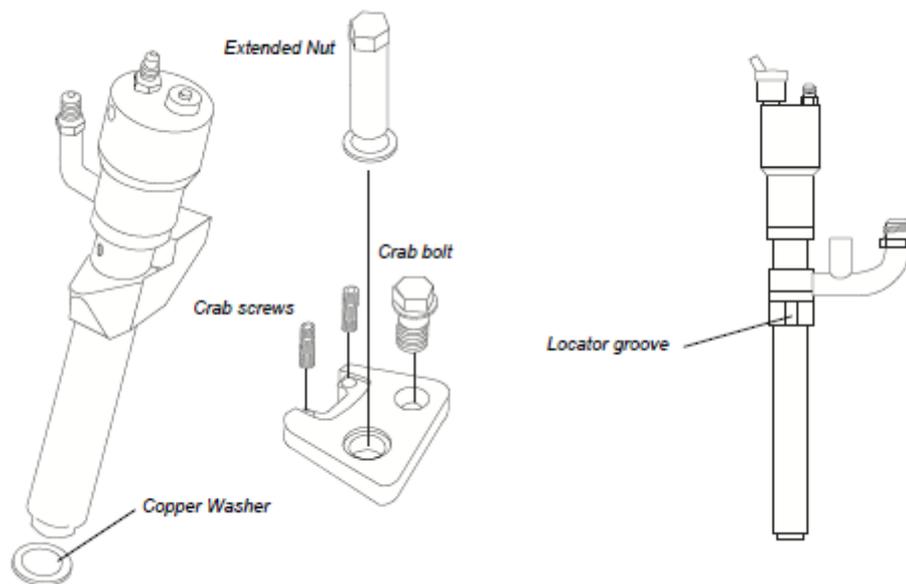


**Figura 143. Detalle de la instalación de la válvula de alivio**

Tras la instalación, uno de los dos puertos de prueba debería apuntar entre la posición de las 10 y las 2 en punto. (Ver Figura 143). Instalar el conector no. 900598-5s en el orificio de ventilación vertical superior, utilizando la arandela de cobre suministrada.

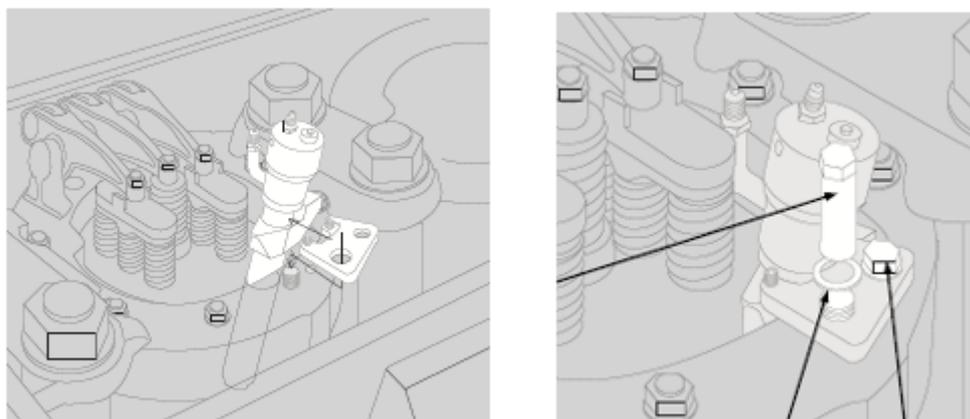
*NOTA: Cualquier accesorio o conector no suministrado por ECI instalado en el orificio de ventilación de la válvula de alivio podría causar daños y mal funcionamiento del sistema.*

### Instalación de las Gas Inlet Valve (GIV)



**Figura 144. Gas Inlet Valve**

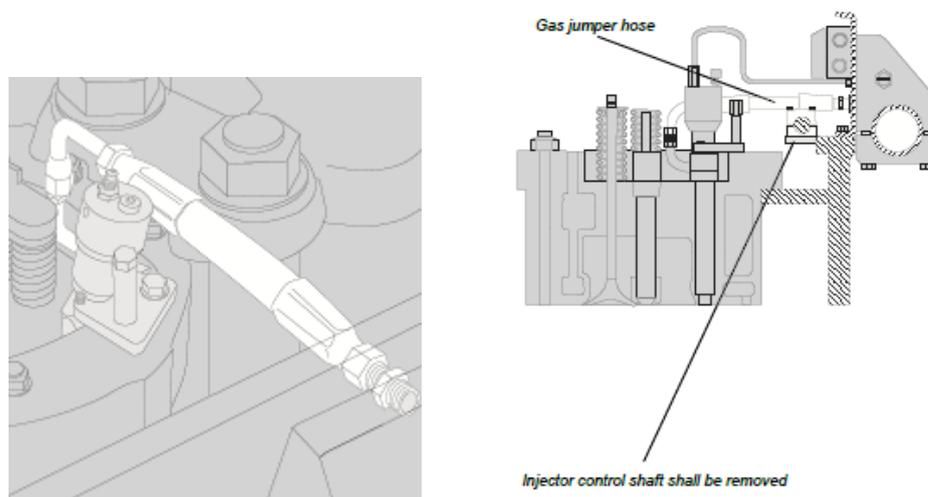
1. Limpie los puntos de entrada de gas en la culata si es necesario.
2. Usando grasa, pegue la arandela de cobre en la parte inferior de la GIV.
3. Alinee la ranura de posicionamiento de la GIV con la culata (ver Figura. 144).
4. Inserte la GIV parcialmente en el puerto de entrada de gas, coloque la placa de anclaje alrededor de la GIV como se muestra en la Figura. 145, luego continúe desplazando la válvula hacia abajo hasta que llegue a su asiento. Instale la arandela sobre el perno.



**Figura 145. Detalle montaje GIV**

5. Instale la tuerca alargada sobre la placa de anclaje. Apriete a 240 pies-lbs.

6. Enrosque la manguera de suministro de gas con los dedos, lo que facilitará su alineación. En general, es más sencillo conectar primero el lado del motor y luego al inyector.



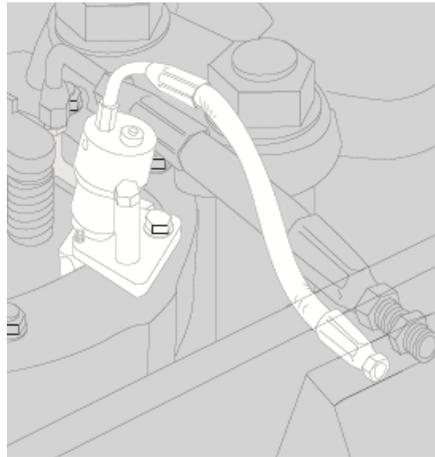
**Figura 146. Detalle montaje manguera de gas**

7. Use una llave de tubo y una extensión para apretar los pernos de la placa de anclaje. Apretar los dos tornillos alternativamente en incrementos de 90 grados hasta conseguir 22 ft-lbs de apriete. No sobrepasar el par de apriete solicitado. Si la operación no se realiza correctamente el cierre de la arandela con el asiento no estará garantizado pudiéndose producir problemas de fugas en un futuro.

8. \*\*\* *NOTA* \*\*\* *Asegúrese de utilizar la llave allen en todo el recorrido. Deben garantizarse los 22 ft-lbs de apriete para asegurarse el correcto funcionamiento de todo el sistema.*

9. Termine de apretar la manguera de gas usando la llave y la extensión adecuadas. Apriete estas conexiones a aproximadamente 40-45 ft-lbs. Preste atención al montaje del extremo de la válvula.

10. Pase el extremo recto de la manguera hidráulica hasta el punto de conexión del rail hidráulico. Conecte el extremo de 90º con la conexión hidráulica de la válvula GIV. Apriete ambos lados a 15-17 ft.-lbs.



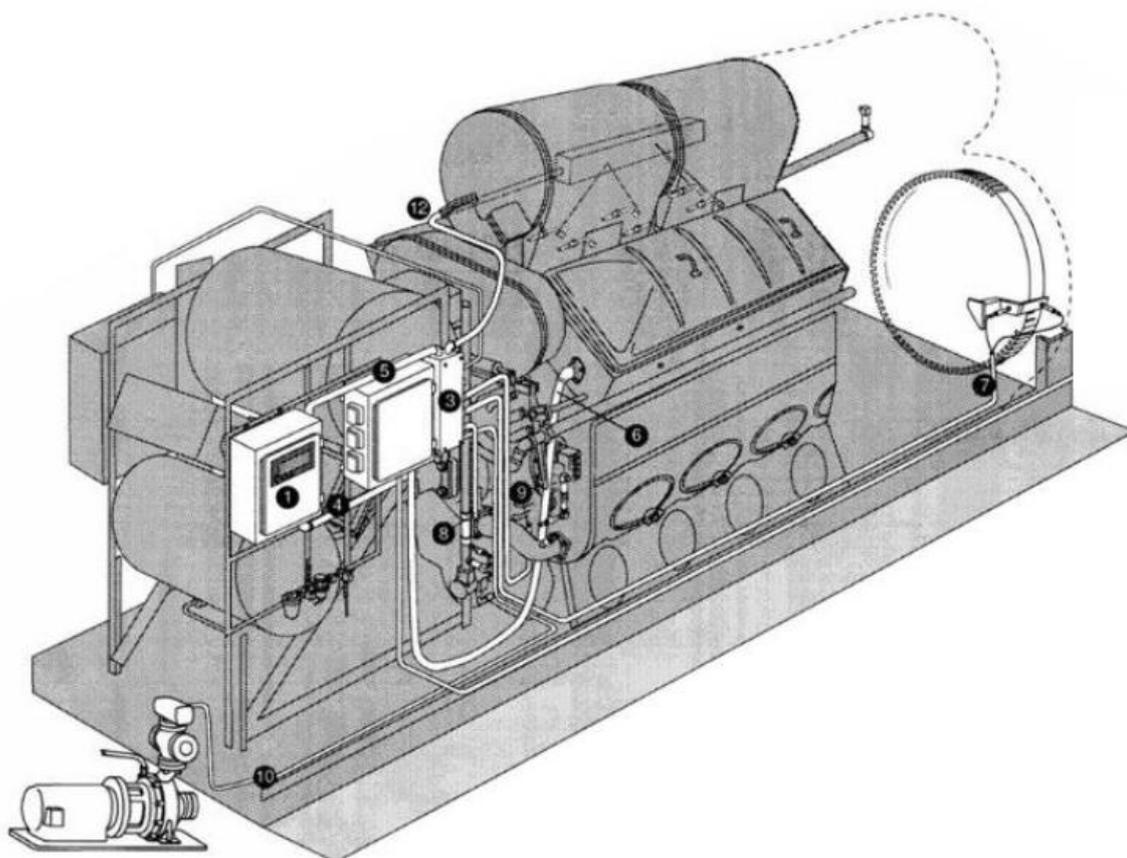
**Figura 147. Instalación de la manguera hidráulica**

PART	TORQUE (FT. LBS.)
EXTENDED NUT	240
CRAB BOLT	80
CRAB SCREWS	22
GIV GAS HOSE	40-45
GIV HYDRAULIC LINE	15-17

**Tabla 33 Par de apriete para en conexionado de la válvula GIV**

### 11.2.2.5 Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico del kit de transformación está formado por los siguientes elementos:



**Figura 148. Componentes eléctricos del kit**

- |                              |                                       |                                      |
|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Engine control unit (ECU) | 6. GIV wire bundle                    | 9. Air & water sensor conduit        |
| 3. Analog termination box    | 7. Flywheel sensor tee & flex conduit | 10. Water flow control valve conduit |
| 4. Digital conduit           | 8. Gas sensor flex conduit            | 12. Exhaust flex conduit             |
| 5. Analog conduit            |                                       |                                      |

#### **Sistemas eléctricos y electrónicos:**

Esta sección se usará junto con la sección de cableado y los dibujos del sistema. El enrutamiento del cableado será específico de cada proyecto. Los procedimientos

que se presentan a continuación son generales, no reglas estrictas, para enrutar el cableado eléctrico y electrónico del sistema. Las siguientes figuras indican un posible escenario para la ubicación y montaje de las cajas eléctricas y paneles incluidos en el sistema.

Puede ser necesario ubicar los componentes en el lado opuesto del lado del rack de accesorios, o en una ubicación alternativa. Sin embargo, la configuración que se muestra maximiza la utilidad y reduce el espacio necesario para la instalación de todo el sistema. Es el instalador quine debe proporcionar los conductos y accesorios adecuados a cada diseño. Siempre que sea posible se utilizarán tubos flexibles, sellados, herméticos y resistentes a las vibraciones.

*NOTA: El cableado debe estar convenientemente fijado al finalizar la instalación para garantizar la correcta protección de los cables. Un cableado mal sujeto, puede dañar los cables de su interior.*

### **Ubicación de los Cuadros Eléctricos:**

El sistema ECI está formado por cuatro cuadros eléctricos principales:

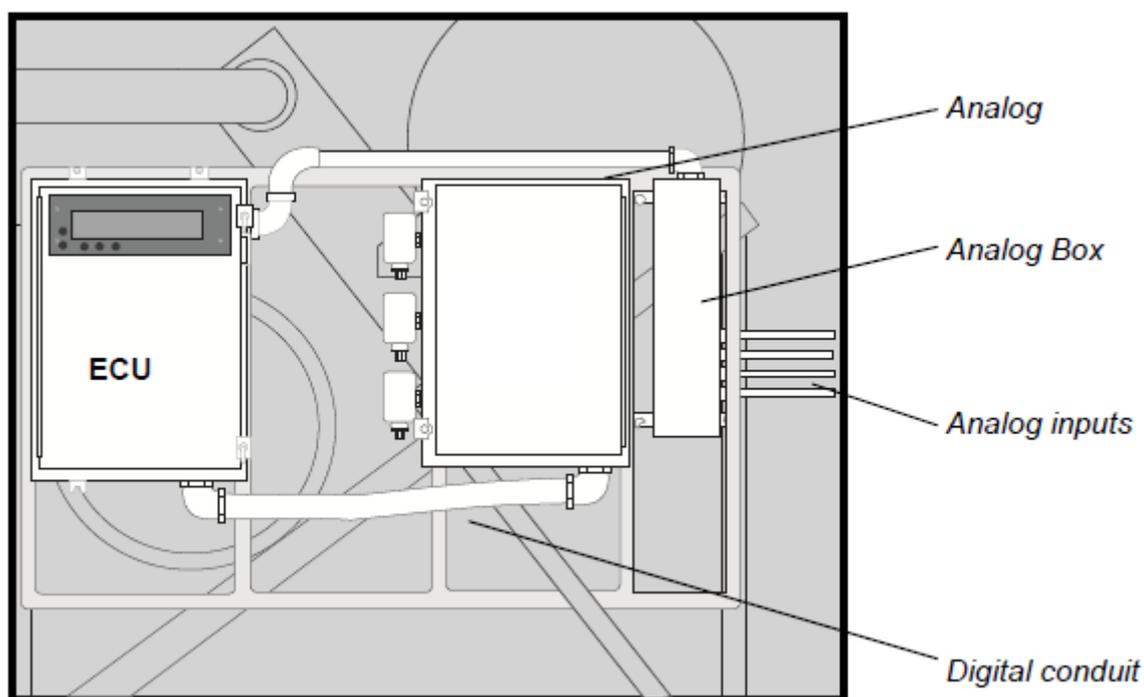
- Unidad de Control Electrónico (ECU)
- Caja de conexiones digitales
- Caja de conexiones analógicas
- Caja de encendido de chispa

Además de los módulos de pantalla en la cabina.

Lea todos los siguientes puntos antes de comenzar a instalar los cuadros para obtener una mejor comprensión de su diseño y relación entre ellos

1. Disponga los cuadros en la posición adecuada teniendo en cuenta su accesibilidad, la entrada de cableados y la facilidad de movimiento.
2. Si es necesario, construya un soporte adecuado para soportar los cuadros.

*NOTA: Se deberá considerar la accesibilidad de otros componentes en el diseño.*



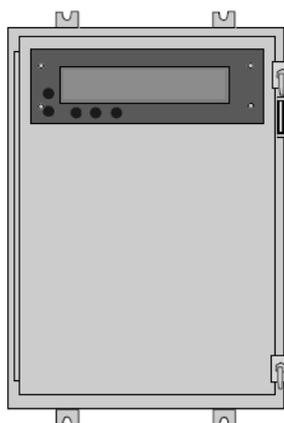
**Figura 149. Ubicación de los cuadros eléctricos**

#### **Electronic Control Unit (ECU):**

La Unidad de Control Electrónico controla las principales funciones del sistema de inyección de gas. Se trata de un sistema electrónico esencial para el funcionamiento del motor y que está sometido a un desgaste. Tenga especial cuidado al desembalar el sistema electrónico para evitar daños en el mismo.

La ECU debe instalarse en la parte trasera de la locomotora, en la parte superior del cuadro eléctrico junto a al cuadro que contiene el sistema de encendido por chispa.

1. Construya los soportes necesarios, para sujetar la parte superior e inferior del cuadro.



**Figura 150. Caja de la ECU**

### **Caja de conexiones digitales – DTB:**

La caja de conexiones digitales (DTB-Digital Terminal Box) proporciona una tira de terminales para la conexión de las señales digitales del sistema.

La DTB está diseñada para ser montada debajo del regulador de carga del motor.

1. Ubique adecuadamente la DTB en el espacio existente mediante un soporte adecuado. Es importante considerar el movimiento de la puerta de la caja y el cableado después del montaje.

### **Cableado digital:**

Una manguera flexible de 1 1/2 "(Figura 148, punto 4) aloja los cables de señal digital del sistema, va desde la ECU hasta la Caja de Conexiones Digitales.

1. Conecte el accesorio de conducto de 1 1/2 "desde la parte inferior del DTB.

2. Tienda un conducto flexible de 1 1/2 "desde la DTB hasta la caja derecha de la ECU.

3. Dirija el cableado de la GIV (Figura 148, punto 6) desde la caja de la ECU al lado derecho de la bancada derecha del motor.

### **Caja de conexiones analógicas:**

La caja de conexiones analógica está montada con soportes soldados al bastidor de accesorios, como se describe en la sección anterior sobre la colocación de cajas eléctricas.

1. Monte la caja en el soporte.

2. Monte un ángulo recto de 2 "u otro accesorio apropiado para sujetar el cableado.
3. Dirija el cableado hacia la caja izquierda de la ECU.
4. Perfore y coloque pasamuros para el cableado de acuerdo con las necesidades de diseño.

**Cableado analógico:**

El cableado analógico consiste en un tubo que conecta los cables de señal analógica del sistema y la caja de terminación analógica. En general es preferible montar primero todos los sensores y, a continuación, distribuir el cableado según sea necesario. El esquema del cableado se diseña para cada proyecto concreto y por tanto no está incluido en este informe.

Cableado de 1/2 "enrutado al conjunto del sensor del volante motor (7).

Cableado flexible de 1/2 "que contiene el sensor de presión diferencial de gas, el sensor de temperatura del gas y el sensor de presión de gas ubicado cerca de la válvula de corte de suministro gas (8).

Cableado de 1/2 que contiene el cable a los sensores de temperatura y presión de la caja de aire, y el sensor de temperatura del agua (9).

Cableado de 1/2 "enrutado a la válvula de control de flujo de agua ubicada en el conjunto de bomba / válvula de agua (10)

Cableado de 1/2 o 3/4 " al panel de control del motor, para alojar el transductor Kilowatt y la pantalla remota de la ECU (si corresponde) (11).

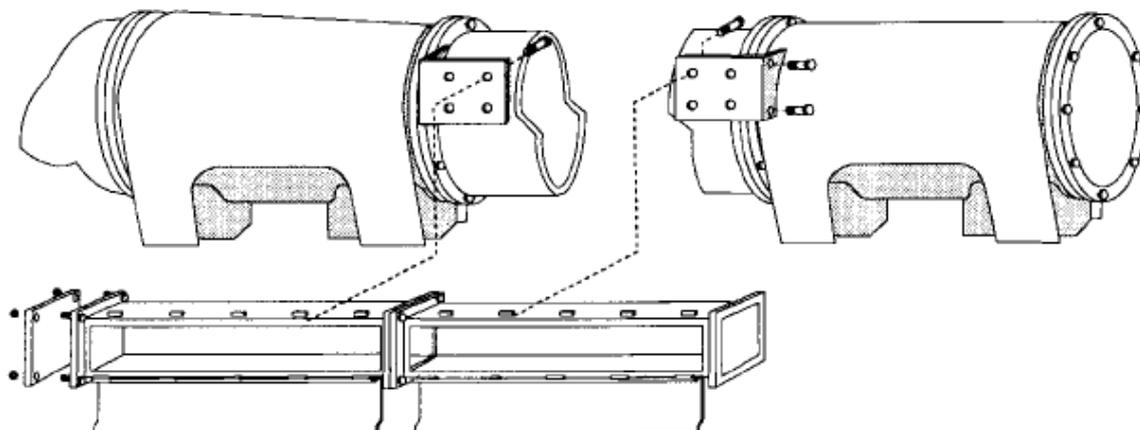
Cableado de 3/4 " (12), enrutado entre la caja analógica y el canal del conducto de escape.

*NOTA: Las conexiones del cableado deben estar apretadas cuando finaliza la instalación. Un cableado flojo puede dañar el cable.*

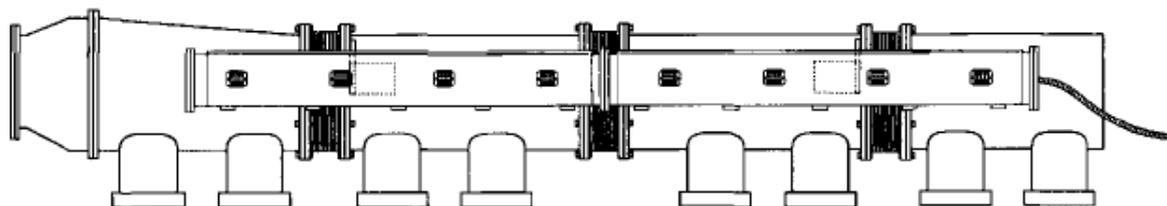
**Cableado de escape:**

El cableado de escape generalmente está instalado en el lado derecho del colector de escape del motor. En el colector de escape se instala una canaleta metálica especial utilizando los soportes existentes para distribuir el cableado. El cableado dotado de un tubo metálico flexible une la zona del escape a la caja analógica.

1. Monte dos soportes, uno en cada extremo, en el colector utilizando los pernos suministrados. Los motores de 8 y 12 cilindros tienen 2 soportes.
2. Marque y perfore los agujeros correspondientes a los orificios del soporte para montar el cableado.
3. Atornille la canaleta a los soportes para que las puertas se abran hacia abajo (es mejor para el servicio).
4. Conecte el cableado de la caja analógica al extremo frontal de la caja de cables con los conectores apropiados. Asegúrese de que las conexiones estén apretadas.



**Figura 151. Despiece del colector de escape y la canaleta metálica**

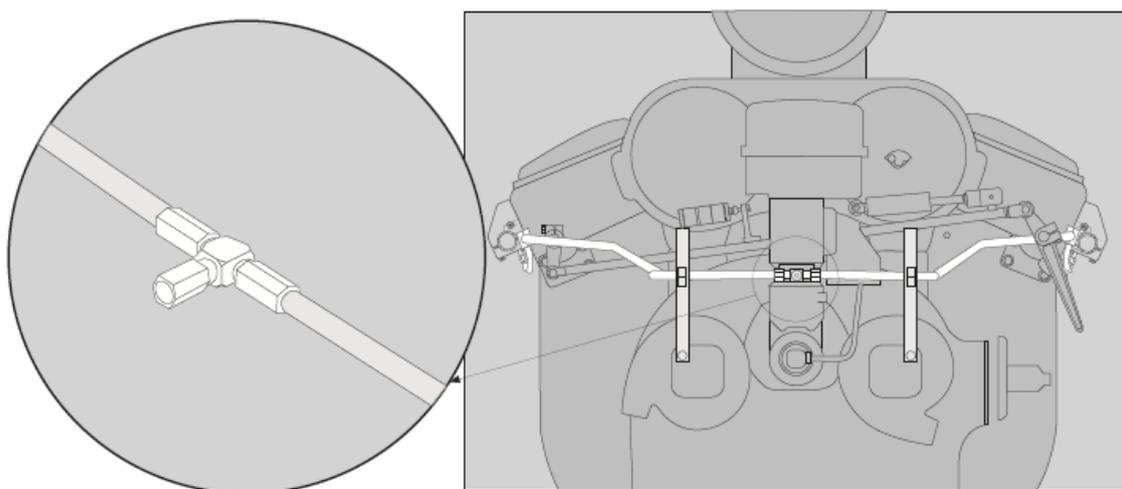


**Figura 152. Colector de escape y canaleta metálica montados**

### **11.2.2.6 Sistema Hidráulico**

**\*\*\* NOTA \*\*\*** *Es imprescindible mantener las líneas hidráulicas limpias para una operación adecuada. La suciedad puede causar fallos en las válvulas de entrada de gas (GVI)*

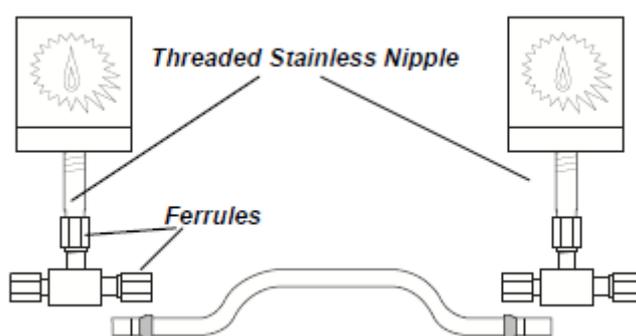
1. Instalar las piezas de tubo prefabricadas a los dos bloques de carga situados en la parte delantera del motor. Estas piezas se han diseñado para envolver el frente del bloque del motor y las carcasas. Los tubos referencia N° 955-1500 van al lado izquierdo del motor, los de referencia N° 955-1510 corresponden al lado derecho.
2. Coloque un racor en T en cada una de las boquillas del bloque de carga (excepto en el último cilindro de cada bancada en el que se colocará un codo). Apretarlos lo suficiente como para mantenerlos en su lugar. Estos racores de unión están diseñados de forma que una vez que la férula ha sido engarzada, no puede deslizarse fuera del racor.
3. Junte los tubos con un racor en T en el centro frente al primer cilindro en cada una de las dos caras del motor. Tenga en cuenta que puede ser necesario recortar los tubos para ajustarlos al espacio disponible. Tome medidas para cada sección de tubo asegurándose de que el tubo sea lo suficientemente largo para garantizar la inserción adecuada de cada racor. Para garantizar una junta libre de fugas el tubo debe estar como mínimo sobresaliendo 1/4 " del extremo de la férula.



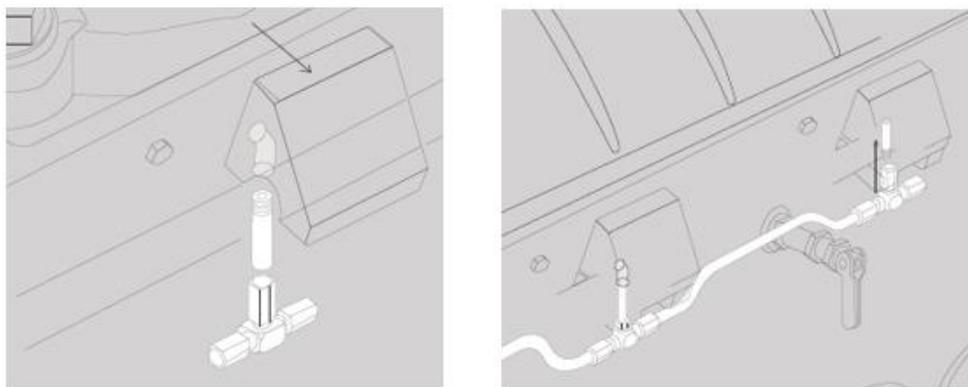
**Figura 153. Tubería hidráulica y soportes**

4. Comenzando por el extremo delantero del motor, deje la primera conexión en T en el manguito roscado de inoxidable. Retire la siguiente línea de ajuste en T e inserte el tubo con la tuerca y las férulas en el accesorio en forma de T y apriételo.

5. Instale el segundo racor (el siguiente en la línea) con los casquillos y tuerca en la tubería. Vuelva a conectar el racor en el siguiente bloque de carga. Continúe con el procedimiento hasta que todos los racores estén instalados.



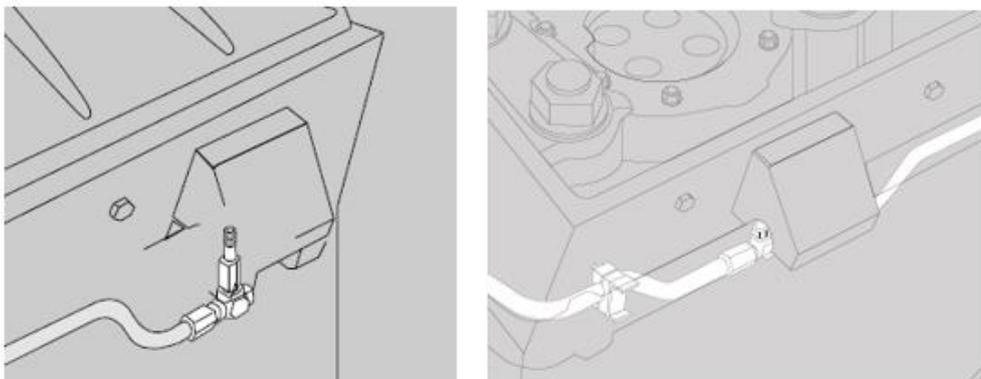
**Figura 154. Sistema hidráulico - racores**



**Figura 155. Conexión del sistema hidráulico**

6. Cuando todos los tubos estén preparados con los racores, hay que apretarlos convenientemente para minimizar los riesgos de fugas y prolongar su duración. Evitar sobre apretar los racores. Sujetar el cuerpo del racor correctamente con una llave y evitar aplicar un exceso de apriete al load block manteniendo la alineación del conjunto. Un racor nuevo debe apretarse con la mano, y aplicar luego con la llave un giro de 1 1/4”.

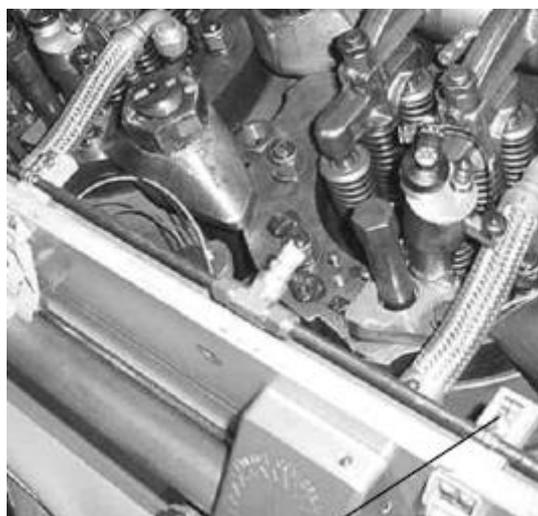
7. Utilizar soportes adecuados para fijar el tubo hidráulico a la culata (Ver Figura 156).



**Figura 156. Detalles del circuito hidráulico**

De manera similar, instale las líneas de retorno hidráulico en cada bancada del motor. Los tubos deben encajar correctamente sin esfuerzo, en caso necesario realizar las modificaciones necesarias para que así sea. Ver las figuras 154, 155 y 156 que indican la colocación adecuada.

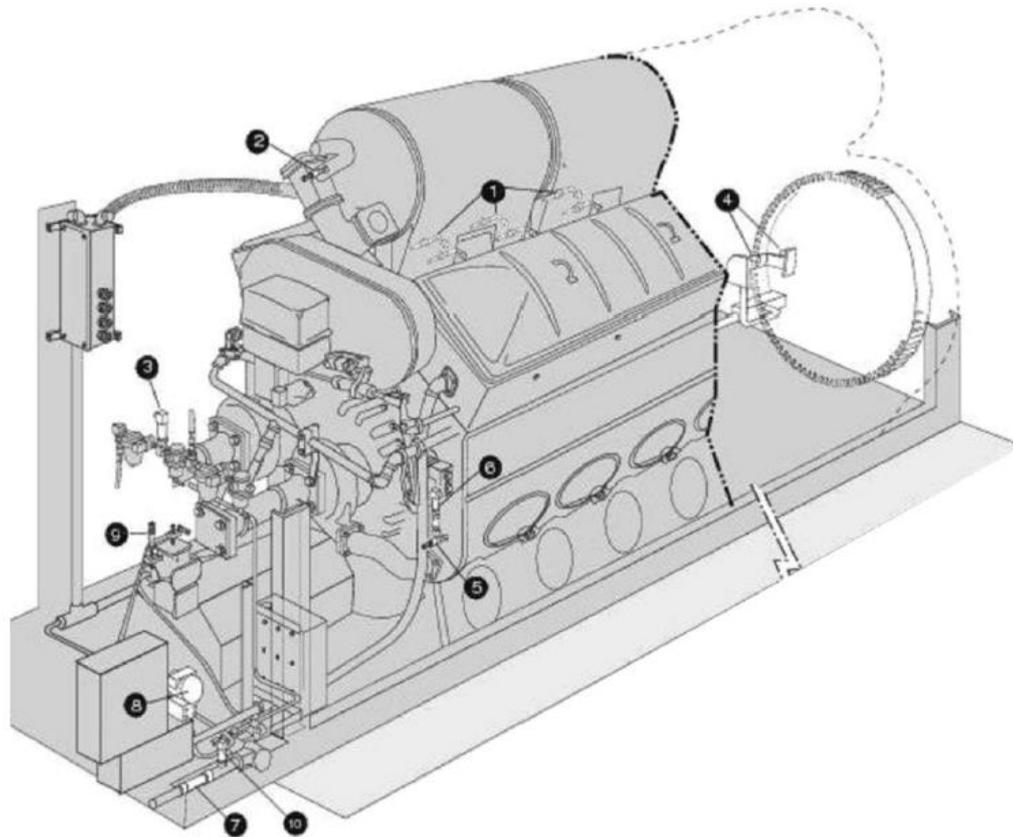
Colocar los soportes de aluminio en cada cierre de sujeción de la tapa de válvulas. (Ver Figura 157).



**Figura 157. Bridas de sujeción de aluminio de los tubos hidráulicos**

### 11.2.2.7 Instalación de sensores

La siguiente figura muestra la ubicación de los sensores del motor.

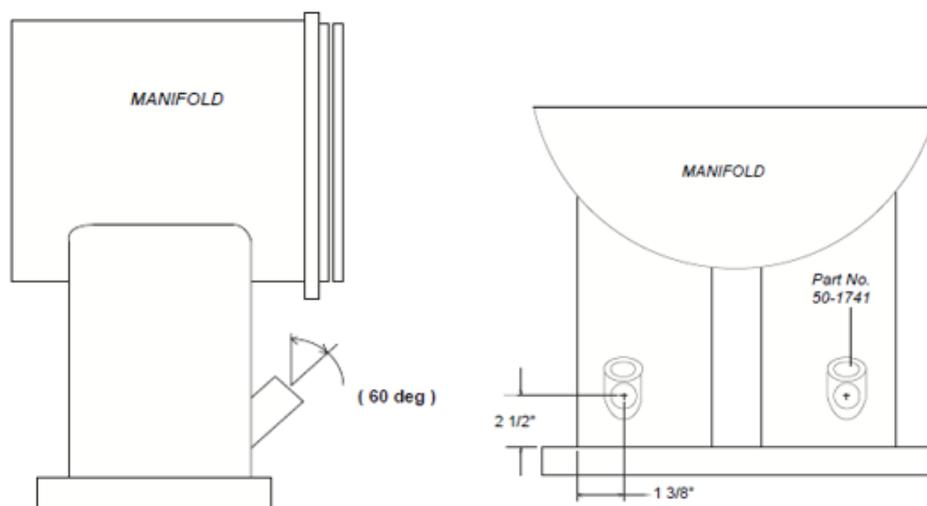


- |                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1 Exhaust thermocouples       | 6 DP transducer            |
| 2 Water temperature sensor    | 7 DP sensor - gas line     |
| 3 Flywheel sensors            | 8 Gas pressure sensor      |
| 4 Air box temperature sensors | 10 Gas header pressure     |
| 5 Air box pressure transducer | 11 Knock detection sensors |

**Figura 158. Ubicación de los sensores**

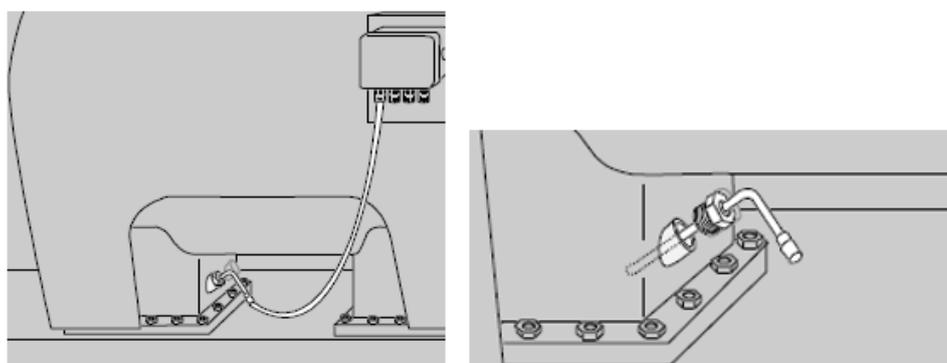
#### Sondas de temperatura de escape:

En el colector de escape se instalará un termopar para controlar la temperatura de los gases de escape de cada cilindro. La ubicación de cada termopar se detalla en la Figura 158.

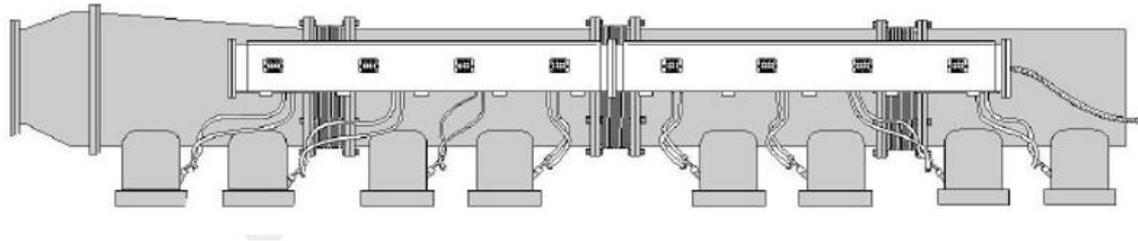


**Figura 159. Termopares del colector de escape**

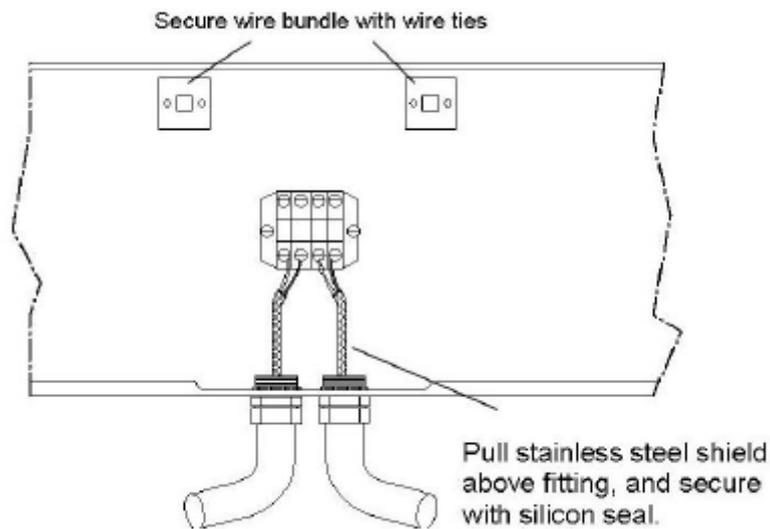
1. Desmontar el colector de escape y agujerear según lo indicado en la Figura 159. Asegurarse de que los agujeros son lo suficientemente largos para que una vez soldado el accesorio suministrado en su lugar, las sondas disponen de espacio suficiente para no tocar la pared del colector.
2. Soldar los accesorios suministrados (Ref nº 50-1741) en los agujeros. Limpiar la zona y volver a montar el colector.
3. Instalar los termopares lubricando previamente las roscas con un compuesto anti-oxido resistente a las altas temperaturas apretando a 20-25 ft. lbs.
4. Coloque y ajuste el cable de cada termopar utilizando la bandeja metálica del colector para situarlo en cada cilindro. Conecte cada uno de los cables de las sondas a la regleta correspondiente de la caja de conectores analógicos.



**Figura 160. Detalle de instalación de termopares del colector de escape**



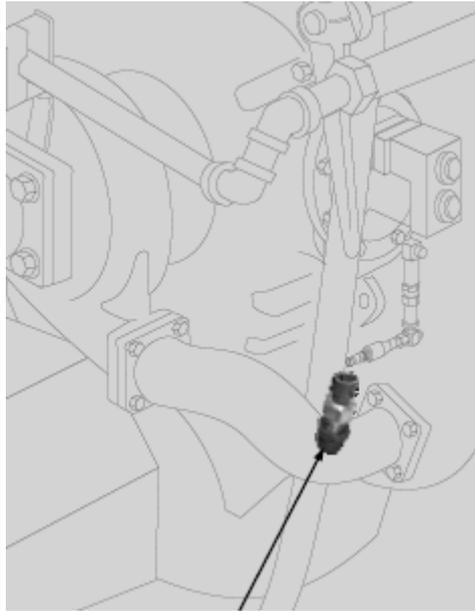
**Figura 161. Colector de escape con termopares instalados**



**Figura 162. Estanqueidad de la canaleta metálica**

### **Sensor de temperatura de agua:**

El sensor de temperatura de agua suministrado se puede instalar en cualquier punto del circuito de agua del motor que se considere adecuado. Una posibilidad es instalarlo en el lado izquierdo del motor a la salida de la bomba de agua utilizando el agujero roscado existente. Ver Figura 163. Si este agujero está ya ocupado por otro sensor, instalarlo en el lado izquierdo. En cualquier caso, existen varios puntos en el motor en que este sensor puede instalarse con facilidad.



**Figura 163. Sensor de temperatura de agua**

#### **Sensor de temperatura de la caja de aire:**

Hacer un agujero en la tapa y soldar una rosca 3/8" NPT. Normalmente la sonda se coloca en el primer cilindro de la izquierda. Ver Figura 164:

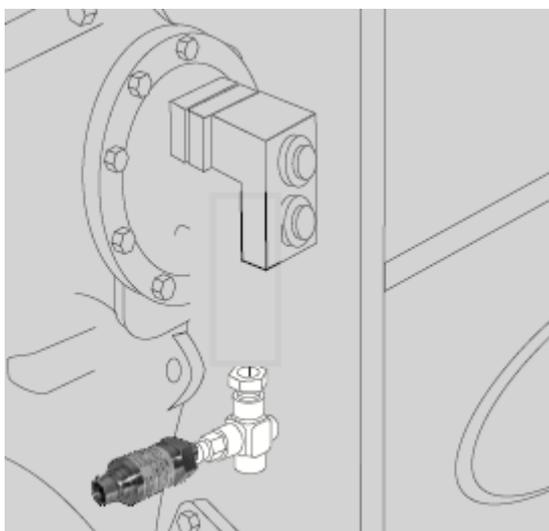


**Figura 164. Sensor de temperatura de la caja de aire**

### **Sensor de presión de la caja de aire:**

El sensor de presión de la caja de aire se suele instalar en el agujero existente en el bloque en la parte delantera izquierda del motor. La temperatura de la caja de aire se mide con la sonda colocada en la parte delantera izquierda del motor.

1. Quitar el accesorio existente e instalar el adaptador para colocar el transductor de presión de la caja de aire.
2. Instalar el transductor de presión (Figura 165), aplicar un sellador y apretar a 10 ft. lbs. No sobre apretar.
3. Cablear el transductor hasta la caja de conexiones analógicas.



**Figura 165. Sensor de presión de la caja de aire**

*NOTA: Otros sistemas de protección del motor pueden necesitar el acceso a la caja de aire. Puede ser necesario modificar el conjunto para acomodar todos los sensores.*

### **Sensores de gas:**

1. Instalar el transductor de presión diferencial (DP) con el adaptador suministrado en la línea de gas junto al sensor de presión diferencial de gas (Figura 166).

*NOTA: El transductor de presión diferencial puede orientarse mediante el soporte en cualquier dirección, con la condición de mantener los dos tornillos de anclaje en*

*posición horizontal. Esto es necesario para mantener la calibración del diafragma interno del transductor.*

2. Conectar los racores del transductor utilizando sellador de roscas.
3. Apretar a 15 ft.lbs.
4. Colocar los latiguillos desde el tubo de gas hasta el sensor DP. Controlar las conexiones de alta y baja presión.

*NOTA: Los latiguillos no son intercambiables y deben funcionar en la posición correcta.*

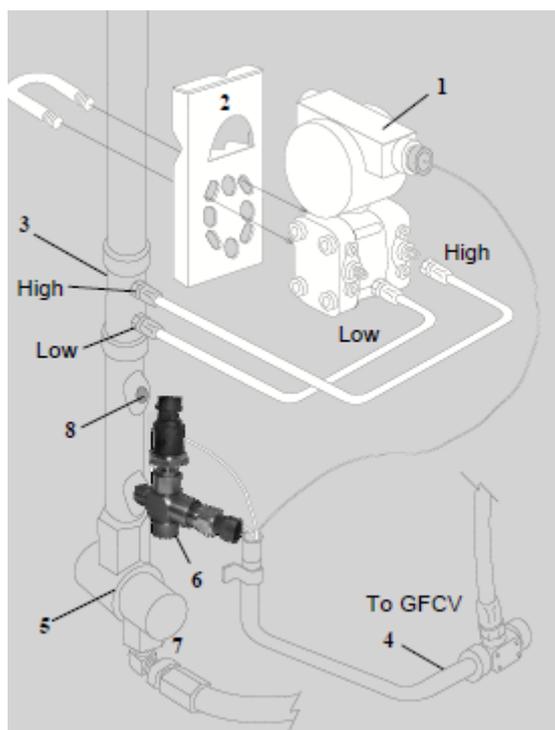
- a. Differential Pressure Transducer
- b. DP Mounting Bracket
- c. Differential Pressure Sensor
- d. 3/4" electrical conduit from analog box
- e. Gas Cut Off Valve (GCOV)
- f. Gas Temperature Sensor



- g. Gas Pressure Sensor, 0 to 200 psi



- h. Sense line port to gas line Regulator



**Figura 166. Ubicación de los sensores de gas**

### **Sensores de detonación:**

Se instalará un sensor de detonación en cada cilindro.

1. Colocar el sensor de detonación en la tuerca extendida de la culata como se muestra en la figura 167. Utilice los tornillos suministrados y apriételos a 10-12ft.lbs.

*NOTA: Un sobre apriete sobre el sensor puede destruirlo.*

2. Asegurar los cables para evitar que las vibraciones puedan causar problemas.



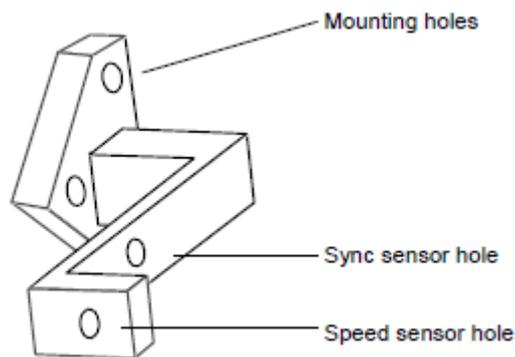
**Figura 167. Sensor de detonación instalado en la culata**

### Sensores de vueltas y sincronización del motor:

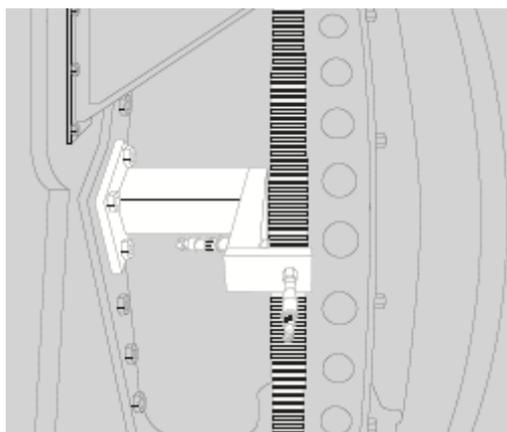
Los dos sensores se instalan en el volante motor mediante el soporte suministrado.

#### Soporte

1. Desmontar los tres tornillos de la campana de la caja de engranajes en el lado izquierdo del motor.
2. Instalar el soporte suministrado con los nuevos tornillos (1/2" -NF 18 X 2 1/4") según muestra la Figura 168.



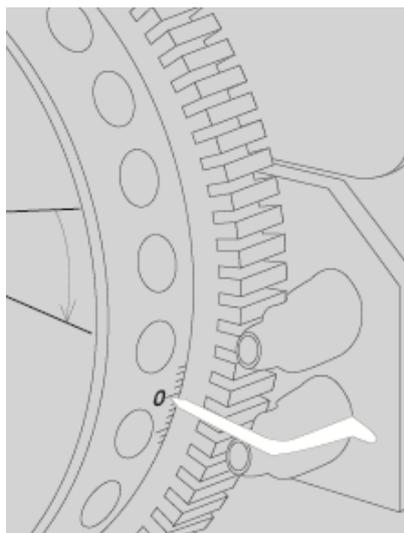
**Figura 168. Soporte de los sensores de vueltas y sincronización del motor**



**Figura 169. Vista del soporte de los sensores instalado**

### *Ajuste del sensor*

1. Antes de perforar el disco de acople, verifique la calibración de la posición del puntero del volante motor, de acuerdo con el procedimiento estándar del motor.
2. Gire el volante motor hasta que el puntero apunte a 337,5 grados



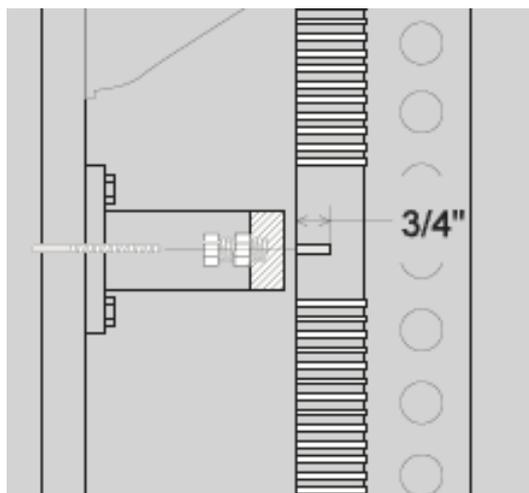
**Figura 170. Ajuste del puntero del volante motor**

3. Instale el tornillo de guía de broca (suministrado por ECI) en la ubicación del sensor asegurándose de que haya espacio suficiente para perforar un agujero de al menos 3/4 " de profundidad.
4. Taladre el orificio con una broca de tamaño "C" (0.242 ") de cobalto (suministrado por ECI) a una profundidad de 3/4 "+/- 1/32".

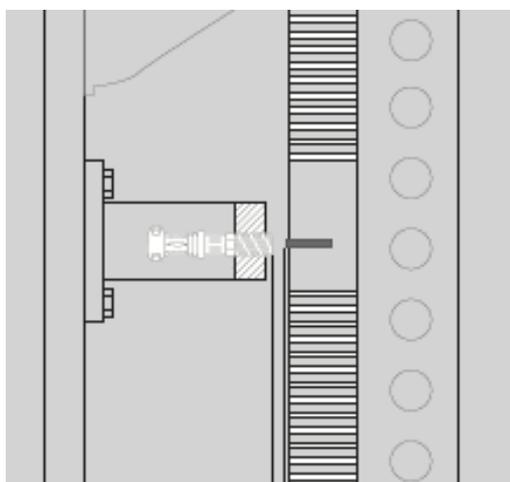
*NOTA: El disco de acoplamiento es de un acero muy duro, por lo que se requiere el uso de refrigerante durante la perforación.*

5. Escariar el orificio en toda su profundidad (0.248 ")
6. Instale el pasador suministrado dejando que sobresalga la superficie del disco de acoplamiento un mínimo de 1/4". (Figura 171)

*\* ESTA OPERACIÓN DEBE REALIZARSE CON LA MÁXIMA PRECISIÓN*



**Figura 171. Taladro del volante motor**



**Figura 172. Inserción del pasador**

### *Colocación del sensor de vueltas*

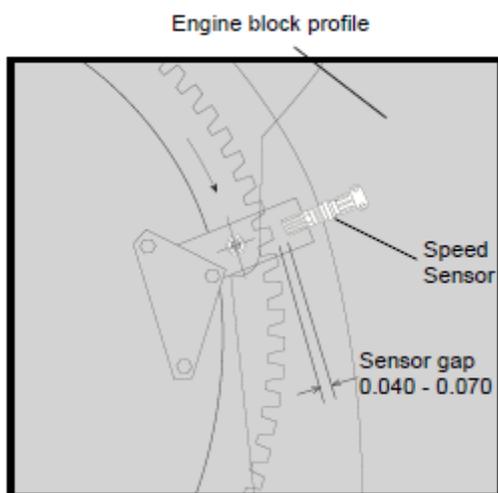
Instale los dos sensores del volante motor, asegurándose de que el diente del engranaje objetivo está en línea con el centro del sensor cuando se ajuste su distancia.

1. Atornille el sensor de velocidad hasta que haga contacto con el diente del engranaje. Gírelo hacia atrás aproximadamente una vuelta. Apriete la contratuerca. La holgura debe estar entre 0.040-0.070 ". Apriete a 16-20 pies-lbs. No apriete demasiado.

*NOTA: El soporte del sensor alinea el sensor de velocidad hacia atrás. Esto mantiene el sensor alejado del motor, de modo que si la parte de los dientes del*

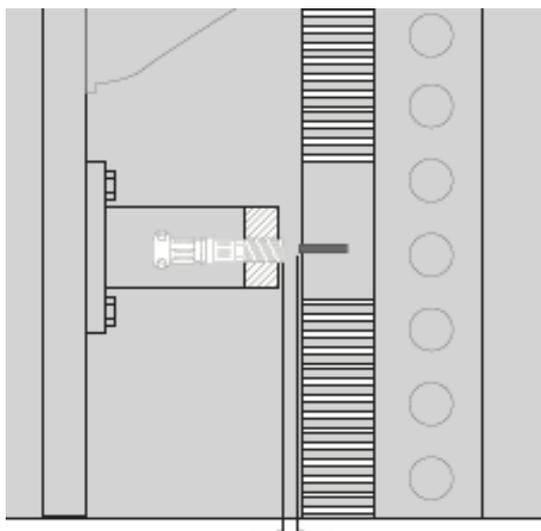
*engranaje en contacto con el motor de arranque se desgasta, la calibración del sensor no se verá afectada.*

2. Instale el sensor de sincronización de la misma manera, atornillar el sensor hasta que entre en contacto con el engranaje, luego retroceda aproximadamente dos vueltas para conseguir una holgura de 0.100 ". Cada vuelta proporciona 55/1000 pulgadas.



**Figura 173. Ajuste del sensor de vueltas**

Las figuras 173 y 174 muestran los sensores instalados. El sensor de velocidad mide directamente sobre un solo diente del engranaje, por lo que debe colocarse con la tolerancia especificada. El sensor de sincronización debe estar centrado en la clavija. El sensor de sincronización debe configurarse con la tolerancia indicada en la figura 173.

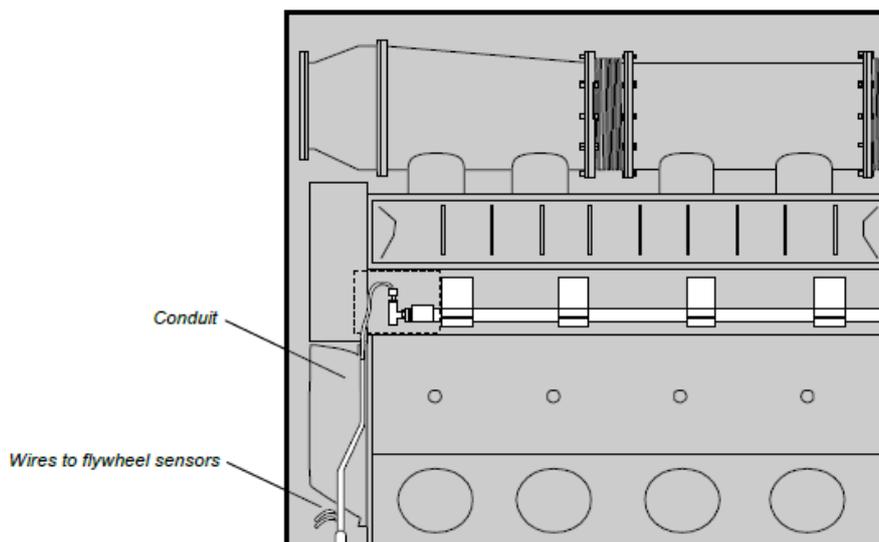


**Figura 174. Tolerancia del sensor de sincronización: 0.100-0.125**

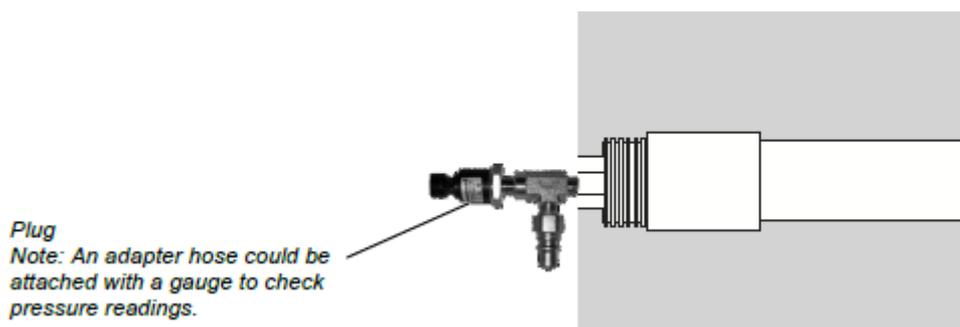
### **Sensor de presión de gas**

1. Inserte el sensor de presión de gas en el extremo del conducto, puede ser en la bancada derecha o izquierda del motor.
2. Considere las distintas opciones para encaminar el cableado del sensor. Posiblemente la bandeja con el cableado de los sensores del volante motor sea la más adecuada.
3. Dirija el cable del sensor a través de esta bandeja hasta la caja de conexiones analógicas.
4. Ver los diagramas y esquemas eléctricos para realizar la conexión.

Puede colocarse un adaptador para instalar un manómetro de presión adicional. (Figura 175)



**Figura 175. Ubicación del sensor de presión de gas**



**Figura 176. Sensor de presión de gas con adaptador**

#### Otros sensores del sistema SIP:

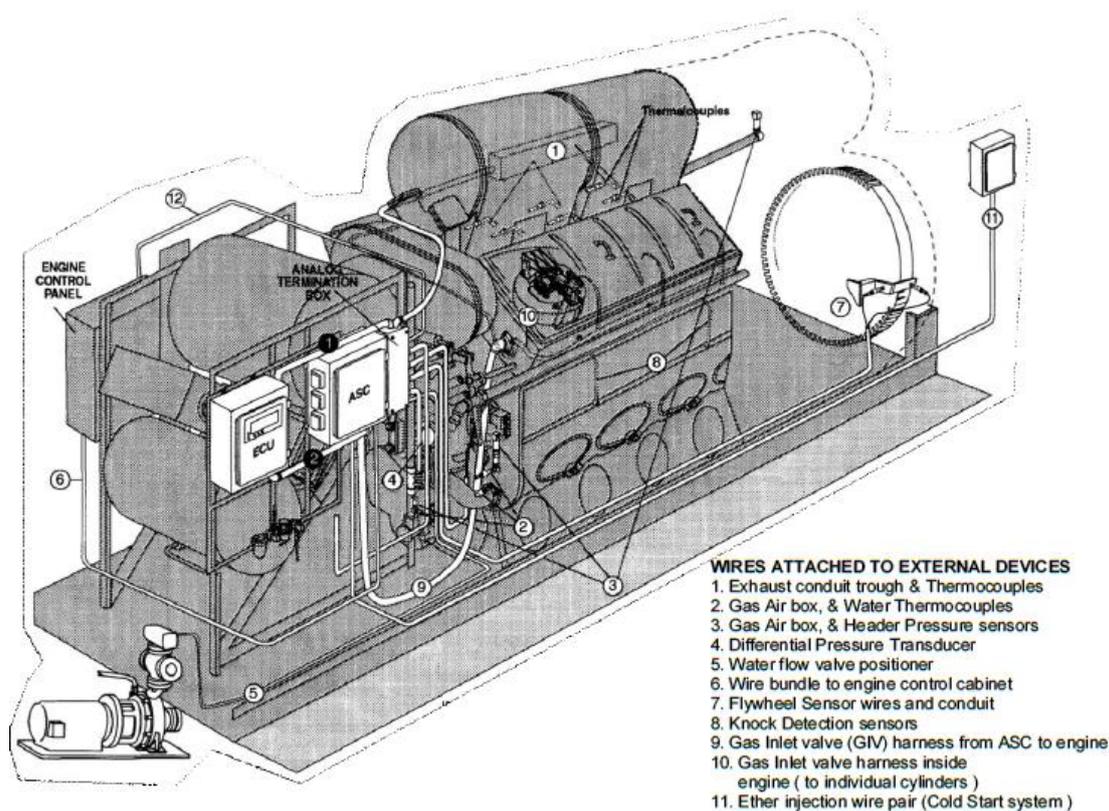
La presión del aceite lubricante se supervisa para garantizar seguridad del motor. Este sensor está conectado en el mismo punto que en el motor original.

Un sensor de presión y otro de contrapresión hidráulica están integrados en el sistema hidráulico suministrado que se ha añadido para la gestión de las válvulas de inyección de gas.

La presión previa a la cámara (PCP) es la presión de gas suministrada a la precámara. Se mide para diagnósticos y monitoreo. Este sensor se ubicará después de la válvula de control.

También se controlan la tensión y la intensidad del generador principal, así como la temperatura ambiente con un sensor colocado en el exterior de la locomotora.

### 11.2.2.8 Cableado General

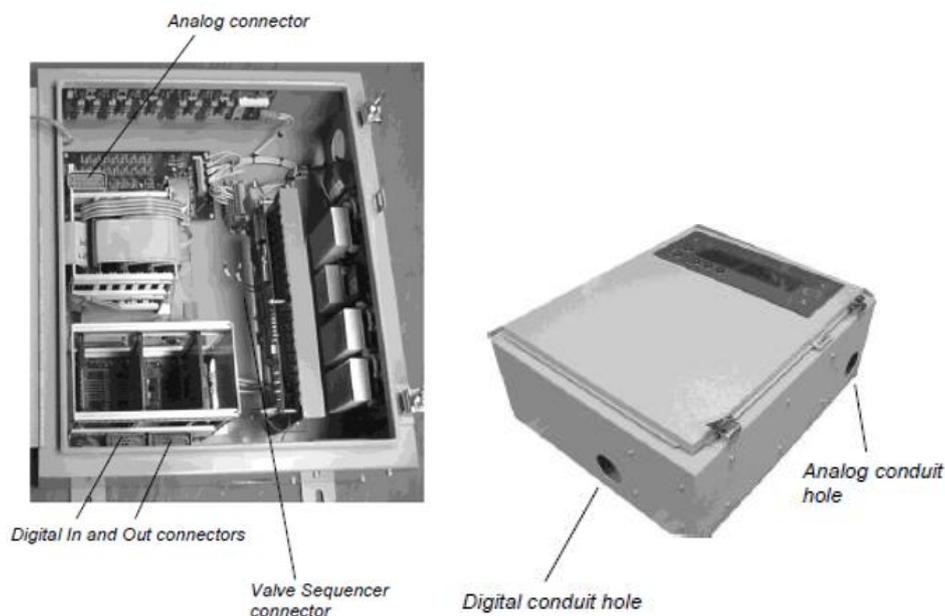


**Figura 177. Cableado general del motor**

El diseño del cableado del kit de conversión se presenta de manera tal que los arneses de cables se pueden conectar a la Unidad de control electrónico (ECU) y llevar a las regletas de terminales a través de las mangueras correspondientes. Del mismo modo, los cables de dispositivos externos se unen y distribuyen a través las mangueras hasta la regleta de terminales. Los arneses se ensamblan en fábrica para garantizar la facilidad de instalación.

Algunos cables no pueden prefabricarse para el kit de conversión dado que se desconocen las longitudes necesarias. Esta parte del cableado deberá realizarse in-situ por el instalador.

La documentación del sistema incluye un plano con una vista de todos los elementos que lo forma y su conexionado. Este es un buen recurso para obtener una descripción general del cableado y los planos del sistema



**Figura 178. Caja de conexiones eléctricas analógicas y digitales**

### **Instalación del cableado:**

Para instalar las diversas partes del cableado, se recomienda familiarizarse primero con las partes del mismo y determinar por donde se instalarán. Por ejemplo, la bandeja entre la ECU y el DTB tendrá posiblemente tres mangueras distintas por la misma bandeja. Antes de tirar los cables en las bandejas, junte todos los cables desde su dispositivo respectivo hasta el armario eléctrico. Ponga los cables juntos con una holgura adecuada cada pocos metros, comenzando desde el armario hasta el extremo donde se conectan al dispositivo correspondiente. Cuando conecte la manguera al armario eléctrico, asegúrese de dejar la holgura adecuada para hacer las conexiones y poder abrir y cerrar las puertas del armario con facilidad.

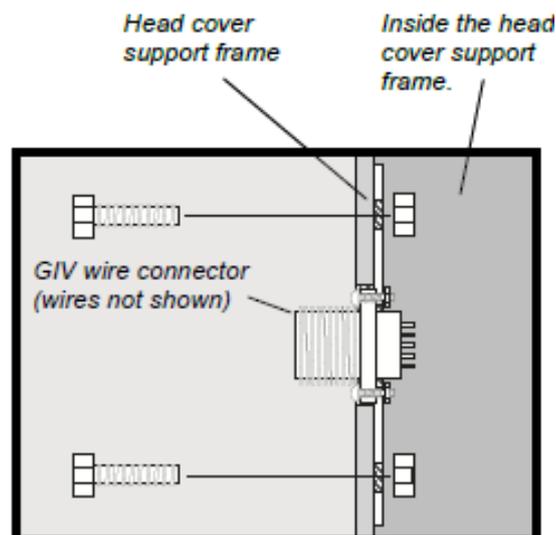
*NOTA: la longitud de los haces del cableado puede no ser la misma. Esto tiene poca importancia, ya que todos los cables son más largos para que se puedan cortar a la medida correcta cuando se conecten a la regleta de terminales. Marque los extremos del cable con etiquetas de forma segura y proteja las etiquetas para que no se pierdan dentro del conducto. A medida que el cable se introduce en el conducto, retire la cinta que se ha aplicado para mantenerlos agrupados. El esquema del cableado es parte de la documentación suministrada.*



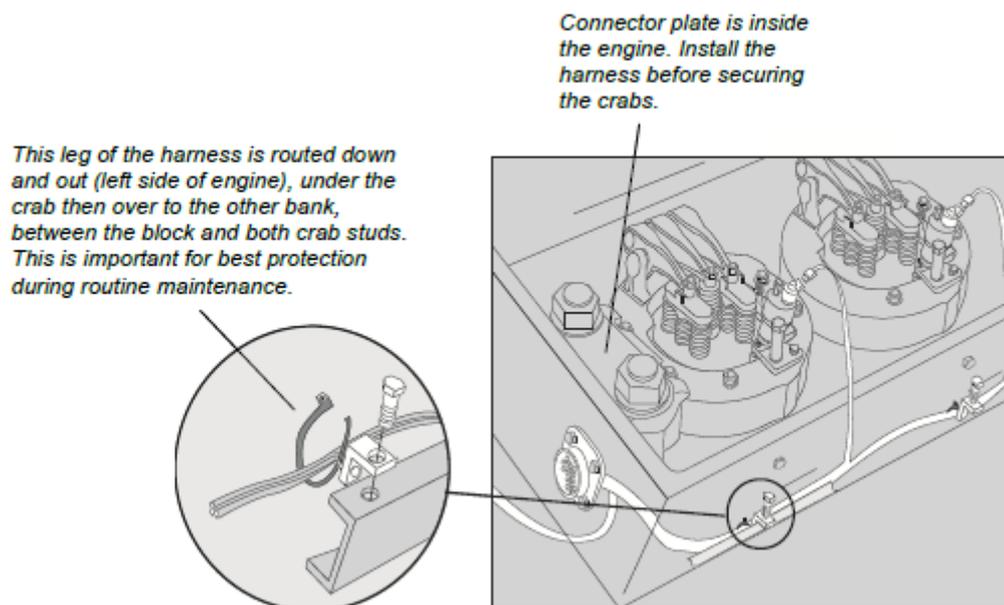
**Figura 179. Manipulación del cableado**

**Gas Inlet Valve Wire Harness:**

El cableado de las válvulas GIV está dividido en dos partes. La parte más larga cruza a través del motor por debajo de los árboles de levas por la parte delantera del motor. El cableado está diseñado para encajar entre el bloque delantero del motor y la tapa de la culata. Solo se puede instalar correctamente si se desmonta la tapa de la culata. Entonces las dos secciones del cableado se pueden instalar entre los inyectores y la válvula de alivio del motor. Ver figuras 180 y 181.



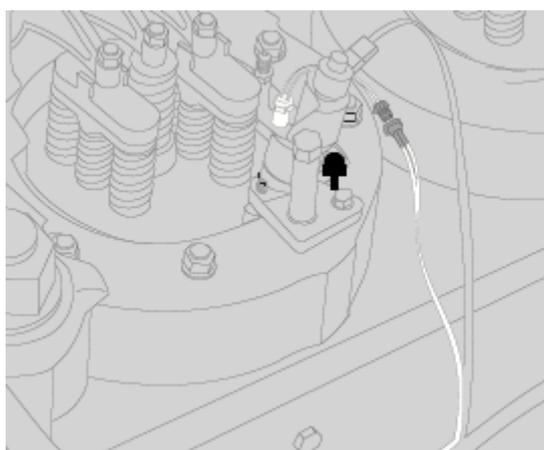
**Figura 180. Cableado de las GVI´s**



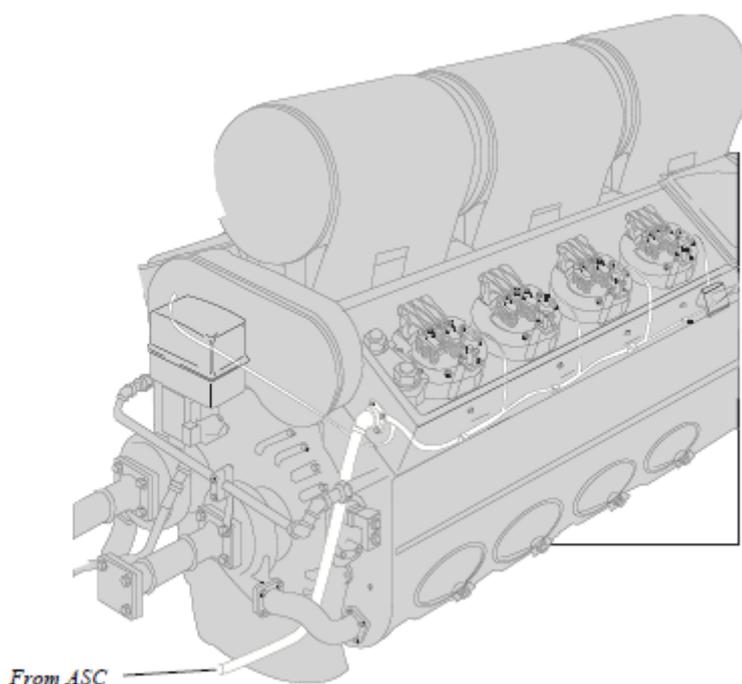
**Figura 181. Detalle del cableado de las GVI´s**

Coloque el conector GIV en el motor (Figura 182) y conecte el conector macho del mazo de cables GIV. Lleve el mazo de cables hasta la ECU.

Conecte el mazo de cables GIV dentro del cuadro de ECU según lo especificado en el esquema eléctrico suministrado. Ajuste la longitud de los cables cuando sea necesario.



**Figura 182. Detalle del cableado de las GVI´s en el interior de la culata**



**Figura 183. Vista general del cableado de las GVI´s**

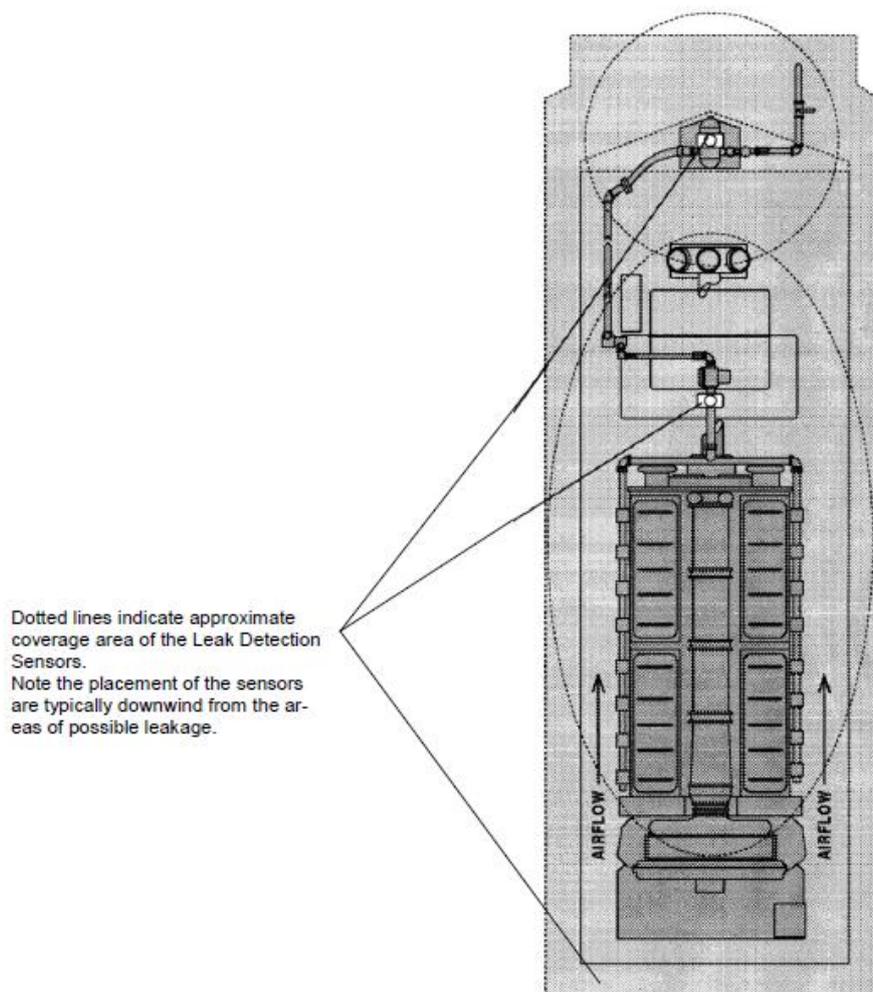
#### **11.2.2.9 Sistema de detección de fugas de gas**

Se recomienda el uso de un sistema continuo de detección de fugas de gas, que evite la posibilidad de que una fuga de gas quede atrapada y pueda provocar una explosión. Debido al hecho de que cada aplicación es única y, por lo tanto, tiene unos requerimientos distintos, este manual no incluye una descripción específica de la instalación de detección de fugas. El sistema debe estar diseñado para monitorear el entorno del motor y detectar todas las posibles fugas de gas. Especialmente en las áreas superiores de la locomotora donde podría acumularse el gas.

El sistema debe disponer de luces indicadoras o bocinas de advertencia y utilizarse para controlar y detener el suministro de gas al área del motor.

Los sensores deben colocarse en áreas donde las fugas son más probables, teniendo en cuenta la dirección del flujo de aire alrededor del motor.

La siguiente figura muestra una posible distribución del sistema de detección de fugas de gas.



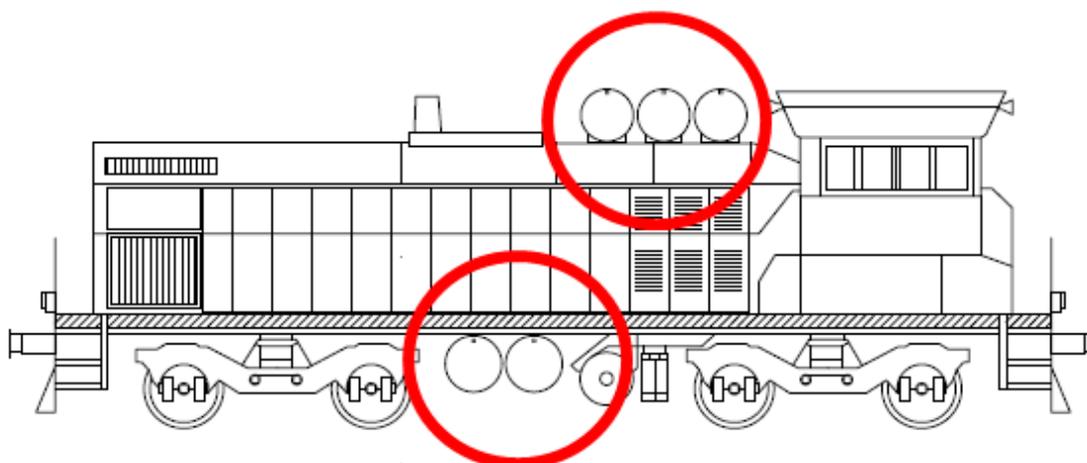
**Figura 184. Sistema de detección de fugas de gas**

#### **11.2.2.10 Depósitos de GNL**

El en apartado de ingeniería se detalla las características técnicas y la ubicación de los depósitos en la locomotora. El depósito de gasóleo original de la locomotora deberá sustituirse por dos depósitos criogénicos de GNL.

Se utilizarán los mismos puntos de anclaje de depósito original, a los que se atornillará el soporte adecuado para sujetar los dos cilindros, de modo que la instalación sea reversible.

Para la instalación de los depósitos sobre la cubierta de motor, se construirá un soporte adecuado.



**Figura 185. Ubicación de los depósitos de GNL**

### **Conducciones de gas:**

El fabricante de los depósitos suministrará el esquema de montaje de los cinco depósitos de GNL de la locomotora. Se unificarán la mayor parte de las conducciones para conseguir que el funcionamiento del sistema sea similar a la instalación de un único depósito.

Todas las líneas de gas deben ser capaces de resistir los efectos de las bajas temperaturas sin presentar problemas. En las líneas de gas que llevan GNL en estado líquido se recomienda el uso de tubos de acero inoxidable serie 300.

Los tubos de llenado y distribución pueden ser rígidos o flexibles, metálicos o no-metálicos, pero en todos los casos deben estar certificados para su uso con líquidos criogénicos. Los tubos de venteo y sobrepresión se realizarán con tubos flexibles o mangueras adecuadas para el paso de gas natural. Debe dotarse al sistema de un punto bajo para el drenaje del agua condensada que pueda aparecer.

El montaje de los tubos debe realizarse de forma que se permita su expansión térmica provocada por los cambios de temperatura criogénica a temperatura ambiente. Esto se consigue normalmente añadiendo curvas en S a los conductos rígidos. En general si un extremo del tubo puede moverse con la mano unos 13 mm mientras el otro extremo permanece fijo, será suficientemente flexible para las bajas temperaturas de trabajo.

Se recomienda realizar las conducciones con tubos de las siguientes dimensiones y espesores:

- 3/8"OD x 0.035" (10mm x 1.0mm)
- 1/2"OD x 0.049" (12mm x 1.0mm)

- 3/4"OD x 0.065" (20mm x 2.0mm)

**Racores:**

La unión de todos los tubos rígidos se realizará mediante racores. (Parker, Swagelok, o equivalentes)

Todos los racores deben instalarse usando cinta de teflón. Después de aplicar la cinta al racor, debe apretarse en el sentido de las agujas del reloj hasta su posición final. Si se aprieta más allá del punto deseado no se puede girar en sentido anti horario para cambiar la posición. Hay que desmontar el racor y volver a realizar toda la operación. El giro en sentido anti horario provoca pequeñas fugas en la rosca que con el tiempo terminarán provocando una fuga indeseada.

En el caso de que una tubería tenga más de más de un racor, asegúrese de utilizar dos llaves para mantener el ajuste de cada una de las roscas. Hay muchos tipos de racores para tuberías disponibles. Chart recomienda el uso de accesorios NPTF por su resistencia a las fugas. Cuando se utilizan racores de acero inoxidable, se recomienda el uso de guarniciones de acero inoxidable a latón para evitar la excoiación durante la instalación.

Cuando se realiza el mantenimiento, reemplace los elementos de latón cuando sea necesario. No se recomienda el uso de roscas de acero inoxidable a acero inoxidable por los problemas de excoiación que se pueden aparecer. En estos casos, si se requiere mantenimiento, es muy difícil, si no imposible, separar los accesorios sin destruir los hilos de la rosca. Si se utiliza es inoxidable a inoxidable es muy recomendable utilizar un compuesto anti-excoiación como la cinta impregnada de níquel. Esta cinta está disponible en [www.chartparts.com](http://www.chartparts.com) (PN:11811511). Al aplicar cinta, asegúrese de que los hilos estén limpios, secos y a temperatura ambiente.

**Soporte de las tuberías:**

Las tuberías y tubos deben ser apoyados a lo largo de su longitud para protegerlos de las vibraciones. En general se necesita un soporte cada 30 cm de tubería. Se pueden utilizar abrazaderas de inoxidable, polietileno o polipropileno. Se debe tener cuidado en la colocación de soporte para permitir la expansión térmica y la contracción de las líneas.

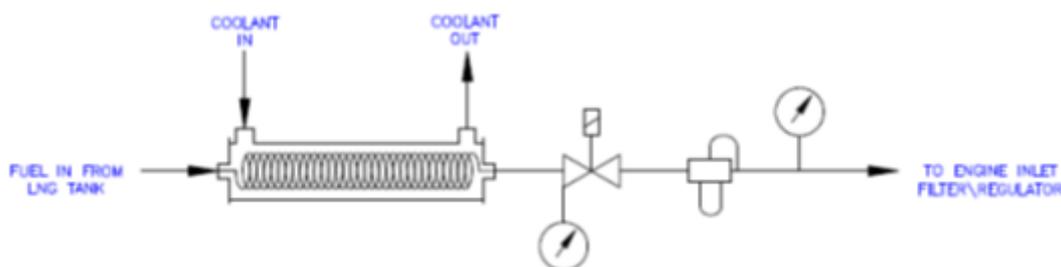
### Depósitos GNL:

Los depósitos deben sujetarse al chasis de la locomotora mediante un soporte adecuado. Se utilizarán correas de acero inoxidable ubicadas a 2 " mínimo de cualquier soldadura del depósito. Las correas deben incorporar una goma flexible que evite la rotación o el deslizamiento del depósito una vez instalado.

De acuerdo con las directrices NFPA 52 el sistema de montaje debe ser lo suficientemente fuerte para soportar 8 veces todo el peso del depósito.

### Intercambiador de calor:

Los depósitos integrados de Chart incluyen el intercambiador de calor en su dotación estándar.

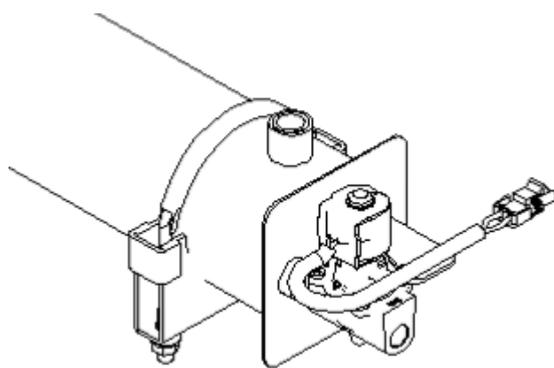


**Figura 186. Esquema de instalación del intercambiador**

### Válvula automática:

La válvula automática se instalará en la salida del gas caliente del intercambiador. A pesar de que esta válvula se roscará directamente sobre la salida del intercambiador, se recomienda añadir un soporte específico que aguante el peso de la válvula.

La válvula se cerrará cuando se corte el encendido del motor. Se recomienda añadir una alarma de baja temperatura en la línea de gas caliente, para prevenir daños en los componentes aguas abajo en el caso de un funcionamiento anómalo del intercambiador. Los depósitos integrados de Chart ya incluyen esta válvula en su dotación estándar.



**Figura 187. Válvula automática**

### **Válvula de seguridad de venteo:**

La válvula de venteo debe situarse en un punto seguro de la locomotora. Dado que el gas natural se eleva, generalmente se canaliza a la parte superior de la locomotora con el flujo dirigido hacia arriba. Como que existe la posibilidad de aliviar líquido a través de esta línea su trayectoria de descarga debe estar lejos de personas, fuentes de ignición o materiales que puedan ser dañados por la exposición a temperaturas criogénicas. Hay que evitar la posibilidad de acumulación y congelación de agua en la línea venteo e incorporar un punto bajo de drenaje.

El tamaño mínimo recomendado para el tubo de venteo es de 1/2 "(12 mm).

### **Línea de llenado.**

Debido a la instalación de varios depósitos de GNL en la locomotora, la línea de llenado se definirá por el proveedor de los depósitos durante el proyecto.

### **Línea de suministro al motor:**

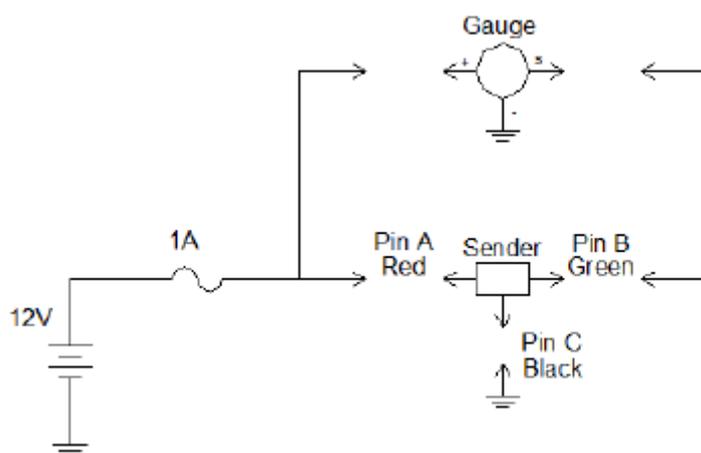
La línea de combustible desde la válvula de cierre automático hasta el motor puede ser un tubo metálico o no metálico adecuado para servicio de gas natural. Si se usan tubos no metálicos, se añadirá una válvula de cierre por baja temperatura al sistema de combustible.

La línea de combustible del motor debe ser de un diámetro mayor que la línea de líquido LNG en el intercambiador de calor para evitar restricciones de caudal debido a la expansión de líquido cuando se vaporiza.

### Indicador de nivel de combustible:

El indicador de nivel de combustible consta de dos partes: el emisor y el medidor. El emisor es una unidad sellada que viene montado en el depósito de combustible. Está conectado al vehículo a través de un conector hembra Weatherpak de 3 pines.

El sistema debe estar protegido por un fusible de 1 amp. El medidor VDO suministrado debe montarse en el tablero de instrumentos en el interior de la locomotora.



**Figura 188. Esquema del indicador de nivel de combustible**

### Instalación de varios depósitos:

Cuando se realiza la instalación de varios depósitos en un mismo vehículo, el llenado, venteo, ventilación, válvula de seguridad y las líneas de medición simplemente se conectan en paralelo de acuerdo con las siguientes recomendaciones.

Los depósitos se llenarán independientemente unos de otros pero actuarán como un único sistema, como si se dispusiera de un único depósito de mayor capacidad.

Durante el repostaje es normal que unos depósitos se llenen antes que otros lo que provoca cambios de presión y caudal durante el proceso de llenado, lo que en algún caso puede producir alarmas en sistemas automáticos de llenado.

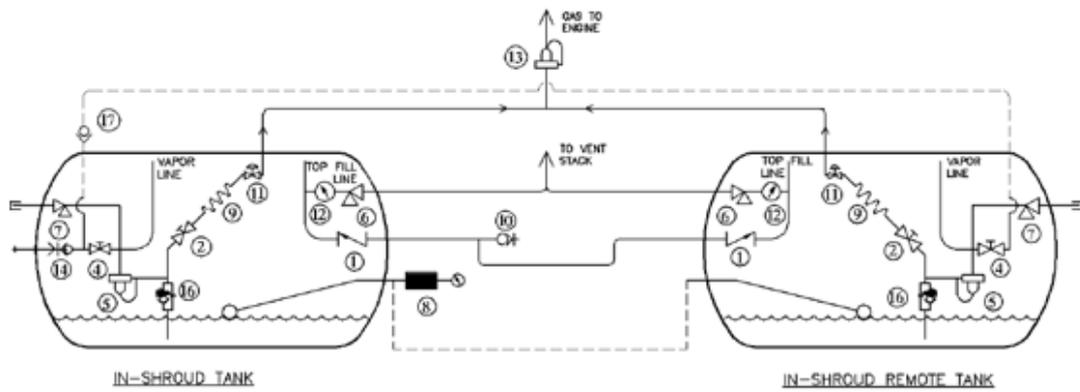


Figura 189. Esquema de integración de depósitos de combustible (R110)

## 12. Validación

### 12.1. Seguimiento, monitorización y evaluación de la locomotora modificada

Con el propósito de seguir y comprobar el funcionamiento del nuevo grupo motopropulsor de la locomotora, y garantizar un correcto seguimiento de los resultados del proyecto y su comparación con la situación inicial de la locomotora, en este Informe Técnico se definirán:

- Protocolo de monitorización de la locomotora y datos a registrar
- Metodología de evaluación del funcionamiento de la locomotora y KPIs
- Comparativa del funcionamiento de la locomotora con la situación inicial diésel

#### 12.1.1 Monitorización de la locomotora

Se supone que actualmente existen registros de las operaciones realizadas por cada locomotora y de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo llevados a cabo sobre cada vehículo. No obstante, se presentan a continuación unas tablas que pueden servir de ejemplo de la metodología a seguir para la monitorización y posterior evaluación de la locomotora transformada.

El primer registro que se propone es de la operatividad (trabajo) de la locomotora, que posteriormente permitirá determinar, para un periodo determinado (p ej: un mes), las horas de funcionamiento, los kilómetros recorridos y el consumo de GNL:

REGISTRO DE OPERACIONES						Locomotora 310 GNL		Num	xxx-xx
Nº	Fecha	Hora arranque	Ref OT	Carga	Tiempo función	Recorrido	Hora paro	Carga GNL	Notas
				Tm	horas				
1	dd/mm/aa	hh:mm	OT1234	500	6	22	hh:mm	200	
2								--	
3									
4									
...									

**Tabla 34 Tabla de registro de operatividad**

Para controlar las operaciones y el coste del mantenimiento, se proponen las siguientes tablas, la primera relativa a mantenimiento preventivo y la segunda, a reparaciones.

<b>REGISTRO DE MANTENIMIENTO</b>							Locomotora 310 GNL	Num	xxx-xx		
Nº	Fecha entrada	Hora inicio	Tipo de Revisión Programada					Reparación	Fecha salida	Hora salida	Notas
			A	B	C	D	E	Ver Informe nº			
1	dd/mm/aa	hh:mm		X				--	dd/mm/aa	hh:mm	
2	dd/mm/aa	hh:mm						2017 - 3	dd/mm/aa	hh:mm	
3											
4											
...											

A = Mensual B = Semestral C = Anual D = Trianual E = Predictivo

<b>REGISTRO DE REPARACIONES</b>					Locomotora 310 GNL	Num	xxx-xx	
Nº	Fecha entrada	Hora inicio	Origen avería o intervención	Sistema o elemento reparado	Piezas sustituidas	Fecha salida	Hora salida	Notas
1								
2								
3	dd/mm/aa	hh:mm	Error en ECU	Medida RPM	Sensor volante Cable a ECU	dd/mm/aa	hh:mm	
4								
...								

**Tabla 35 Registro de mantenimiento preventivo y reparaciones**

Estos dos registros permitirán conocer los tiempos de parada por actuaciones de mantenimiento y reparaciones, así como el coste de las mismas.

Para la posterior comparación del funcionamiento de la locomotora transformada a GNL en relación a su situación inicial, será necesario disponer de unos registros de la locomotora diésel actual similares a los sugeridos en este Informe.

### 12.1.2 Evaluación del funcionamiento de la locomotora transformada a GNL

Con los datos disponibles en los registros sugeridos en el punto anterior, será posible definir un conjunto de KPI (Key Performance Indicators) que servirán para evaluar la rentabilidad de la transformación y su buen funcionamiento.

Se proponen los siguientes KPI:

Símbolo	Nombre	Origen o Cálculo
---------	--------	------------------

<b>KPI relativos a Tiempos</b>		
T1	Tiempo en trabajo	Registro de Operaciones
T2	Tiempo en espera	Registro de Operaciones
T3	Tiempo en mantenimiento	Registro de Mantenimiento
T4	Tiempo en reparación	Registro de Reparaciones

<b>KPI relativos a Consumo</b>		
C1	Consumo por hora de trabajo	Registro de Operaciones
C2	Consumo por km recorrido	Registro de Operaciones

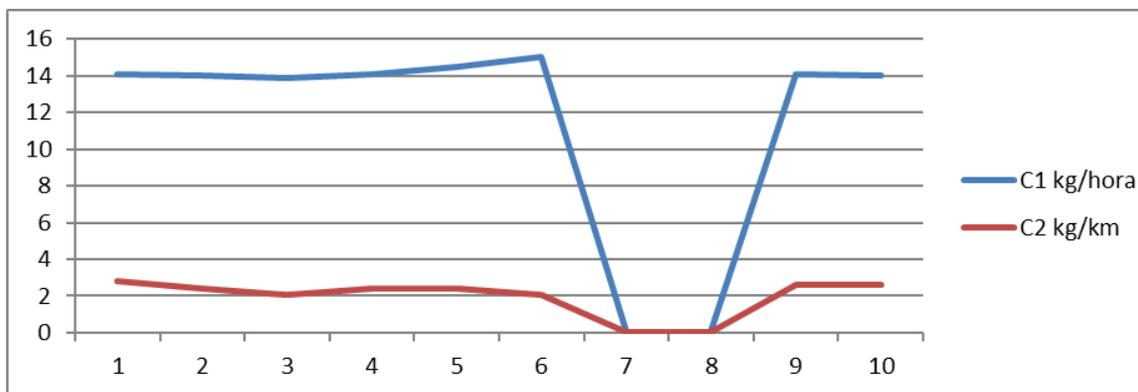
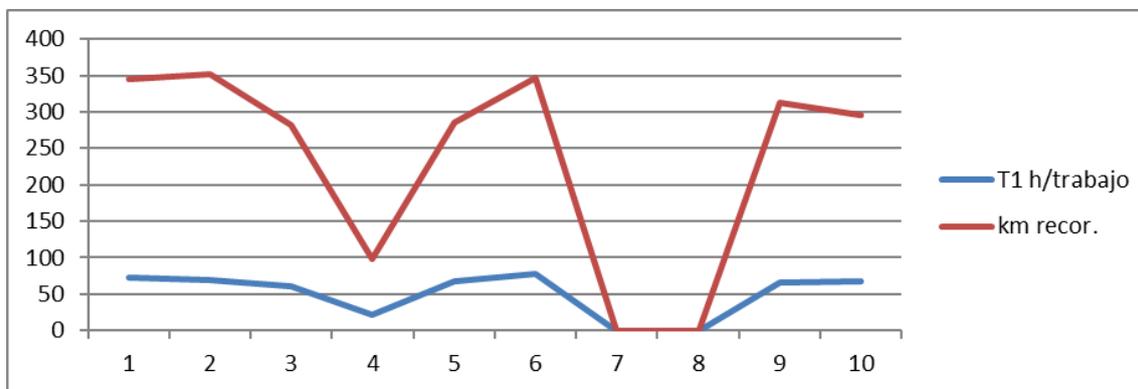
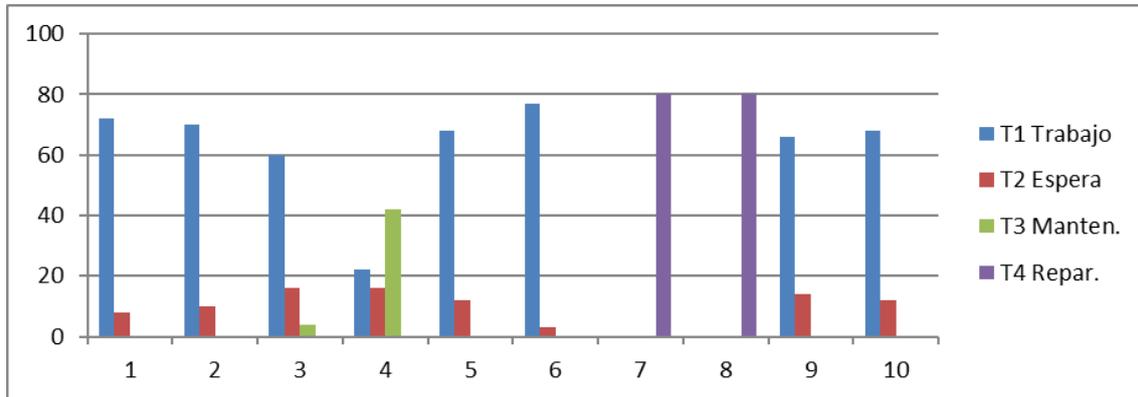
<b>KPI relativos a Mantenimiento</b>		
M1	Coste de Mantenimiento por hora de trabajo	Registros de Mantenimiento y Operaciones, y coste de taller y recambios
M2	Coste de Reparación por hora de trabajo	Registros de Reparaciones y Operaciones, y coste de taller y recambios

**Tabla 36 KPI propuestos para evaluar la rentabilidad de la transformación y su buen funcionamiento**

Los anteriores KPI son los mínimos que se proponen, pero lógicamente pueden establecerse otros más para obtener mayor información y estadísticas.

Con los anteriores KPI pueden establecerse el conjunto de gráficos que se deseen para facilitar el seguimiento de los principales parámetros de la operatividad de la locomotora.

Por ejemplo:



**Figura 190 Gráficos de operatividad (horas), recorrido (km) y consumos (kg/km y kg/h) ordenado de arriba abajo) para facilitar el seguimiento de los principales parámetros de la operatividad de la locomotora.**

### **12.1.3 Comparativa entre la locomotora transformada (GNL) y la original (diésel)**

Disponiendo del conjunto de KPI que se definan y de los correspondientes gráficos, se podrá proceder a la comparación entre las prestaciones de la locomotora original diésel y la transformada a GNL.

Para ello será necesario, antes de la transformación, registrar los datos que se decidan y calcular los KPI de la locomotora original, con suficiente tiempo de antelación, para disponer de unos históricos representativos y proceder a la comparación en costes de explotación basados en el consumo.

Estos KPI podrían también utilizarse para comparar en un futuro con locomotoras dotadas de motores diésel dotados de las últimas tecnologías, u otros tipos de sistemas híbridos etc.

## **12.2. Definición de la instrumentación adicional recomendable**

La modificación de la locomotora para que pase de funcionar con diésel a GNL implica la adición de instrumentación adicional relativa a los sistemas siguientes:

- Información del sistema de gas
- Nivel de los depósitos de GNL
- Sistema de detección de fugas de gas

A continuación, se detallan las funcionalidades de cada sistema.

### **12.2.1 Engine Control Display (ECD)**

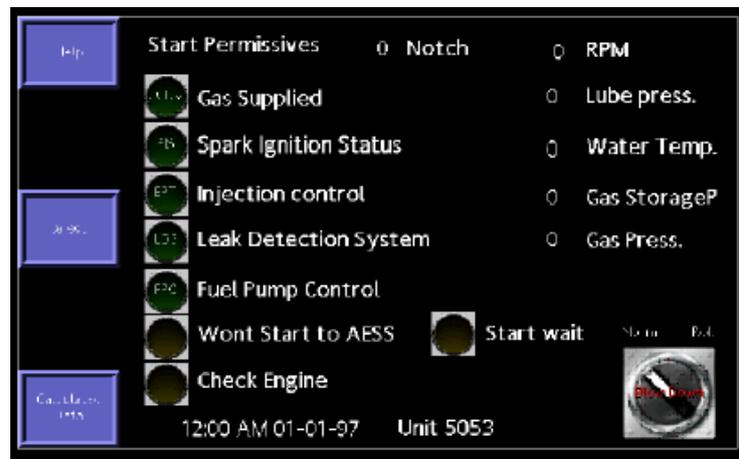
El sistema de gestión electrónica desarrollado por ECI, permite disponer de una pantalla adicional ubicada en la cabina, que proporciona información sobre el correcto funcionamiento del motor, denominada ECD – Engine Control Display.

La pantalla ECD proporciona información operacional en tiempo real. Es una pantalla táctil de 7 " que se comunica a través de un enlace Ethernet con la ECU. El ECD es un dispositivo de visualización independiente que ejecuta su propio software. El ECD está programado para generar dos tipos de registros, uno de datos de funcionamiento y otro de fallos. Ambos archivos se escriben en una tarjeta de memoria SD. Los archivos se pueden cargar fácilmente en una memoria USB para una fácil recuperación. El ECD también es capaz de funcionar como un

servidor web y con el hardware de soporte adecuado permite el monitoreo y diagnóstico remoto.

El ECD dispone de numerosas pantallas que incluyen la visualización de registros de datos y secciones de ayuda con listas de acrónimos e imágenes de ciertos dispositivos de control para ayudar y orientar al operador. Es un sistema intuitivo y sencillo de utilizar.

El ECD no proporciona ningún medio para cambiar la configuración del controlador, tan solo proporciona información y mensajes de error que pueden ser reseteados.



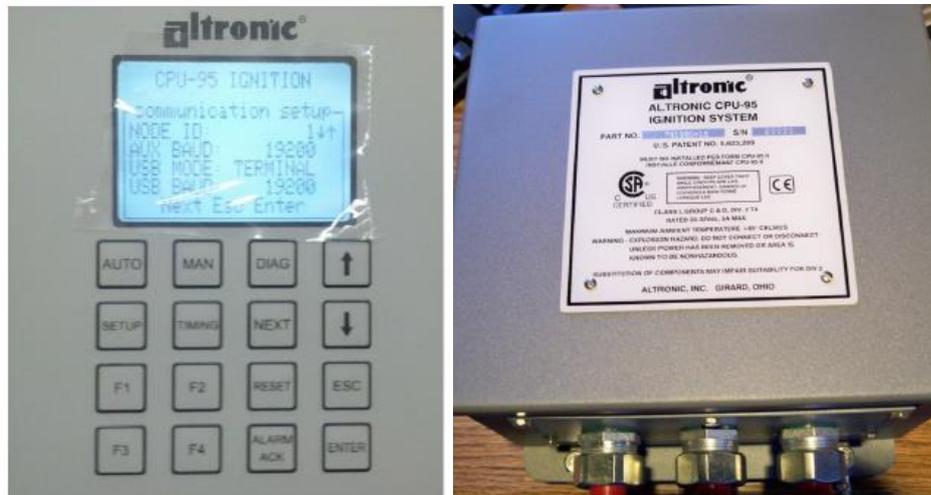
**Figura 191 Pantalla principal de la ECD (Control del Motor)**



**Figura 192 Pantalla de selección del ECD (Control del Motor)**

El Sistema de encendido utilizado es el Altronic Model CPU95, cuyo módulo se instala en el compartimento del motor. Dispone de una pantalla para diagnosis y

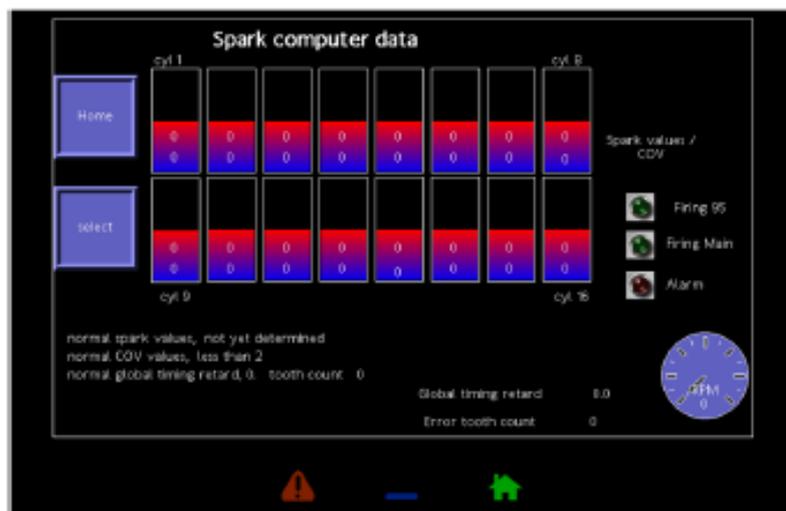
para la comunicación con el sistema principal ubicado en un armario eléctrico en la cabina.



**Figura 193 Sistema de encendido y diagnóstico**

La información de diagnóstico es fácilmente accesible a través de la pantalla de control del motor ubicada en la cabina. (Ver Figura 193)

La información del módulo de encendido Altronic CPU95, llega al ECD mediante una conexión RS485. A continuación, se muestran algunas imágenes de la información que proporciona el módulo de encendido al ECD.



**Figura 194 Pantalla de comprobación de encendido**



**Figura 195 Pantalla de comprobación de detonación**

La pantalla ECD proporciona información sobre:

- Revoluciones del motor
- Presión del aceite de lubricación del motor (entrada/salida)
- Temperatura del aceite de lubricación del motor (entrada/salida)
- Presión del gas a la entrada del conducto de alimentación
- Presión del gas al final del conducto de alimentación
- Temperatura del gas
- Temperatura del aire de admisión en el colector
- Presión del aire de admisión en el colector
- Temperaturas del agua de refrigeración (entrada/salida)
- Temperaturas de gases de combustión en colector de escape
- Presión del aceite del circuito hidráulico (entrada/salida)
- Temperatura del aceite del circuito hidráulico
- Situación de las válvulas GIV
- Alarmas
- Test de encendido (bujías y bobinas)
- Entre otros

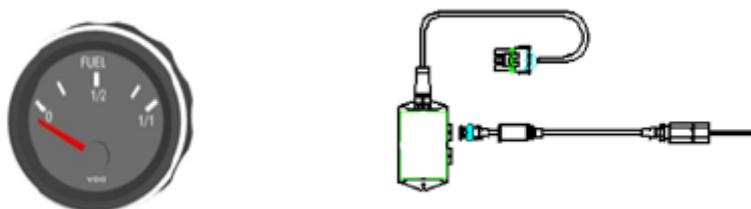
### **12.2.2 Nivel de combustible**

Cada depósito de combustible GNL viene equipado con un sistema electrónico que indica el contenido de combustible. El sistema está formado por dos partes:

- El transmisor del nivel de combustible instalado en el interior del depósito
- El reloj indicador que se encuentra en el tablero de la cabina

El transmisor convierte la señal electrónica de la sonda de nivel de combustible a una señal compatible con el indicador del tablero. El sistema está diseñado para no verse afectado por el estado del producto, presión o temperatura. Los efectos de la aceleración, el frenado, las curvas y pendientes están minimizados, pero pueden producir alguna variación en la medida.

El medidor de combustible es un medidor estándar calibrado de uso en aplicaciones de automoción. La precisión es de  $\pm 1/16$  de un depósito.

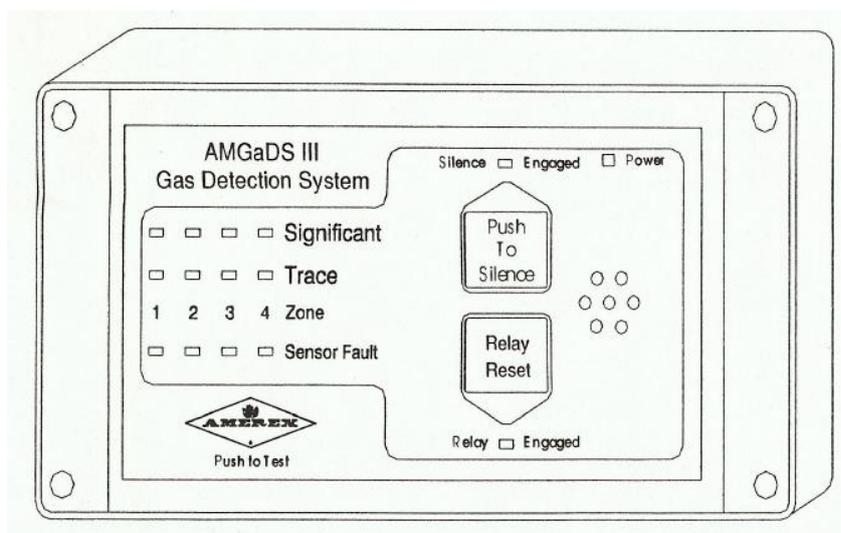


**Figura 196 Reloj indicador y transmisor del nivel de combustible**

El sistema se puede configurar para que un solo reloj indicador marque el contenido de depósitos múltiples como si fueran un único depósito individual.

### 12.2.3 Sistema de detección de fugas de gas

La detección de fugas de gas se realiza mediante el sistema AMEREX AMGasDS III.



**Figura 197 Central de alarmas del AMGasDS III**

La central de alarmas del sistema de detección de fugas de gas se instalará en el interior de la cabina, junto al cuadro de mandos de la locomotora de forma que todas las indicaciones del mismo sean fácilmente visibles por el operador.

### **12.3. Modificaciones en los manuales**

En el apartado de ingeniería correspondiente a la redacción del plan de Mantenimiento y de Operatividad se desarrollan las líneas generales del contenido de los capítulos más significativos, teniendo en cuenta que la redacción final y definitiva deberá ser editada después de realizada la transformación, con los datos concretos de los diferentes proveedores que hayan proporcionado componentes, y del Integrador que haya ejecutado la transformación.

En el ANEXO al Manual, se incluirán todos los dibujos, fotografías o esquemas que sean necesarios para facilitar el montaje y desmontaje de los diferentes elementos que componen la transformación de la locomotora.

Además, en la redacción del plan de Mantenimiento y de Operatividad se incluye una propuesta de actividades de mantenimiento a realizar debidas a las modificaciones introducidas en la locomotora para su funcionamiento con GNL, que servirá de guía para la realización del Anexo al manual original de la locomotora una vez realizada la transformación y su puesta en funcionamiento.

## 13. Conclusiones generales del estudio: Fase 1 y Fase 2

A continuación, se exponen las principales conclusiones derivadas del estudio de viabilidad realizado en la Fase 1 del proyecto, en las que, aunque se observa que existen algunas barreras para la gasificación de los servicios de maniobras ferroviarias en el Puerto de Tarragona, todas ellas son salvables con tiempo y coste como también se ha podido corroborar en la Fase 2.

En cuanto a la **viabilidad técnica**, se exponen las siguientes conclusiones:

- El motor de GNL para tracción ferroviaria no se encuentra todavía de forma normalizada en el mercado (en catálogo). De cinco fabricantes contactados, sólo uno (Guascor) tiene en catálogo un motor de GNL que podría usarse para las maniobras ferroviarias del Puerto de Tarragona, ya que **cumple** con los **requisitos necesarios**. Esto dispara costes y tiempos de suministro.
- En principio, la adquisición de un **depósito de GNL** para tracción ferroviaria no implicaría ningún problema mayor: los hay disponibles en catálogo (tres de los siete fabricantes contactados -Chart, Enric Group e Ingesic- los tienen en catálogo).
- El **motor GNL** y el **depósito** criogénico no deberían suponer una **modificación** superior al **+/- 10%** del peso respecto al motor y depósito diésel, para no modificar el centro de gravedad por encima de lo aceptado por normativa.

En relación con la **viabilidad legal**:

- El **proceso de acreditación** supondría la principal barrera legal (a día de hoy el GNL no goza de consideración como combustible, pero el proyecto GNL ferroviario coordinado por el Institut Cerdà aportará avances importantes en este sentido).
- Si se opta por una **modificación** de **material** rodante ferroviario ya acreditado (locomotoras 310/311) se necesitará el **consentimiento de Adif** como propietario de las locomotoras creando una dependencia hacia Adif.
- Necesidad de elaborar **documentación sin marco de referencia** para el gas. En caso de querer desarrollar simplemente un prototipo de locomotora con tracción con GNL se requiere una **Autorización Provisional de Circulación**. No obstante, en caso de querer implementar la tecnología para su explotación comercial, se requerirá:
  - **Análisis de riesgos** derivados de la implementación de la modificación propuesta.

- Informe de un **evaluador independiente** sobre el proceso de evaluación y análisis del riesgo.

Por último, en cuanto a la **viabilidad económica**, del análisis realizado para que la tracción ferroviaria con GNL sea rentable tanto para el operador ferroviario como el agente gasista, se extraen las siguientes conclusiones:

- La viabilidad de la transformación para el **agente gasista** queda **condicionada** por los precios mínimos de venta del GNL. Éstos deben ser superiores o iguales a **0,295 €/l** si se transforman 3 locomotoras y superiores o iguales a **0,320 €/l** si se transforman 2 locomotoras. Asumiendo estos precios mínimos, todos los escenarios analizados presentan un **payback menor a 7 años** y una TIR superior al 12% para el agente gasista.
- Para el **operador ferroviario**, el **coste del diésel** es la **variable con mayor afectación** sobre la rentabilidad del proyecto. Sólo si a la elección del tipo de motor, número de locomotoras transformadas y reparto del uso de las locomotoras de GNL entre la flota disponible (variables sobre las cuales la ATP posee una mayor influencia) se le añaden los condicionantes de costes del diésel superiores o iguales a los 0,800 €/l y condiciones más favorables de **demanda ferroviaria** y costes de **acreditación** (variables sobre las cuales la APT tiene una menor o nula influencia), el payback para el operador ferroviario podría acercarse a los 7,3 años del **escenario óptimo**, pero en ningún caso bajar de los 7 años.

En base a las conclusiones derivadas de la primera fase, se inicia la segunda fase de la actividad con el objetivo de obtener un procedimiento para la realización de todas las modificaciones técnicas necesarias para llevar a cabo la transformación de una locomotora diésel a tracción GNL. Para lograr este objetivo, se han identificado tres bloques de acción diferenciados y en los que a continuación se exponen las principales conclusiones correspondientes:

- **INGENIERÍA:**
  - **Elección de la locomotora a transformar:** A pesar de que el estudio de la fase 1 se realizó en base a la locomotora 311, para esta segunda fase se ha deliberado de nuevo la idoneidad del modelo de locomotora a transformar. Las variables consideradas para su elección se basan en los siguientes parámetros:
    - Espacio disponible para la sustitución del motor o su transformación, así como el sistema de refrigeración.
    - Facilidad de acceso para operar en el interior.
    - Ubicación y espacio disponible para el depósito.

En base a estas variables, se ha elegido al modelo Adif 310 como locomotora base para definir el proceso de transformación necesario en la fase 2.

- **Elección de la solución final:** se ha propuesto el estudio de 4 posibles alternativas:
  - Sustitución del motor actual por otro motor a combustible GNL.
  - Transformación del motor actual a combustible GNL.
  - Sustitución del motor actual por otro motor de ciclo Dual (gasóleo + GNL).
  - Transformación del motor actual a ciclo Dual (gasóleo + GNL).
    - **Elección del motor:** se ha considerado la elección de la transformación del motor actual mediante un kit de conversión a gas natural de la empresa ECI. La elección se ha realizado en base a los siguientes parámetros:
      - *Motor de gas natural dedicado:* priorizado la utilización de motores de gas natural (dedicado), como la mejor forma de maximizar el consumo de gas y reducir las emisiones contaminantes. El tipo de utilización de las locomotoras de maniobras que se realiza en el Puerto de Tarragona, implica un cambio continuo de la carga del motor, lo que va en detrimento del correcto funcionamiento de los motores duales.
      - *Versión específica para uso en locomotoras.*
      - Dimensiones adecuadas al espacio disponible.
      - Facilidad de integración.
    - **Elección del depósito y ubicación:**
      - La locomotora Tipo 310 dispone de un depósito de combustible de 2.700 litros de gasóleo que se llena, de acuerdo con la información facilitada por el Puerto de Tarragona, una vez a la semana. Para mantener una capacidad equivalente debería disponerse de una capacidad de almacenamiento de GNL de 4.860 litros.
      - Teniendo en cuenta la disponibilidad de modelos y volumen disponible para su ubicación, se

concluye que se puede obtener una capacidad máxima de 2.164 litros de GNL.

- Esta capacidad significa que la autonomía de la locomotora de GNL se verá reducida a la mitad de la que tenía con el motor diésel. Los depósitos de GNL de la locomotora deberán llenarse dos veces a la semana.
- En cuanto a su ubicación, se ha considerado los siguientes parámetros: la seguridad de la instalación, minimizar su influencia en la modificación del CDG y la facilidad de uso y mantenimiento.
- **Análisis del impacto en el peso total del vehículo así como la modificación de su centro de gravedad debido a la modificación:** se considera que el desplazamiento del CDG no influye en el funcionamiento ni en la dinámica de la locomotora.
- **Planes de mantenimiento:** se ha realizado una propuesta de anexo al Manual descriptivo actual, incluyendo las nuevas particularidades del motor y sistema de combustible (depósitos, circuito y control de GNL).
- **Pruebas a realizar:** se ha realizado un estudio de identificación de las pruebas necesarias a realizar en caso de transformación:
  - *Pruebas de estanqueidad* para el circuito de GNL.
  - *Pruebas estáticas* de puesta en marcha y aceleración del vehículo en el banco de ensayos para validar el funcionamiento de la locomotora una vez realizada la transformación.
- **INTEGRACIÓN:** Se han identificado los siguientes trabajos necesarios para la integración del nuevo sistema en la locomotora actual:
  - Conversión del motor diésel a GNL junto con las modificaciones mecánicas pertinentes: sustitución de cilindros y adaptación culata del motor.
  - Instalación del sistema de alimentación de gas natural desde el suministro del motor hasta el conjunto de depósitos de GNL.
  - Sistema eléctrico-electrónico, sistema hidráulico, instalación de sensores del motor y cableado general.
- **VALIDACIÓN:** Se han definido la operativa para poder evaluar la locomotora modificada y validar su correcto funcionamiento. La transformación implica la adición de instrumentación adicional relativa a los siguientes sistemas:

- Información del sistema de gas.
- Nivel de los depósitos de GNL.
- Sistema de detección de fugas de gas.

## 14. ANEXO 1 -Plan de mantenimiento EMD 8-645-E GNL

### **\*\*\*ATENCIÓN\*\*\***

#### **Mantenimiento de la locomotora**

**El acceso a talleres de mantenimiento debe estar condicionado a que estos dispongan de las medidas de seguridad adecuadas al trabajo con locomotoras que funcionan con gas natural. Los talleres deben dotarse de ventilación y detectores adecuados para garantizar la seguridad en caso de fugas de gas. En el caso de que sea imprescindible el acceso a unos talleres no acondicionados, es obligatorio el vaciado completo de los tanques de GNL.**

En el Plan de mantenimiento que se presenta a continuación se han omitido todos los sistemas y equipos que no se han visto afectados por la transformación a gas natural de la locomotora.

Las actividades a realizar y su periodicidad deben entenderse como una propuesta que deberá validarse cuando se realice su integración con el plan de mantenimiento actual de la locomotora.

Se ha considerado la definición de un sistema de mantenimiento preventivo basado en los intervalos temporales siguientes:

1. Mantenimiento Mensual
2. Mantenimiento Semestral
3. Mantenimiento Anual
4. Mantenimiento Trianual
5. Mantenimiento Predictivo

**1. MENSUAL**

<b>Sistema</b>	<b>Parte</b>	<b>Acción</b>
Motor	Aceite motor	Comprobar nivel
ECU	Mensajes de error	Revisar
Hidráulico	Aceite	Comprobar nivel
Refrigeración	Nivel de agua	Comprobar nivel
Refrigeración	Aceite motor	Comprobar función
Instrumentación	Cuadro	Comprobar función

**2. SEMESTRAL**

<b>Sistema</b>	<b>Parte</b>	<b>Acción</b>
Motor	Aceite motor	Analizar
Motor	Filtro de aire	Comprobar presión diferencial
Motor	Filtro de aire	Limpiar
Motor	Actuadores	Comprobar función
Motor	Correas	Comprobar estado
Motor	Sensor volante motor	Comprobar función
Motor	Sensor picado	Comprobar función
GNL	Válvula general	Comprobar función
GNL	Válvula control velocidad	Comprobar función
GNL	Válvula de carga	Comprobar función
Hidráulico	Válvulas	Comprobar función
Refrigeración	Termostato	Comprobar función
Refrigeración	Ventiladores	Inspeccionar y limpiar
Refrigeración	Radiadores	Inspeccionar y limpiar

Refrigeración	Tapón presurizado	Comprobar función
Instrumentación	Conmutadores	Comprobar función
General	Motor	Comprobar limpieza
General	Aceite	Comprobar fugas
General	Agua	Comprobar fugas
General	GNL	Comprobar fugas
General	Hidráulico	Comprobar fugas
General	Pintura	Comprobar estado y óxidos
General	Baterías	Comprobar estado

### 3. ANUAL

<b>Sistema</b>	<b>Parte</b>	<b>Acción</b>
Motor	Inyectores de gas	Comprobar función
Motor	Bujías encendido	Cambiar
Motor	Sensores temperatura	Calibrar
Motor	Sensores presión	Calibrar
Motor	Tornillos culatas	Comprobar apriete
Motor	Motor de arranque	Comprobar función
Motor	Bobinas y cableado	Comprobar estado
GNL	Circuito gas	Comprobar estanqueidad
GNL	Sensores temperatura	Calibrar
GNL	Sensores presión	Calibrar
GNL	Válvulas	Comprobar función
Hidráulico	Filtro aceite	Cambiar
Hidráulico	Sensores temperatura	Calibrar
Hidráulico	Sensores presión	Calibrar

Refrigeración	Circuito de agua	Ensayo de presión
Refrigeración	Sensores temperatura	Calibrar

#### 4. TRIANUAL

<b>Sistema</b>	<b>Parte</b>	<b>Acción</b>
GNL	Depósitos criogénicos	Prueba de vacío

#### 5. PREDICTIVO

<b>Sistema</b>	<b>Parte</b>	<b>Acción</b>
Motor	Aceite motor	Analizar y cambiar s/resultados
Motor	Filtros aceite	Analizar y cambiar s/resultados
Motor	Filtro de aire	Analizar y cambiar s/resultados

## **15. ANEXO 2- Listado de componentes y equipos**

A continuación, se expone el listado de componentes y equipos. cuya modificación puede tener la consideración de significativa y, por tanto, requerir un informe de un organismo de evaluación de la seguridad relativo al proceso de gestión del riesgo correspondiente.

### **1. BOGIE / ÓRGANO DE RODADURA**

- 1.1. EJE MONTADO COMPLETO
- 1.2. SUSPENSIÓN PRIMARIA
- 1.3. SUSPENSIÓN SECUNDARIA
- 1.4. BASTIDOR DEL BOGIE / YUGO
- 1.5. RODAL
- 1.6. AMORTIGUADORES
- 1.7. REDUCTOR
- 1.8. SILENTBLOCKS
- 1.9. SISTEMA CAMBIO DE ANCHO

### **2. ACOPLAMIENTOS**

- 2.1. SISTEMA ENGANCHE AUTOMÁTICO, FRONTAL E INTERMEDIO (incluye comunicación eléctrica)
- 2.2. CONJUNTO DE TRACCIÓN
- 2.3. SISTEMA UNIÓN CAJA-BOGIE
- 2.4. ENGANCHES / TOPES DE EMERGENCIA

### **3. CAJA / VARIOS**

- 3.1 ESTRUCTURA DE CAJA (incluyendo testero)
- 3.2. SISTEMA DE BASCULACIÓN (incluyendo software)
- 3.3. SISTEMAS DE SUJECIÓN DE CARGAS
- 3.4. CONJUNTO DE CHOQUE
- 3.5. PUERTAS EXTERIORES (incluyendo software)
- 3.6. RAMPAS, ESTRIBOS. Y ESCALERAS DE ACCESO

- 3.7. LUNAS FRONTALES
- 3.8. LUNAS LATERALES
- 3.9. ASIDEROS Y PASAMANOS
- 3.10. ABRAZADERAS DE SEGURIDAD

#### **4. SISTEMA DE FRENO**

- 4.1. EQUIPO DE FRENO, CUALQUIERA DE SUS COMPONENTES
- 4.2. SISTEMA CONTROL DE FRENO
- 4.3. TIMONERÍA DE FRENO
- 4.4. ZAPATAS Y GUARNICIONES
- 4.5. TIRADORES DE ALARMA
- 4.6. DISCOS DE FRENO
- 4.7. INTERFACES CON EL SISTEMA DE FRENO
- 4.8. VÁLVULA DE PESADA 4.9. SOFTWARE

#### **5. SISTEMAS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN**

- 5.1. SISTEMAS:
  - 5.1.1. DETECCIÓN DE CALDEO
  - 5.1.2. DETECCIÓN DE INESTABILIDAD
  - 5.1.3. CAMBIO DE ANCHO
  - 5.1.4. ANTIBLOQUEO
  - 5.1.5. ANTIDESLIZAMIENTO
  - 5.1.6. BLENDING
  - 5.1.7. CONTROL DE SUSPENSIÓN/BASCULACIÓN
- 5.2. SOFTWARE
- 5.3. RED TCN

#### **6. ALTA TENSIÓN Y RETORNO POR TIERRA**

- 6.1. PANTÓGRAFO
- 6.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA
- 6.3. RESISTENCIAS DE FRENO
- 6.4. FRENO RECUPERACIÓN

## **7. EQUIPOS SEGURIDAD**

- 7.1. REGISTRADORES JURÍDICOS Y DE EVENTOS
- 7.2. ASFA
- 7.3. ERTMS
- 7.4. LZB
- 7.5. EBICAB
- 7.6. ATP
- 7.7. TREN TIERRA U OTROS EQUIPOS DE COMUNICACIONES DEL PUESTO DE CONDUCCIÓN
- 7.8. HOMBRE MUERTO
- 7.9. OTROS SISTEMAS DE SEÑALIZACIÓN
- 7.10. APARATOS DE ALARMA DE VIAJEROS

## **8. SISTEMA DE. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS**

- 8.1. SISTEMA DE CONTROL DE INCENDIOS (incluyendo software)
- 8.2. MATERIALES: DE INTERIORISMO, CABLEADOS, ETC.
- 8.3. PINTURAS PARA INTERIOR
- 8.4. SISTEMA DE COMUNICACIÓN (incluyendo software)
- 8.5. COMPARTIMENTACIÓN
- 8.6. BARRERAS
- 8.7. EXTINTORES
- 8.8. ILUMINACIÓN DE EMERGENCIA

## **9. EQUIPO DE TRACCIÓN**

- 9.1. TRANSFORMADOR PRINCIPAL
- 9.2. CONVERTIDOR DE TRACCIÓN
- 9.3. MOTORES DE TRACCIÓN
- 9.4. EQUIPO ELECTRÓNICO DE POTENCIA Y CONTROL
- 9.5. FILTROS DE ENTRADA
- 9.6. CONVERTIDORES PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A SISTEMAS AUXILIARES
- 9.7. DISYUNTOR EXTRA-RÁPIDO
- 9.8. SOFTWARE DE SEGURIDAD EN LOS EQUIPOS DE TRACCIÓN.

## **10. OTROS CONCEPTOS Y SISTEMAS**

- 10.1. GÁLIBO
- 10.2. DINÁMICA DE MARCHA
- 10.3. SEGURIDAD ELÉCTRICA
- 10.4. CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES
- 10.5. SEÑALES FRONTALES
- 10.6. SEÑALES DE COLA
- 10.7. ESPEJOS RETROVISORES
- 10.8. BOCINAS
- 10.9. COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA
- 10.10. CORRIENTES ARMÓNICAS
- 10.11. DISTRIBUCIÓN DE PESOS POR EJE
- 10.12. ACCESO Y UBICACIÓN DE P.M.R.'s
- 10.13. MEGAFONÍA





## **17. ANEXO 4 -Presupuesto del proceso de transformación**

A continuación, se expone el presupuesto estimado de la transformación realizado por la ingeniería GPO, encargada del estudio:

Port de Tarragona



Locomotora GNL

DOC. REF	T17048_20171222_IT 3 Anexo 1_v00	DATE:	2018-02-05	VER:	3
----------	----------------------------------	-------	------------	------	---

**SUJETO: PRESUPUESTO PRELIMINAR**
**DESCRIPCION DEL PROYECTO:**

Retrofitting de una locomotora de maniobras de tracción diesel a GNL. Incluye:

- Transformación del motor a GNL
- Sustitución del depósito de combustible
- Sistema de detección de fugas de gas
- Integración del sistema

**SUPOSICIONES:**

Costes estimados según el diseño y cálculos preliminares del proyecto

Los precios incluyen el suministro, instalación y puesta en marcha

Este presupuesto es una estimación preliminar que se desarrollará de acuerdo con el proyecto definitivo.

ITEM	Unidades	Cantidad	SUBTOTAL (€)	TOTAL (€)
<b>1. KIT DE CONVERSION A GNL</b>				<b>225.000 €</b>
ECI SIP Kit conversion GNL para EMD 8-645 E	Set	1	201.000	
Sistema de gasificación	Ud	1	18.000	
Detector de fugas de gas	Set	1	6.000	
<b>2. DEPÓSITOS GNL</b>				<b>55.500 €</b>
Depósito Chart HNLG 171	Ud	2	24.000	
Depósito Chart HNLG 100	Ud	3	31.500	
<b>3. INTEGRACIÓN</b>				<b>196.000 €</b>
Integración de todo el sistema	Ud	1	110.000	
Accesorios y material adicional	Ud	1	25.000	
Puesta en funcionamiento / soporte técnico	Ud	1	41.000	
Ensayo de potencia con resistencias	Ud	1	20.000	
<b>4. ACREDITACIÓN</b>				<b>163.000 €</b>
Validación y Certificación (1a unidad) /Estimación)	Ud	1	160.000	
Autorización de Puesta en Servicio (1a unidad)	Ud	1	3.000	
<b>5. COSTES INDIRECTOS</b>				<b>268.000 €</b>
Ingeniería + Análisis de riesgos	Ud	1	140.000	
Project Management	Ud	1	80.000	
Contingencias	Ud	1	48.000	
<b>6. FORMACIÓN</b>				<b>7.000 €</b>
Curso Básico inicial	Ud	1	1.500	
Curso específico para Operadores	Ud	1	3.000	
Curso específico para Mantenimiento	Ud	1	2.500	
<b>PRESUPUESTO DE CONVERSIÓN A GNL</b>			<b>TOTAL</b>	<b>914.500 €</b>

## 18. ANEXO 5 -Análisis de riesgos (Automotor Serie 2600)

A continuación, a modo de orientación, se exponen los aspectos a considerar en el análisis de riesgos realizado para el proyecto relativo a la prueba piloto del automotor.

- a. Identificación de requisitos legales y otros requisitos (estándares, normas) de aplicación en el proyecto
- b. Estudio de identificación de riesgos HAZID con los siguientes criterios
  - i. Riesgos del tren
    1. Descarrilamiento
    2. Colisión
    3. Fuga de gas por rotura de tubería con el tren en marcha
    4. Fuga de gas por rotura de tubería con el tren detenido en lugar semiconfinado
    5. Gases de combustión a mayor temperatura que en el sistema diésel
    6. Incendio en el motor
  - ii. Riesgos externos
    1. Incendio externo
    2. Efecto dominó
  - iii. Riesgos naturales/ambientales
    1. Alta temperatura ambiente
    2. Viento extremo
    3. Inundación
    4. Hierro
    5. Tormenta eléctrica
    6. Subsistencia
  - iv. Riesgos en mantenimiento
    1. SIMOPS (operaciones simultáneas)
  - v. Riesgos en operaciones de repostaje
    1. Fuentes de ignición
    2. Presencia de personal ajeno dentro del perímetro de seguridad
  - vi. Riesgos para la salud
    1. Superficies a temperaturas extremas
    2. Proyección de fragmentos
    3. Ruido
- c. Procedimientos operativos de la unidad: puesta en marcha, mantenimientos de la unidad, carga y vaciado, parada en condiciones de normalidad y emergencia

- d. Análisis funcional de operatividad HAZOP
  - i. Nodos considerados
    - 1. Sistema de alimentación a motor con GNL
    - 2. Se utilizarán los modelos de su catálogo HLNG 100, como depósito principal y el HLNG 72 como secundario. Ambos conectados entre sí.
    - 3. Operación de llenado de los depósitos de GNL
  - ii. Causas
    - 1. Error humano. Cierre de válvula manual de consumo de GNL o GNC
    - 2. Cierre espurio de la válvula solenoide aguas abajo del filtro
    - 3. Fallo de válvula reductora de presión abriendo completamente
    - 4. GNL bloqueado entre válvulas
    - 5. Paro del motor
    - 6. Perdida de intercambio de calor en el evaporador
    - 7. Ensuciamiento del filtro
    - 8. Rotura de tubo en evaporador
    - 9. Operación de mantenimiento que requiera purgado
    - 10. Bloqueo de válvula reductora en posición de máxima apertura por congelamiento
    - 11. Operación de repostaje en depósito caliente, o fuera de uso regular (incluyendo primera carga)
    - 12. Depósito de GNL no ha sido despresurizado previamente a la operación de llenado
    - 13. Formación de hielo en la boca de la pistola de GNL debido a poca pericia en la operación de llenado o falta de limpieza
    - 14. No se conecta el tren a la puesta a tierra de la estación
- e. Establecer clasificación de zonas conforme a UNE-EN 60079-10
- f. Establecer las distancias de seguridad en función de un análisis de riesgo cuantitativo.
- g. Establecer un Plan de actuación ante emergencia frente a los escenarios recogidos en el análisis de riesgo
- h. Análisis FMECA con los siguientes modos de fallo
  - i. Rotura del sub-bastidor
  - ii. Vehículo fuera de gálibo estático
  - iii. Rotura de los anclajes del sub-bastidor a la estructura del vehículo
  - iv. Rotura de los elementos de rodadura
  - v. Carga por eje por encima de los límites
  - vi. Vehículo fuera de gálibo dinámico

- vii. Afectación a la dinámica de la marcha
- viii. Tracción intempestiva
- ix. Falta de tracción ante solicitud
- x. Vehículo no es capaz de detenerse en la distancia establecida
- xi. Contactos directos a las personas
- xii. Contactos indirectos a las personas
- xiii. Sobrecarga
- xiv. Derivaciones
- xv. Perturbaciones electromagnéticas
- xvi. Incorrecto mantenimiento
- xvii. Explotar
- xviii. Funcionamiento por debajo de las prestaciones esperadas
- xix. Fallo estructural o de absorción de vibraciones
- xx. No aísla acústicamente
- xxi. No aísla térmicamente
- xxii. Obstrucción
- xxiii. Pérdida de rigidez mecánica o afloje
- xxiv. Fallo estructural del equipo a presión
- xxv. Escape de gases en zona no adecuada
- xxvi. Presión incorrecta a la entrada del motor
- xxvii. Fugas
- xxviii. Evaporación incorrecta
- xxix. Fallo mecánico en la corona del motor
- xxx. No se cargan las baterías
- xxxii. Falta de protección de las cajas ATEX
- xxxiii. Falta de refrigeración
- xxxiii. Rotura de la línea de gas

## 19. Referencias

Adif (2015), *Situación de Licencias Empresas Ferroviarias y Habilitaciones para Adjudicación de Capacidad*. Ministerio de Fomento, 2015. Disponible en: [http://www.adif.es/ca\\_ES/empresas\\_servicios/doc/EyS\\_RLSF\\_Lic.pdf](http://www.adif.es/ca_ES/empresas_servicios/doc/EyS_RLSF_Lic.pdf)

Adif (2012), *Actualización Declaración sobre la Red 2012*, disponible en: [http://www.adif.es/es\\_ES/conoceradif/doc/CA\\_DRed\\_Completo.pdf](http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/CA_DRed_Completo.pdf).

Adif (2012), correos internos y conversaciones telefónicas.

Adif (2015), *Actualización Declaración sobre la Red 2015*, disponible en: [http://www.adif.es/es\\_ES/conoceradif/declaracion\\_de\\_la\\_red.shtml](http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/declaracion_de_la_red.shtml)

Adif (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

Adif (2013d), *Mapa de Instalaciones Logísticas y Técnicas*, disponibles en: [www.adif.es/AdifWeb/instalacionesMapa.jsp](http://www.adif.es/AdifWeb/instalacionesMapa.jsp).

AESF (2015), *Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria*, 2015. Disponible en: [http://www.seguridadferroviaria.es/AESF/lang\\_castellano/](http://www.seguridadferroviaria.es/AESF/lang_castellano/)

ARMF (2015), *Associació Reconstrucció Material Ferroviari*. Información adquirida a través de correos internos y conversaciones telefónicas y página web disponible en: <http://www.armf.net/ca/armf.php>

Bureau Veritas (2013), *Interoperabilidad – Seguridad Ferroviaria*, presentación de De Bustos, D., Abril 2010.

Bureau Veritas (2013), *Especificación Técnica de Homologación-ETI*, Sector Ferroviario, documento interno, mayo de 2013.

Bureau Veritas (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

CHART (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

Encana (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

Enagás (2013), *El GNL, un combustible alternativo para el FC. Una solución sostenible*, Enagás Transporte S.A.U., Dirección General de Infraestructuras y ATR, Murcia - Febrero 2013.

EMIMOB (2015), Estudio realizado por Institut Cerdà previamente. Referencias Internas.

ENRIC GROUP (2015), Shijiazhuang Enric Gas Equipment CO., LTD. *CIMC*, 2015. Conseguido por contactos directos a través de correo electrónico.

ESK (2013), correos internos y conversaciones telefónicas.

FMI (2015), *Perspectivas de la economía mundial, 2015. Fondo monetario internacional*. Disponible en: <https://www.imf.org/external/spanish/pubs/ft/weo/2015/02/pdf/texts.pdf>

GRI (Gas Research Institute) (1993), *LNG as a fuel for Railroads: Assessment of Technology Status and Economics*, Strategic Planning and Analysis Department.

GUASCOR (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

INGESIC (2015), correos internos y conversaciones telefónicas.

Pasch (2013), correos internos y conversaciones telefónicas.

SENDECO (2015), Información disponible en:  
<http://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

## 20. Lista de Acrónimos y Abreviaciones

<b>ADIF</b>	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias
<b>AESF</b>	Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria
<b>ANS</b>	Autoridad Nacional de Seguridad
<b>APS/AES</b>	Acreditación y autorización de puesta en servicio
<b>APT</b>	Autoridad Portuaria de Tarragona
<b>CDG</b>	Centro de Gravedad
<b>CE</b>	Certificado Europeo
<b>CIAF</b>	Comisión de Investigación de Accidentes Ferroviarios
<b>CNMC</b>	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
<b>DeBo</b>	Organismo Designado
<b>DP</b>	Differential Pressure
<b>DTB</b>	Digital Terminal Box
<b>ECE</b>	Economic Commission for Europe
<b>EEFF</b>	Empresas Ferroviarias
<b>EMD</b>	Electro-Motive Diesel
<b>ECU</b>	Engine Control Unit
<b>EDC</b>	Engine Control Display
<b>ETH</b>	Especificaciones Técnicas de Homologación
<b>ETI</b>	Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad
<b>FPC</b>	Fuel Pump Contactor
<b>GN</b>	Gas Natural
<b>GNL</b>	Gas Natural Licuado
<b>GNC</b>	Gas Natural Comprimido
<b>GFCV</b>	Gas Flow Control Valve
<b>GCOV</b>	Gas Cut-off Valve

<b>GIV</b>	Gas Inlet Valve
<b>ISA</b>	Evaluador Independiente de Seguridad
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardisation
<b>KPI</b>	Key Performance Indicator
<b>LSF</b>	Ley del Sector Ferroviario
<b>NFPA</b>	National Fire Protection Association
<b>NoBo</b>	Organismo Notificado
<b>PIB</b>	Productor Interior Bruto
<b>PID</b>	Piping and Instrumentation Diagram/Drawing
<b>PM</b>	Partículas en suspensión (del inglés Particulate matter)
<b>PCP</b>	Pre-Chamber Pressure
<b>RFIG</b>	Red Ferroviaria de Interés General
<b>SIS</b>	Spark Ignition System
<b>TIR</b>	Tasa Interna de Rentabilidad
<b>UIC</b>	Unión Internacional de Ferrocarriles (del francés Union Internationale des Chemins de Fer)
<b>VAN</b>	Valor Actual Neto
<b>VTS</b>	Valve Temperature Status