

JAVIER LEBRATO NÚÑEZ

**ANÁLISIS DE EMISIONES DE TECNOLOGÍAS
ALTERNATIVAS EN VEHÍCULO PESADO**

**Trabajo fin de Máster
dirigido por Dr. JOAN MANEL VALLÈS RASQUERA**

Màster en Enginyeria Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2020

ÍNDICE

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN	1
3	INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA EURO VI	3
	3.1 Ciclo Otto combustión estequiométrica.....	5
	3.2 Ciclo diésel inyección gas natural a alta presión	8
4	ENSAYOS REALIZADOS EN CAMPO.....	11
	4.1 Introducción	11
	4.2 Equipos	11
	4.3 Ensayo 1: Tecnología HPDI	15
	4.4 Ensayo 2: Tecnología motor dedicado	17
	4.5 Ensayo 3: Tecnología diésel	20
5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	22
	5.1 Metano no medido	25
6	ANÁLISIS WELL-TO-WHEEL.....	26
	6.1 Propiedades del combustible	27
	6.2 Vehículo dedicado	28
	6.3 Vehículo HPDI.....	29
	6.4 Resultados Well-to-wheel.....	29
	6.4.1 Origen del gas natural	29
	6.4.2 Beneficios del biometano.....	34
	6.4.3 Precio combustible por kilómetro.....	36
7	CONCLUSIONES	37

FIGURAS

Figura 1. Combustibles para vehículo pesado. Reducción de emisiones vs implementación. Se incluyen H2 (hidrógeno), LNG (gas natural licuado); GLP (gas licuado del petróleo); Diesel; Petrol (gasolina) y Kits conversión (conversiones con kits en mercado postventa).....	3
Figura 2. Tabla de emisiones para vehículo pesado. Ciclo estacionario (arriba) y transitorio (abajo). ...	4
Figura 3. Evolución de la regulación de emisiones Euro en vehículo industrial.	5
Figura 4. Ejemplo de catalizador de 3 vías. Fuente Iveco.	6
Figura 5. Comparación sistema postratamiento gas natural (arriba); diésel (abajo). Fuente IVECO.	6
Figura 6. Motor Cursor y curva Par – Potencia. Fuente FPT.	7
Figura 7. Esquema general funcionamiento motor dedicado. Fuente IVECO.	7
Figura 8. Configuración vehículo Iveco gas natural. Fuente IVECO.	8
Figura 9. Detalle inyector HPDI. Fuente WESTPORT.	9
Figura 10. Motor Volvo HPDI en banco de ensayos. Fuente VOLVO.	9
Figura 11. Esquema sistema alimentación HPDI. Fuente WESTPORT.....	10
Figura 12. Módulo tanque GNL (izquierda). Bomba y vaporizador de GNL (derecha). Fuente WESTPORT.....	10
Figura 13. Equipos PEMS. Fuente TNO.....	12
Figura 14. Instalación sensores en el escape. Fuente TNO.	13
Figura 15. Camión VOLVO GNL. Fuente TNO.	15
Figura 16. Detalle de la ruta. Fuente TNO.....	16
Figura 17. Resultados VOLVO en ruta. Fuente TNO y VOLVO.....	16
Figura 18. Camión IVECO GNL. Fuente: LNG Blue Corridors.	17
Figura 19. Detalle de la ruta.	18
Figura 20. Orografía de la ruta.	18
Figura 21. Emisiones CO durante la ruta.....	18
Figura 22. Emisiones CO2 durante la ruta.....	19
Figura 23. Emisiones THC durante la ruta.	19
Figura 24. Emisiones NOx durante la ruta.....	19
Figura 25. Resultados IVECO en ruta.....	20
Figura 26. Camión diésel IVECO.	21
Figura 27. Ruta camión diésel IVECO.	21
Figura 28. Orografía del terreno.	21
Figura 29. Resultados camión diésel en ruta.	22
Figura 30. Comparación emisiones CO2.	22
Figura 31. Comparación emisiones NOx.	23
Figura 32. Comparación emisiones metano.....	24
Figura 33. Comparación emisiones CO2-equivalente.	25
Figura 34. Vehículo GNL. Sistema de venteo.	26
Figura 35. Condiciones de venteo. Fuente IVECO.....	26
Figura 36. Esquema del concepto “Well to Wheels” (WTW) en relación con los vehículos de MCI	27
Figura 37. Origen GNL en el “EU mix”.....	30
Figura 38. Diferentes composiciones de GNL en función de las regiones.	31
Figura 39. Huellas de GEI de las diferentes composiciones de GNL en los cuatro macrorregiones de la UE	31
Figura 40. Desglose de la composición de CO2eq en el análisis WtT.	32

Figura 41. Análisis WtW para vehículo IVECO.....	33
Figura 42. Análisis WtW para vehículo VOLVO HPDI.	33
Figura 43. Estación Gasrec biometano.....	34
Figura 44. Reducción CO2 en WtW utilizando biometano. Fuente LNG Blue Corridors.....	35
Figura 45. Emisiones CO2 en WtW. Fuente NGVA.....	35
Figura 46. Comparación del precio por kilómetro recorrido.	36

TABLAS

Tabla 1 – Características de la ruta realizada.....	15
Tabla 2 – Características de la ruta realizada.....	17
Tabla 3 – Propiedades combustibles fósiles utilizadas en el informe.....	28
Tabla 4 – Consumo y energía por vehículo (I).....	28
Tabla 5 – Consumo y energía por vehículo (II).....	29

1 RESUMEN

En el presente documento se analizan, de un modo general, las tecnologías actuales para aplicaciones en vehículo pesado, más concretamente en camiones, explicando con mayor detalle la tecnología utilizada a nivel de motor y en sistemas de postratamiento de gases de escape. El objetivo del proyecto es estudiar las emisiones reales en carretera de una serie de camiones utilizando diferentes combustibles, tanto convencional (diésel) como alternativos (gas natural). Las mediciones en campo son llevadas a cabo gracias a un equipo (portable) de medida de las emisiones, denominado PEMS.

Por otro lado, con la intención de analizar el impacto medioambiental total de los combustibles examinados, se establece una comparativa teniendo en cuenta tanto las emisiones de CO₂ desde la extracción y distribución del combustible (Well-to-tank, WtT), como las concernientes a la emitidas en vehículo (tank-to-Wheels, TtW). Este tipo de análisis (denominado Well-to-Wheels, WtW) se llevan a cabo frecuentemente para determinar con certeza cuál es la verdadera reducción de huella de carbono de los combustibles disponibles en la actualidad.

2 INTRODUCCIÓN

En la situación actual, el 96,6% del transporte por carretera depende del diésel para su funcionamiento, y este representa una parte importante de la emisión total de gases de efecto invernadero: los vehículos pesados son responsables de una cuarta parte de las emisiones de CO₂ en el transporte en Europa, y un 6% de las emisiones totales en la Unión Europea. Gracias a numerosas iniciativas, se han identificado y sugerido algunas soluciones, como la promoción y desarrollo sostenible de vehículos comerciales propulsados a gas natural. A nivel europeo, tanto la Comisión como la industria pretenden reducir dichas emisiones, a través de la aportación al mercado de tecnologías que permitan el cambio, que sean beneficiosas para el medio ambiente y, también muy importante, que representen una oportunidad económicamente factible para los usuarios finales. La Comisión Europea plantea como objetivos de reducción de CO₂ los siguientes escenarios (expresado en porcentaje comparado con la media en la Unión Europea entre julio de 2019 y junio 2020):

- 15% de reducción a partir de 2025.
- 30% de reducción a partir del 2030.

Entre las soluciones más prometedoras en términos de combustibles alternativos, el gas natural es sin duda una solución que permite un impacto real en el medio ambiente, siendo viable económicamente en toda la cadena de valor. Se puede determinar que los objetivos del 2025 se podrían alcanzar utilizando la tecnología ya desarrollada en la actualidad (los vehículos duales Euro VI con tecnología HPDI superan esa reducción actualmente como se verá en el presente documento).

Con esta reducción de contaminantes se pretende contribuir a alcanzar los objetivos fijados en el acuerdo de París¹, sobre el calentamiento global y sus efectos. Se quiere también reducir los costes de consumo de combustible para los transportistas, con la intención a largo plazo

¹ https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en

de reducir, entre 2020 y 2030, 50 millones de toneladas de CO₂, y un ahorro en consumo de petróleo de hasta 170 millones de toneladas entre 2020 y 2040.

Los vehículos de combustibles alternativos representaron el 3,4% de la flota europea de automóviles en los últimos años, siendo el uso de combustibles alternativos para camiones y autobuses prácticamente insignificante, ya que no llega ni al 1% (claramente dependiente del diésel). Mientras que la cuota de actividad de aplicaciones eléctricas en vehículos ligeros se prevé que alcance el 15% en 2050, la electricidad, a diferencia del GNL o los biocombustibles, no se considera una opción factible a corto plazo (2025) para el transporte por carretera de largo alcance. En este sentido, se prevé que la proporción de GNL en camiones pesados aumente a 2,8% y 8,2% en 2030 y 2050, respectivamente. De hecho, algunos usuarios finales de gran nombre, como Carrefour e IKEA, entre otros, han incluido camiones de combustible alternativo en sus flotas (Carrefour tiene como objetivo gestionar 200 camiones de reparto con gas natural en este año; DHL ya tiene más de 100 vehículos de GNL; Tesco más de 100, etc.).

Con todo ello, existe actualmente una falta de atractivo hacia estas alternativas por parte del público en general, así como de las empresas en particular: como dato, ninguna marca alemana de vehículos pesados como Mercedes o MAN ha apostado de forma significativa por el GNL, ya no hay modelos disponibles en el mercado actualmente, aunque sí por el GNC, en vehículos de recogida de basura. Además, la falta de infraestructura con estaciones que suministren gas licuado es un hándicap importante (unas 260 en toda Europa²) para los usuarios a la hora de comprar vehículos de este tipo. Se espera que su crecimiento vaya en aumento, ya que el número de estaciones actuales es escaso (principalmente en países como Alemania, norte y este de Europa). En este sentido, se estipula que el número mínimo para ofrecer una red de infraestructura sólida– estaciones cada 400km – se alcance en los próximos años viendo el crecimiento experimentado en la última década, así como el respaldo dado a nivel europeo con la Directiva para el desarrollo de infraestructura alternativa (2014/94/EU³).

El gas natural es considerado la alternativa de tránsito a corto-medio plazo en este tipo de vehículos. En el futuro a largo plazo, se plantea la posibilidad del uso de hidrógeno como combustible complementario a la tecnología ya existente. En la gráfica siguiente, se representan los diferentes combustibles para vehículo pesado, en función de la posibilidad de implementación y distribución, así como en función de la reducción en emisiones de efecto invernadero.

² <https://www.ngva.eu/stations-map/>

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>

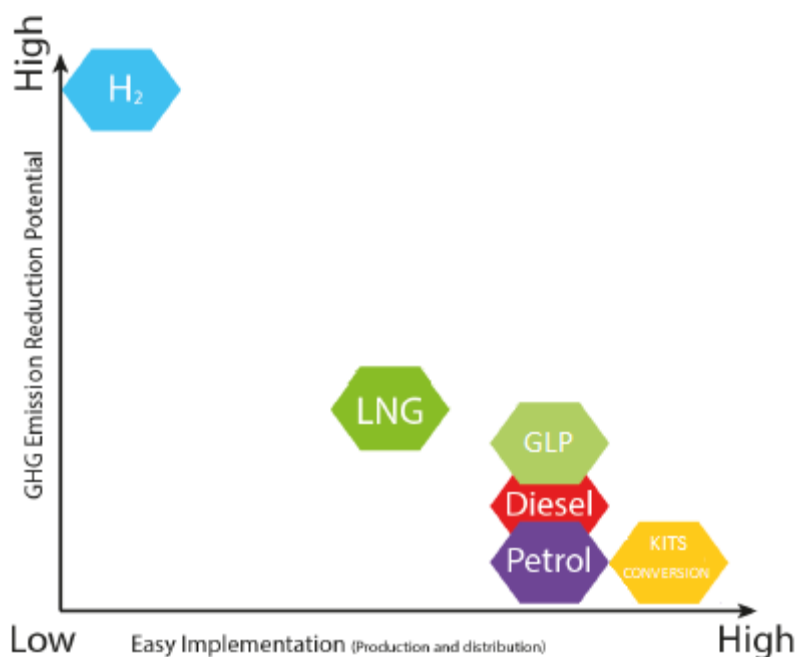


Figura 1. Combustibles para vehículo pesado. Reducción de emisiones vs implementación. Se incluyen H₂ (hidrógeno), LNG (gas natural licuado); GLP (gas licuado del petróleo); Diesel; Petrol (gasolina) y Kits conversión (conversiones con kits en mercado postventa).

La tecnología a nivel de motor en gas natural está probada, es una tecnología madura que ofrece soluciones para los problemas de contaminación y emisiones de CO₂ como se ha demostrado en los ensayos del presente documento, con reducciones a nivel vehicular desde el 14% al 37% en función de la tecnología. Sin embargo, el elevado coste de los vehículos con respecto al diésel, unido a su bajo precio de valor residual (el mercado de vehículos usados de gas natural es incierto por el momento) hace que muchas empresas de transporte sean reticentes a comprarlos a gran escala. No obstante, esta barrera que ofrece el mercado actualmente puede ser considerada como temporal, ya que se espera que sea mitigada con el transcurso del tiempo, debido, por un lado, al creciente mercado de gas natural licuado, que estabilizará los precios de su valor residual y, por otro lado, debido a la estandarización de los componentes criogénicos (el número de fabricantes de este tipo de componentes es cada vez mayor, al igual que sus centros de homologación y certificación).

3 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA EURO VI

Los motores de combustión interna han estado en el mercado durante muchos años, y todo hace indicar que será así en las próximas décadas, a pesar de la fuerte aparición de los vehículos eléctricos en los últimos años. La demanda actual de reducir la polución a causa del transporte lleva consigo la adopción de nuevas alternativas con el objetivo de disminuir de forma progresiva la dependencia existente de los combustibles derivados del petróleo. Se define a continuación los tipos de vehículos propulsados a gas natural:

- Vehículos mono-fuel: se denominan así a aquellos vehículos dedicados a gas natural, diseñados para funcionar únicamente con gas natural o biometano;

- Vehículos bi-fuel: son aquellos que funcionan con gas natural/biometano o gasolina. Dado que el gas natural se almacena en tanques de combustible a alta presión, los vehículos bi-fuel requieren dos sistemas de combustible separados. Este tipo de vehículos trabajarán o con gasolina o con gas natural, pero nunca a la vez;
- Vehículos dual-fuel: se caracterizan por su funcionamiento con gas natural/ biometano pero que usan diésel para la asistencia al encendido. Permiten a los usuarios aprovechar los beneficios de un motor diésel como es su la eficiencia, pero sin los riesgos asociados ante una posible falta de combustible (gas), debido a la amplia disponibilidad existente de estaciones diésel. Este tipo de vehículo trabaja con ambos combustibles de forma simultánea, pudiendo trabajar sólo con diésel en caso de agotarse el gas natural.

Desde la implantación de las normativas Euro a principios de la década de los 90, se ha ido progresando en sus diferentes etapas acompañadas de una reducción mayúscula en las emisiones contaminantes en cuanto a CO, NOx, HC y PM. En la actualidad, la normativa vigente para emisiones es EURO VI. En la gráfica siguiente se puede observar la comparativa en las restricciones actuales con respecto a las etapas precedentes.

Stage	Date	Test	CO	HC	NOx	PM	PN	Smoke
			g/kWh				1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15		
Euro III	1999.10 <i>EEV only</i>	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66	5.0	0.10 ^a		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 ¹¹	

^a PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹

Stage	Date	Test	CO	NMHC	CH ₄ ^a	NOx	PM ^b	PN
			g/kWh					1/kWh
Euro III	1999.10 <i>EEV only</i>	ETC	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02	
	2000.10		5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 ^c	
Euro IV	2005.10		4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	
Euro V	2008.10		4.0	0.55	1.1	2.0	0.03	
Euro VI	2013.01	WHTC	4.0	0.16 ^d	0.5	0.46	0.01	6.0×10 ^{11e}

^a for gas engines only (Euro III-V: NG only; Euro VI: NG + LPG)
^b not applicable for gas fueled engines at the Euro III-IV stages
^c PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹
^d THC for diesel (CI) engines
^e PN limit for PI engines applies for Euro VI-B and later [4374]

Figura 2. Tabla de emisiones para vehículo pesado. Ciclo estacionario (arriba) y transitorio (abajo).

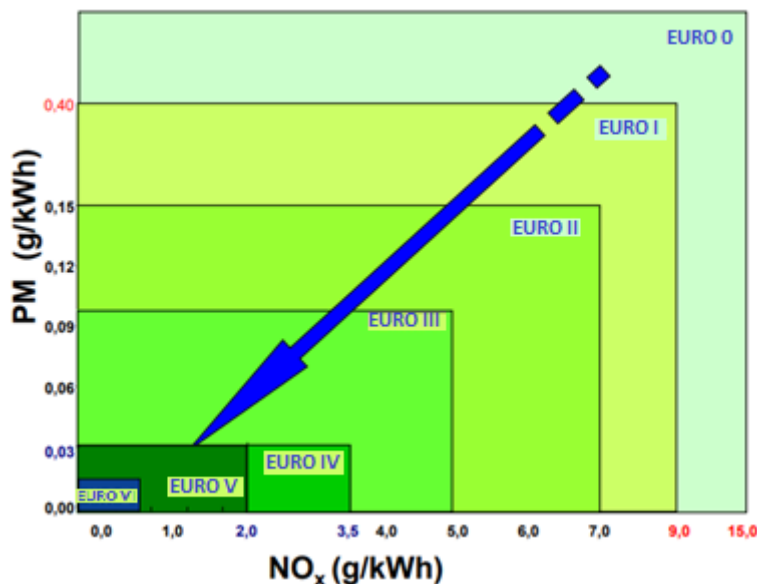


Figura 3. Evolución de la regulación de emisiones Euro en vehículo industrial.

Para aplicaciones de vehículo pesado, Heavy Duty, las alternativas de motor que utilizan gas natural cumpliendo la normativa actual son las siguientes:

1. Ciclo Otto de combustión estequiométrica (mono-fuel);
2. Ciclo diésel con inyección de gas natural a alta presión (dual-fuel).

3.1 Ciclo Otto combustión estequiométrica

Este concepto se basa en un funcionamiento de encendido por chispa, teniendo una inyección de combustible multipunto o de punto único, así como un catalizador de tres vías como sistema de post tratamiento para gases de escape. Todos estos sistemas están comandados por una unidad de control electrónico (ECU) dedicada a administrar estas funciones.

El motor funciona en relación estequiométrica durante todo su funcionamiento y, por lo tanto, ofrece la mejor solución para el control de emisiones. Con los dispositivos de distribución modernos y la cámara de combustión, es posible cumplir con un nivel de rendimiento similar al motor diésel y, al mismo tiempo, reducir la brecha de eficiencia de combustible al 10-15% con respecto al motor diésel, como referencia. En términos de emisiones de CO₂, este tipo de combustión muestra niveles más bajos que en diésel.

El catalizador de tres vías puede convertir simultáneamente HC, NO_x y CO en CO₂ y H₂O con una eficiencia superior al 95%.

La temperatura para NO_x y CO está cerca de 250 °C y para THC (principalmente CH₄) cerca de 450 °C. Al tener el catalizador una ubicación adecuada (no demasiado lejos de la salida motor, evitando así una caída de temperatura de los gases salientes al entrar en el catalizador), las temperaturas de los gases de escape permiten una eficiencia alta del sistema.

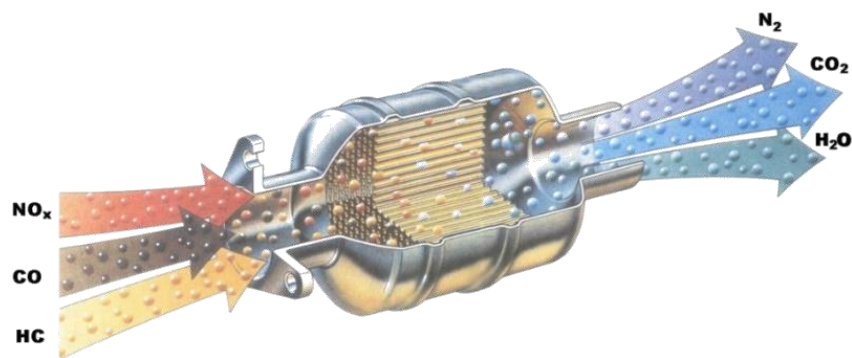


Figura 4. Ejemplo de catalizador de 3 vías. Fuente Iveco.

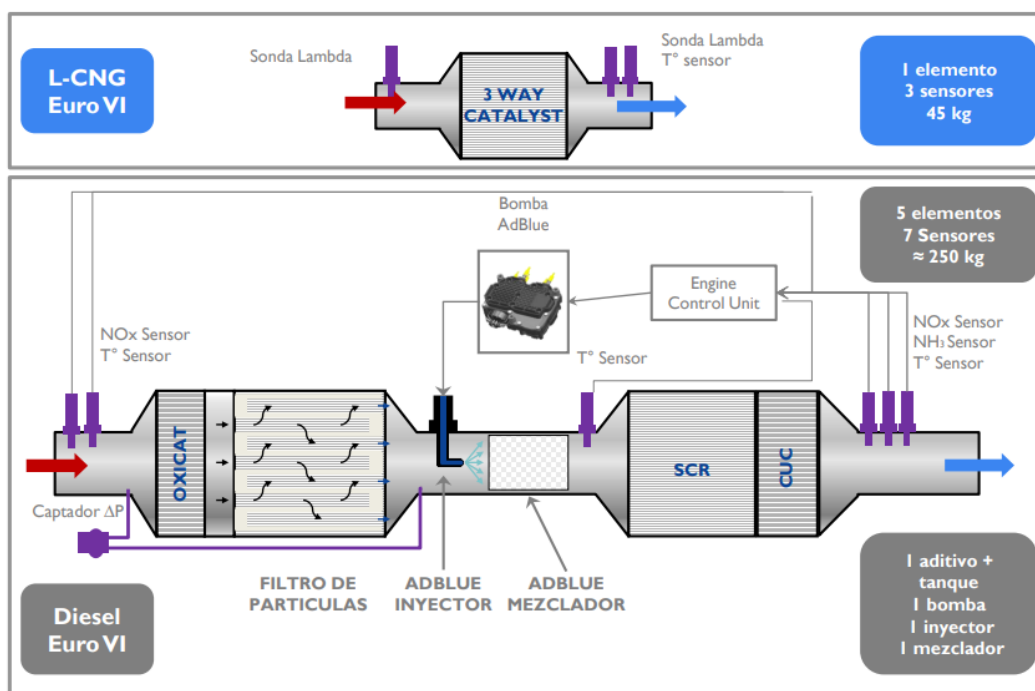


Figura 5. Comparación sistema postratamiento gas natural (arriba); diésel (abajo). Fuente IVECO.

En la figura anterior se puede apreciar el importante ahorro en cuanto a espacio en vehículo, peso del mismo y aditivos utilizados (diésel con utilización de urea, monofuel sin urea), en favor del catalizador de 3 vías instalado en vehículos mono-fuel de gas natural.

Un ejemplo de motores que emplean esta tecnología son los motores Cursor desarrollados por FPT – Fiat Power Train. En la figura se muestra un motor Cursor, desarrollado inicialmente para autobuses urbanos y camiones de recogida de basura.

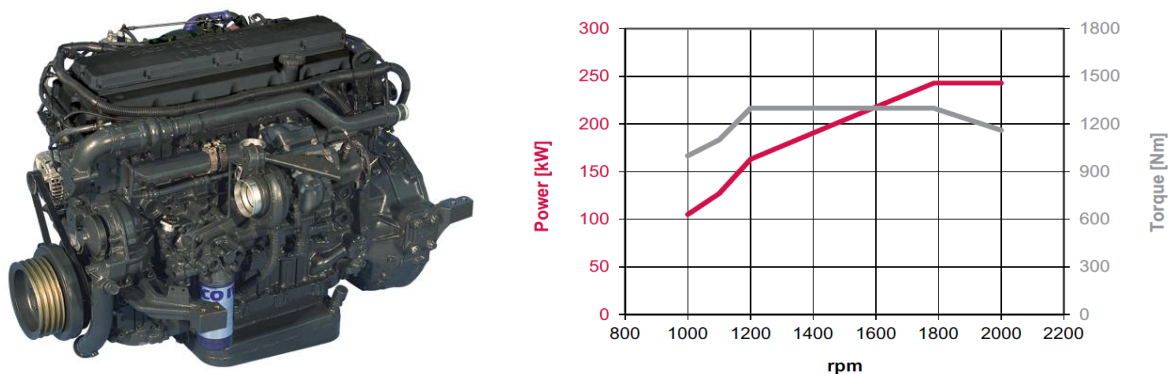


Figura 6. Motor Cursor y curva Par – Potencia. Fuente FPT.

Concepto de combustión: cuatro tiempos, carga homogénea, encendido por chispa, inyección multipunto secuencial en los puertos de admisión.

El sistema de alimentación en vehículo, desde las bombonas de gas hasta la inyección en cámara viene representado en el siguiente esquema.

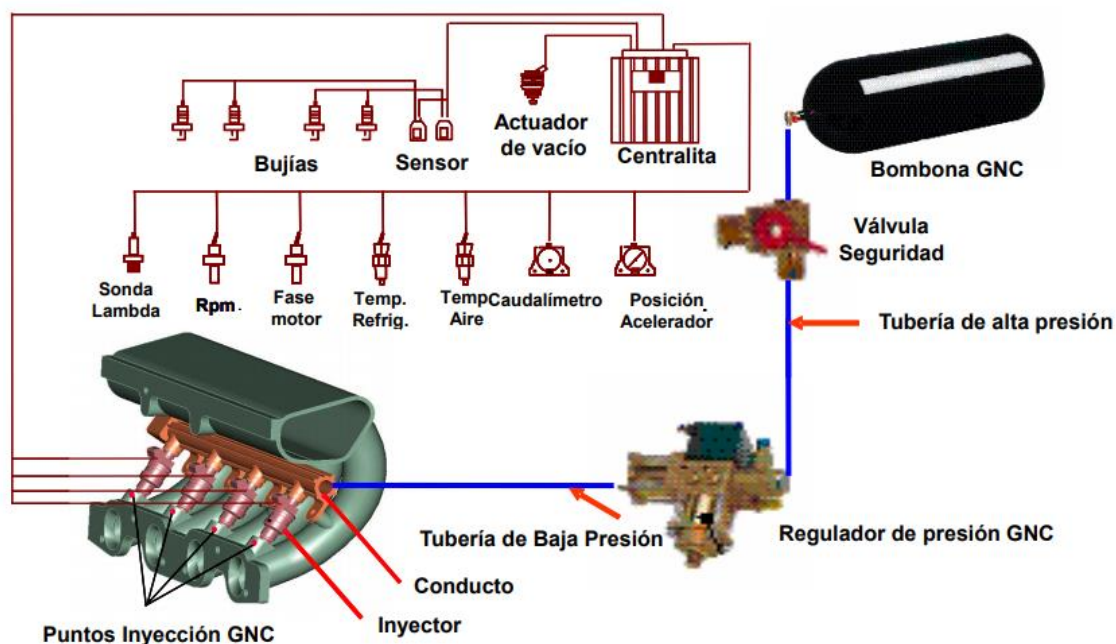


Figura 7. Esquema general funcionamiento motor dedicado. Fuente IVECO.

Hay que mencionar que el control avanzado de circuito cerrado y la tecnología de catalizador de tres vías adoptada para el control de emisiones evitan el uso de herramientas adicionales como EGR.

Normalmente la configuración del camión de GNL que monta este tipo de motores se basa en dos tanques de GNL, un tanque de GNL más bombonas de GNC de 70 litros (en caso de no encontrar suministro para GNL) o directamente bombonas de GNC.

	CNG	C-LNG	DOUBLE LNG
Configuración			
Capacidad GNC	920 L	460 L	-
Capacidad GNL	-	540 L	1.080 L
Autonomía*	520 km	260 + 670 km 930 km	1 340 km

*hasta

Figura 8. Configuración vehículo Iveco gas natural. Fuente IVECO.

3.2 Ciclo diésel inyección gas natural a alta presión

Esta tecnología del motor se basa en la inyección directa de alta presión (HPDI). El gas se suministra directamente al cilindro mediante un sistema especial de inyección de gas a alta presión que proporciona condiciones para mezclar una combustión limitada similar al proceso en motores diésel convencionales. Se inyectan cantidades piloto adicionales de combustible diésel para lograr la ignición. La presión de gas durante la inyección está entre 200 y 300 bar, presiones que en el vehículo se logran mediante una bomba de alta presión instalada en el tanque de GNL. El vehículo está equipado con un sistema de tratamiento de gases de escape diésel EU VI estándar que incluye un catalizador oxidante (DOC), SCR y filtro de partículas diésel (a pesar del reemplazo importante de diésel con gas natural, se mantiene el filtro de partículas en el vehículo, a diferencia del vehículo dedicado, con el objetivo de reducir partículas durante el arranque y en funcionamiento sólo diésel).

En el corazón del motor hay un inyector especial con una aguja doble concéntrica. Gracias a este diseño, se permite entregar pequeñas cantidades de combustible diésel y grandes cantidades de gas natural. Este diseño se puede ver las figuras siguientes:



Figura 9. Detalle inyector HPDI. Fuente WESTPORT.

La tecnología HPDI conserva los principios operativos de un motor diésel. La inyección ocurre cerca del punto muerto superior. Poco después de la inyección, el combustible diésel se enciende de forma automática y posteriormente enciende la parte de gas.

Al utilizar la tecnología HPDI, más del 90% del combustible diésel se reemplaza por gas metano, calculado en términos de energía equivalente. Además, el motor HPDI coincide con su homólogo diésel en potencia, par, eficiencia, respuesta transitoria y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de forma significativa como se verá posteriormente en el apartado de ensayos realizados.

A continuación, se pueden ver los componentes de inyección en el motor:

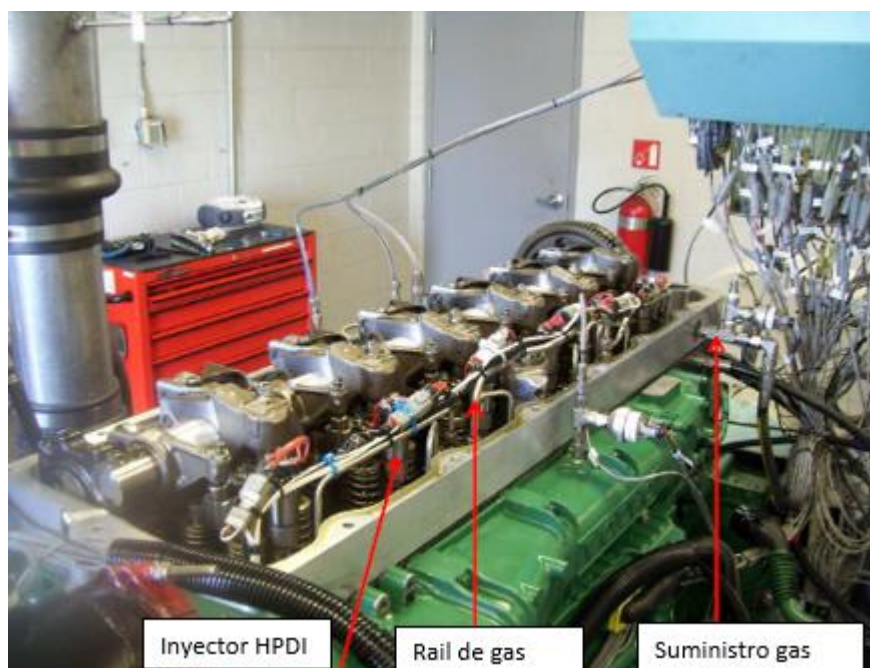


Figura 10. Motor Volvo HPDI en banco de ensayos. Fuente VOLVO.

El combustible de gas licuado se almacena en un tanque de GNL y se extrae gracias a una bomba. El GNL se vaporiza utilizando el exceso de calor del refrigerante del motor y sale del módulo del tanque a aproximadamente 40°C y 30 MPa. El gas caliente a alta presión se filtra y pasa a través de un recipiente acumulador que amortigua las fluctuaciones de presión y proporciona gas natural para el arranque del motor. La figura siguiente da una idea esquemática del sistema de combustible HPDI y del motor.

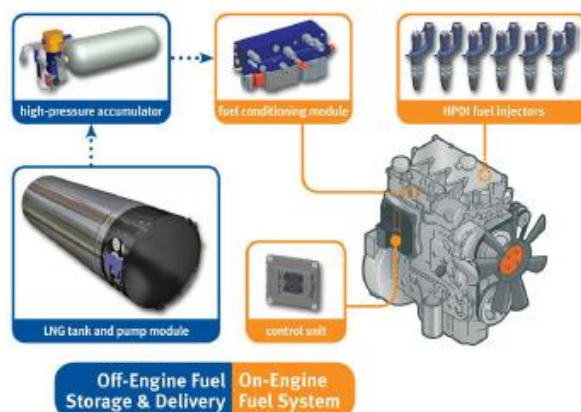


Figura 11. Esquema sistema alimentación HPDI. Fuente WESTPORT.

El módulo de tanque de GNL está construido por un recipiente aislado de vacío, un vaporizador y una bomba de alta presión. Ésta es una bomba criogénica accionada hidráulicamente con una capacidad para presurizar GNL a 350 bar. La bomba y el vaporizador están integrados en el tanque.

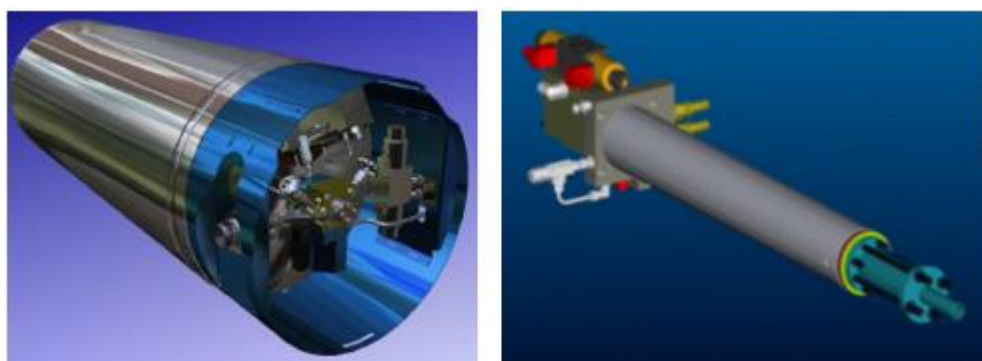


Figura 12. Módulo tanque GNL (izquierda). Bomba y vaporizador de GNL (derecha). Fuente WESTPORT.

Las pruebas de motor demuestran que el límite de carga y el rango de potencia es similar al de los motores diésel convencionales. Además, debido al proceso de combustión, las emisiones de HC del motor son bajas. Se forman bajas cantidades de partículas durante la combustión y se requiere un sistema de tratamiento de partículas para cumplir con las regulaciones de emisiones de la UE VI. Las emisiones de NOx del motor están en niveles similares a las de los motores diésel con la misma capacidad.

4 ENSAYOS REALIZADOS EN CAMPO

4.1 Introducción

En base a lo anteriormente explicado, una vez conocido cómo funcionan cada uno de los sistemas a nivel vehicular, de motor y sistemas de tratamiento de los gases de escape, se muestran a continuación los ensayos realizados en carretera para el análisis real de emisiones en estos vehículos.

Se analizan los resultados en 3 ensayos: un ensayo para vehículo con tecnología HPDI, otro ensayo para tecnología dedicada (motor estequiométrico) y un ensayo para vehículo diésel, gracias al cual se podrá hacer la comparativa de emisiones.

Las pruebas realizadas en el vehículo VOLVO con tecnología HPDI en las instalaciones de VOLVO (Gotemburgo, Suecia) no son públicos, por lo que se utilizan para la comparativa unos ensayos PEMS (Portable Emissions Measurement System) publicados por TNO para el Ministerio de Infraestructura de Países Bajos. A pesar de que los trayectos son diferentes a los realizados en Suecia, los resultados obtenidos por este estudio, incluidos en el presente documento, están totalmente en línea con los obtenidos en las pruebas realizadas en las instalaciones de VOLVO, y es por ello por lo que se consideran fiables y útiles para la comparativa.

Por su parte, los ensayos realizados en el vehículo IVECO, tanto gas como diésel en las instalaciones de IDIADA, son resultados públicos que han sido incluidos en informes para la Comisión Europea, dentro de proyectos de subvención europea como el LNG Blue Corridors⁴.

A título personal, he participado en el análisis de los resultados obtenidos en PEMS, así como de su presentación y discusión para la Comisión Europea dentro del marco del proyecto LNG Blue Corridors anteriormente mencionado.

Como práctica común en los 3 ensayos, se realizan rutas a diferentes velocidades, pudiéndose considerar rutas urbanas, rural y carretera. Con respecto al pesaje de la carga en cada vehículo, se realizada a la máxima permitida.

4.2 Equipos

Estas mediciones se hacen gracias a un equipo de medida PEMS (Portable Emission Measurement System). Este equipo está compuesto por dos dispositivos encargados del análisis de emisiones y consumo de combustible tanto diésel como gas. Estos son:

- Horiba OBS – One: mide las emisiones provenientes de motor.
- Micromotion: mide el flujo de combustible a la entrada y a la salida.

El PEMS usado durante estos ensayos en carretera permite medir varios contaminantes como CO, CO₂, NO_x, THC y CH₄ en condiciones reales y de consumo para su posterior cálculo de emisiones. Los valores de partículas no se pueden medir debido al equipo disponible.

⁴ <http://lngbc.eu/>

Este equipo (Horiba OBS - One) tiene dos componentes principales: el equipo de análisis de gas y el equipo de tubo de Pitot⁵ del sistema de escape (en flujo y temperatura). Un sistema de GPS es instalado para saber la posición y velocidad en cada momento.

Este dispositivo mide la concentración de gases contaminantes y flujo de escape. Usando estos datos, es posible calcular los gramos que emite el vehículo en diferentes condiciones de conducción.

Para estar adecuadamente alimentado se necesita una carga externa aportada a través de unas baterías de 24V, así como también tres botellas de gas (aire, helio y otros gases).



Figura 13. Equipos PEMS. Fuente TNO.

⁵ Info: <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/marco-teorico/tubo-pitot/>



Figura 14. Instalación sensores en el escape. Fuente TNO.

El caudalímetro utilizado es tipo Coriolis encargado de medir el flujo de combustible tanto a la entrada como a la salida entre el tanque y el depósito. Este aparato tiene su propia calibración que se realiza de forma periódica. El máximo rango de medición es 1.080 kg/h.

En este caso los resultados de emisiones se obtienen directamente a partir de los cálculos realizados por el equipo PEMS, acorde a la información disponible en la normativa Annex II 582/2011/EC y amendments:

$$NOx\ mass(t) = C_{exNOx}(t + DTNOx) \times M_{NO2} \times Q_{ex}(t); \text{ siendo}$$

$NOx\ mass(t)$: masa de NOx en $\frac{g}{s}$

$DTNOx$: retraso del medidor medido en s

C_{exNOx} : concentración NOx medido en ppm

M_{NO2} : masa molecular medido en g

Q_{ext} : caudal de salida medido en s

$$CO\ mass(t) = C_{exCO}(t + DTCO) \times M_{CO} \times Q_{ex}(t); \text{ siendo}$$

$CO\ mass(t)$: masa de CO en $\frac{g}{s}$

DTCO: retraso del medidor medido en s
CexCO: concentración CO medido en ppm
M_{CO}: masa molecular medido en g
Qext: caudal de salida medido en s

$$CO2\ mass(t) = CexCO2(t + DT_{CO2}) \times M_{CO2} \times Q_{ex}(t); \text{ siendo}$$

CO2 mass(t): masa de CO2 en $\frac{g}{s}$
DT_{CO2}: retraso del medidor medido en s
CexCO2: concentración CO2 medido en ppm
M_{CO2}: masa molecular medido en g
Qext: caudal de salida medido en s

$$THC\ mass(t) = CexTHC(t + DT_{THC}) \times M_{THC} \times Q_{ex}(t); \text{ siendo}$$

THC mass(t): masa de THC en $\frac{g}{s}$
DT_{THC}: retraso del medidor medido en s
CexTHC: concentración THC medido en ppm
M_{THC}: masa molecular medido en g
Qext: caudal de salida medido en s

4.3 Ensayo 1: Tecnología HPDI

El vehículo para este ensayo es un camión VOLVO FH 420 Euro VI Step C LNG con un kilometraje cercano a los 20.000 km.



Figura 15. Camión VOLVO GNL. Fuente TNO.

Se utilizan cargas para simular el peso de un remolque cargado en condiciones de trabajo normal. Se obtiene un peso total de 46 T. La cabeza tractora en vacío tiene un peso de 15,5 T.

En las rutas realizadas, se combinan tramos de autopista con tramos urbanos en los que predominan las bajas velocidades, a marchas cortas.

Tabla 1 – Características de la ruta realizada.

Duración	(s)	5.130
Distancia	(km)	114
Velocidad media	(km/h)	80,0

4.4 Ensayo 2: Tecnología motor dedicado

A continuación, se muestran las características de camión que utiliza una tecnología 100% gas natural:



Figura 18. Camión IVECO GNL. Fuente: LNG Blue Corridors.

Se trata de un Iveco Stralis GNL 400 CV. El peso total del vehículo son 40.023 kg. El kilometraje del camión en el momento de la realización de los ensayos es de 354 km.

Las mediciones de emisiones y consumo de gas se realizaron siguiendo los siguientes pasos:

- Instalación de equipos de emisión y consumo de gas.
- Rendimiento de las emisiones y el consumo de gas en cinco velocidades de estado estacionario diferentes, comenzando a 50 km/h y aumentando la velocidad del vehículo cada 10 km / h hasta la velocidad máxima.
- Realización de las pruebas de emisiones y consumo de gas siguiendo la siguiente ruta.

Tabla 2 – Características de la ruta realizada.

Duración	(s)	12.000
Distancia	(km)	240
Velocidad media	(km/h)	75,0
Altitud máxima	(m)	573,0
Altitud mínima	(m)	87,0

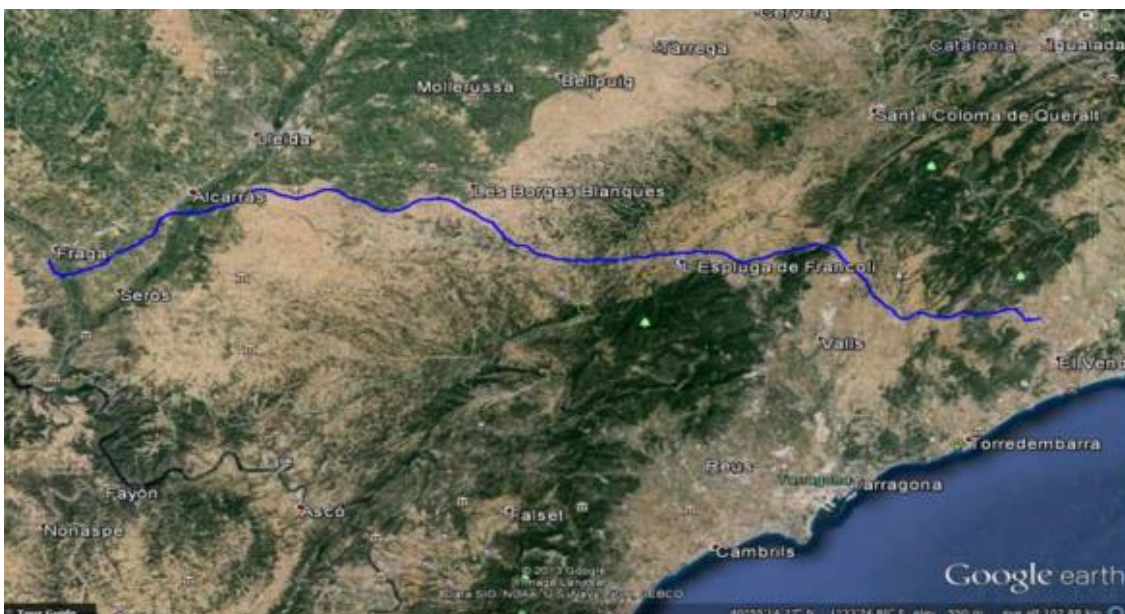


Figura 19. Detalle de la ruta.

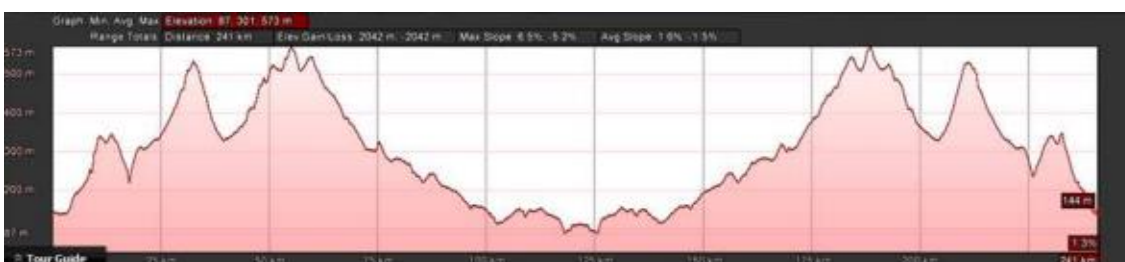


Figura 20. Orografía de la ruta.

Durante la ruta, el vehículo empieza en condiciones frías hasta alcanzar su máxima velocidad a 89 km/h. Durante el recorrido, se obtienen las siguientes gráficas en cuanto a emisiones contaminantes:

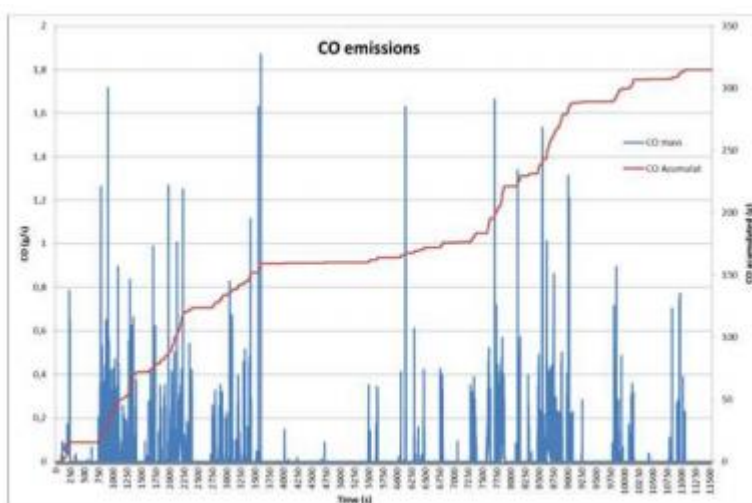


Figura 21. Emisiones CO durante la ruta.

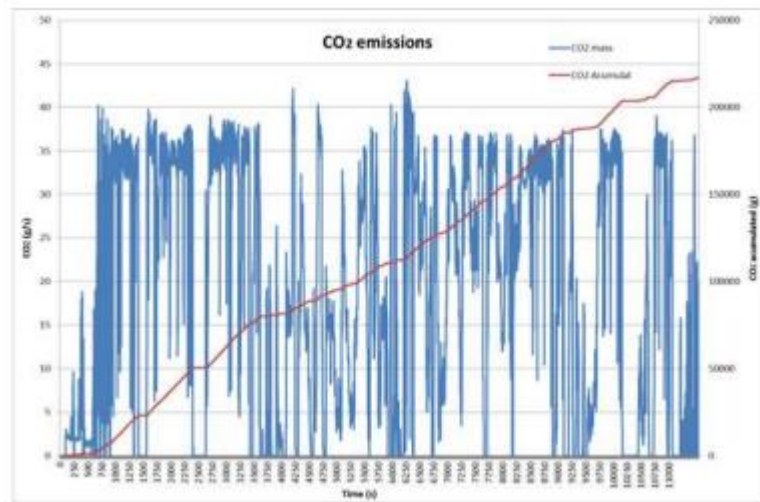


Figura 22. Emisiones CO2 durante la ruta.

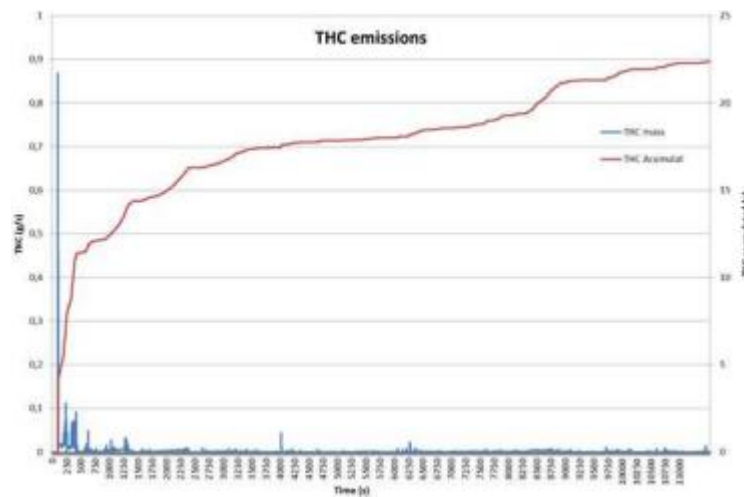


Figura 23. Emisiones THC durante la ruta.

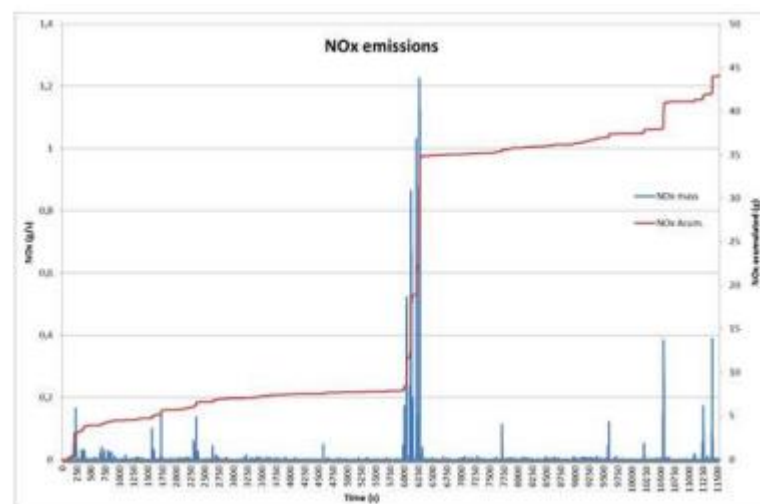


Figura 24. Emisiones NOx durante la ruta.

Para concluir, se muestra en la siguiente imagen los resultados de emisiones obtenidos en función de la velocidad del vehículo, así como el promedio de toda la ruta:

			Emissions results					Gas consumption results
Speed (km/h)	Gear	Engine speed (rpm)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	THC (g/km)	CH ₄ (g/km)	NO _x (g/km)	(g/km)
50	11 th	1.174,5	0,0000*	523,21	0,0018	0,0000*	0,001	207,4
60	12 th	1.094,0	0,0040	535,48	0,0080	0,0047	0,076	211,2
70	12 th	1.273,3	0,0007	589,53	0,0044	0,0033	0,104	234,8
80	12 th	1.452,1	0,0000*	666,99	0,0039	0,0020	0,119	265,3
89	12 th	1.610,0	0,0000*	757,19	0,0055	0,0006	0,154	302,5

		CO	CO ₂	THC	CH ₄	NO _x	Gas consumption
Total	g	314,73	216.905,6	22,36	13,146	40,77	85.598,7
	g/km	1,327	914,80	0,0943	0,0554	0,1720	361,0

Figura 25. Resultados IVECO en ruta.

Finalmente, mencionar que los asteriscos de la tabla hacen referencia al posible mal funcionamiento de los analizadores, por lo tanto, el valor de CO para las velocidades de 50 km/h, 80 km/h y 89 km/h son serán tenidos en consideración.

4.5 Ensayo 3: Tecnología diésel

Con el fin de hacer una comparativa de las tecnologías de gas natural anteriormente descritas, se realizan ensayos con un vehículo diésel Euro VI con las mismas características de ruta, así como de capacidad de motor. En este caso, se elige un camión diésel de 420 CV, cuyos resultados se muestran a continuación.



Figura 26. Camión diésel IVECO.

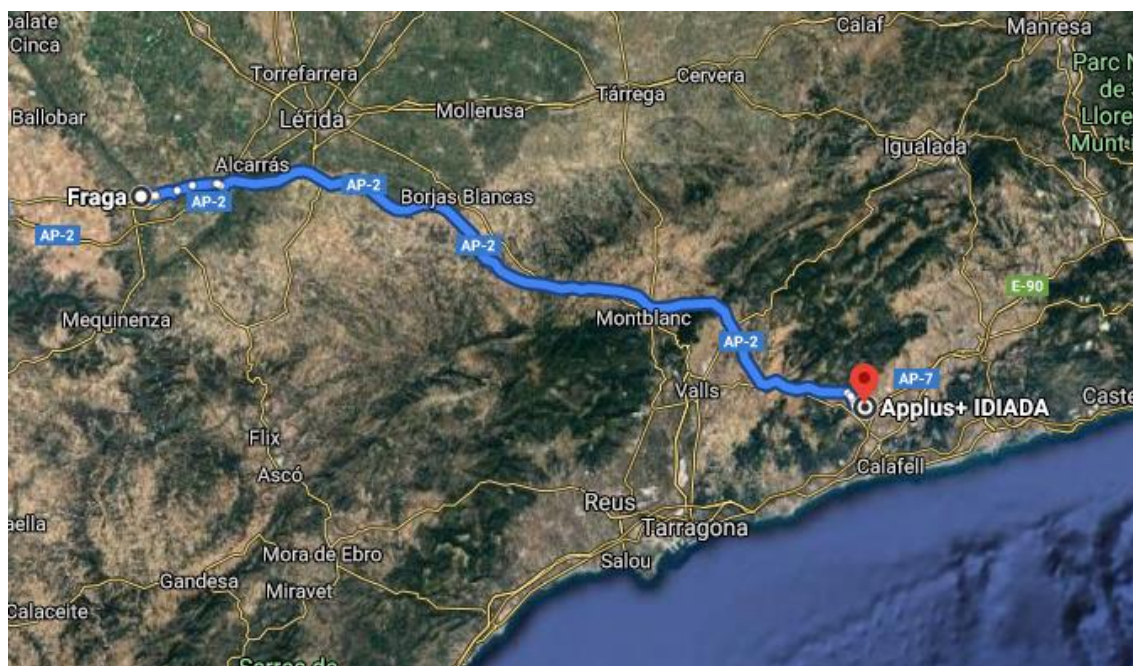


Figura 27. Ruta camión diésel IVECO.

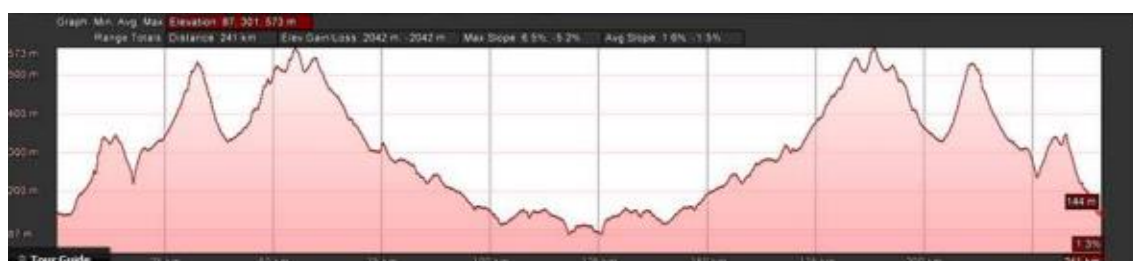


Figura 28. Orografía del terreno.

		CO ₂	CH ₄	NO _x	consumption
Total	g/km	1067	0,0	0,24	309

Figura 29. Resultados camión diésel en ruta.

5 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Además de las emisiones de CO₂ de los vehículos ensayados, se estudian los contaminantes regulados en las normativas Euro, esto es, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y partículas de materia (PM), aunque de este último, como se ha comentado al inicio del apartado, no habrá datos medidos en campo. Para hacer una comparativa de las tecnologías existentes, se analizan 3 modelos de vehículo: por un lado, los vehículos 100% gas (camiones IVECO dedicados); por otro lado, los vehículos HPDI (camiones VOLVO), y finalmente, también se añaden los vehículos diésel Euro VI actuales, con el objetivo de representar la tecnología diésel actual, y poder hacer así una comparación entre todos.

El dióxido de carbono es el resultado de cualquier combustión juntamente con el vapor de agua y otros productos. Se trata de un gas incoloro que no es considerado tóxico, pero en concentraciones elevadas puede afectar a las funciones respiratorias.

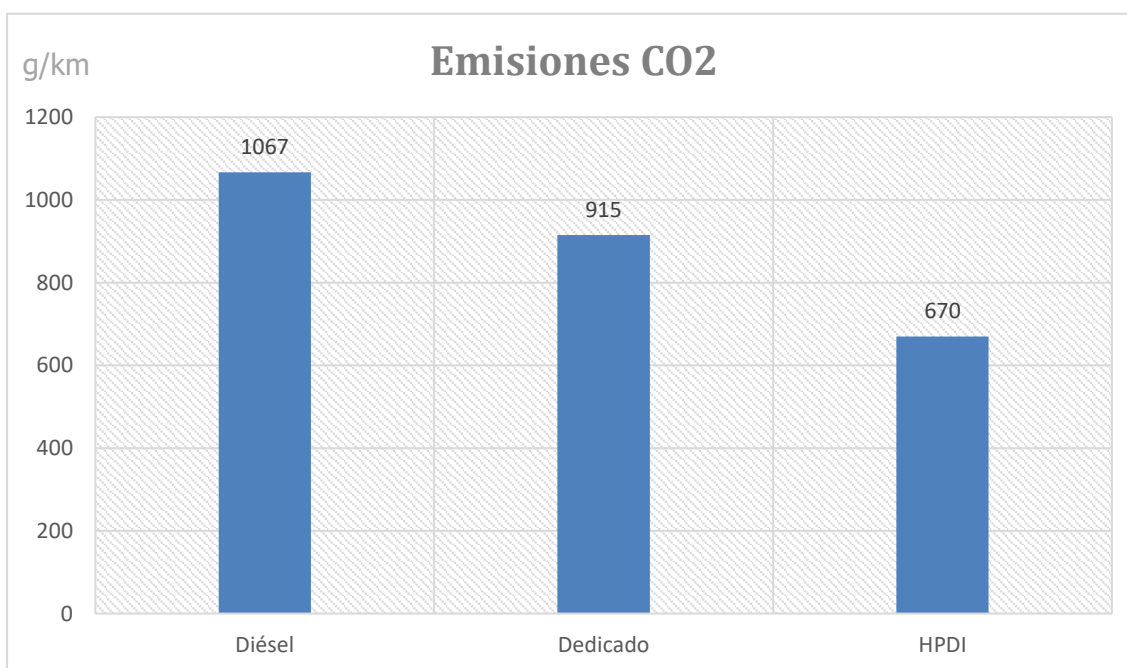


Figura 30. Comparación emisiones CO2.

En la figura anterior se puede apreciar la significativa reducción de las tecnologías que utilizan gas natural en comparación con el vehículo diésel. Esta reducción es mayor cuando se utiliza una tecnología HPDI (-37% versus diésel) que al utilizar un motor dedicado (-14% versus diésel).

Las combustiones incompletas generan CO, un gas inodoro, incoloro y explosivo, tóxico en concentraciones elevadas que puede bloquear el transporte del oxígeno y provocar efectos cardiovasculares. Como producto de combustiones incompletas también se producen HC que actúan de diferentes formas en el organismo llegando a ser cancerígeno.

El resto de oxígeno se combina con el propio nitrógeno del aire formando óxidos de nitrógeno, combinaciones de nitrógeno y oxígeno nocivas para las vías respiratorias. Reduce las funciones pulmonares y forma parte de la producción de niebla fotoquímica y lluvia ácida. A continuación, se muestran las emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno.

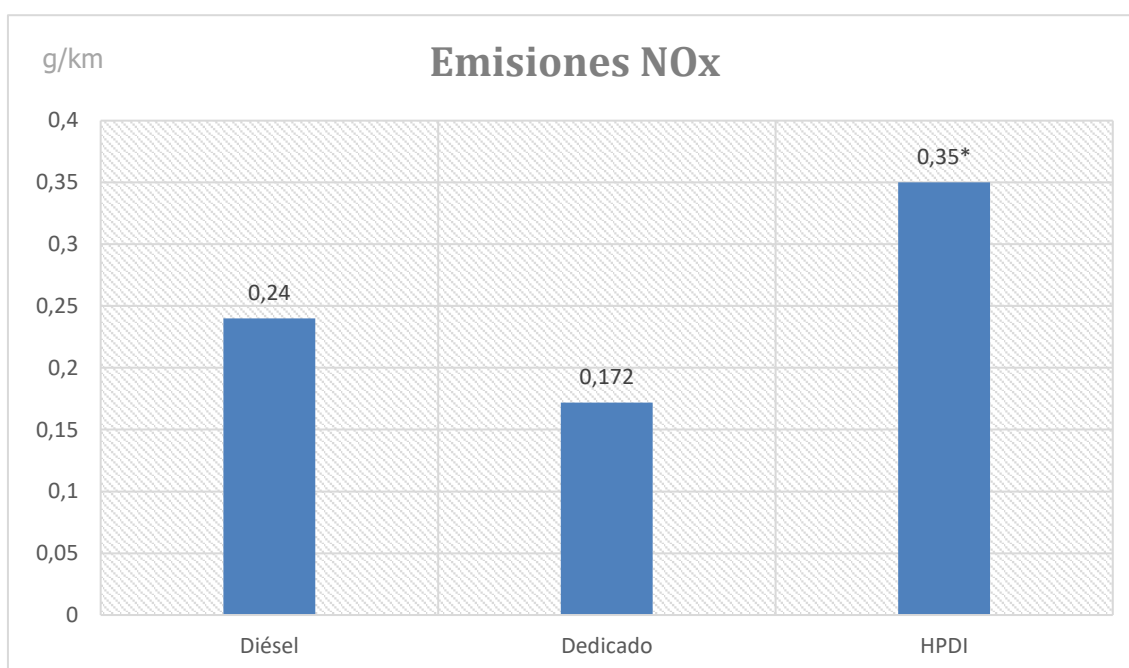


Figura 31. Comparación emisiones NOx.

En cuanto a NOx, la reducción es significativa para la tecnología que utiliza sólo gas natural como combustible, llegando a un valor de reducción promedio de -28% con respecto a un vehículo similar propulsado por diésel. A su vez, los vehículos que utilizan tecnología HPDI tienen ventajas con el diésel, aunque dependen fuertemente del tramo de ruta elegida y de las variaciones de régimen que se experimenten durante el mismo, ya que en función de los transitorios experimentados, los resultados de NOx puede oscilar considerablemente. Aunque los resultados de este ensayo indican valores más altos de emisiones de NOx, hay estudios que indican que cuando al mantenerse un régimen constante, realizando trayectos de larga distancia, las emisiones de NOx medidas en gramo por kilómetro se reducen a la mitad.

Los combustibles líquidos contienen nano partículas que no se queman y salen a la atmósfera por el tubo de escape, se trata de las partículas de materia las cuales pueden ser PM10 cuando su diámetro es inferior a 10 µm o bien PM2,5 cuando el diámetro es inferior a 2,5 µm. Las partículas sólidas o líquidas son peligrosas para la salud ya que debido a su tamaño se pueden depositar en los pulmones provocando cáncer y aumentando el riesgo a sufrir problemas cardíacos. Debido a la naturaleza y composición del combustible gas natural frente al diésel,

hace que la reducción en partículas sea mayúscula en favor del gas natural, siendo como mínimo del 90%. Desafortunadamente los equipos de medida PEMS utilizados en el caso del modelo IVECO no miden partículas.

En este punto, es muy interesante establecer la comparativa entre ambas tecnologías de gas natural con respecto al metano no quemado en el motor (methane slip), y tampoco tratado en el catalizador, que sale a la atmósfera. Se conoce el gran impacto que produce, estimándose su equivalencia en 21 veces por cada gramo emitido de CO₂⁶.

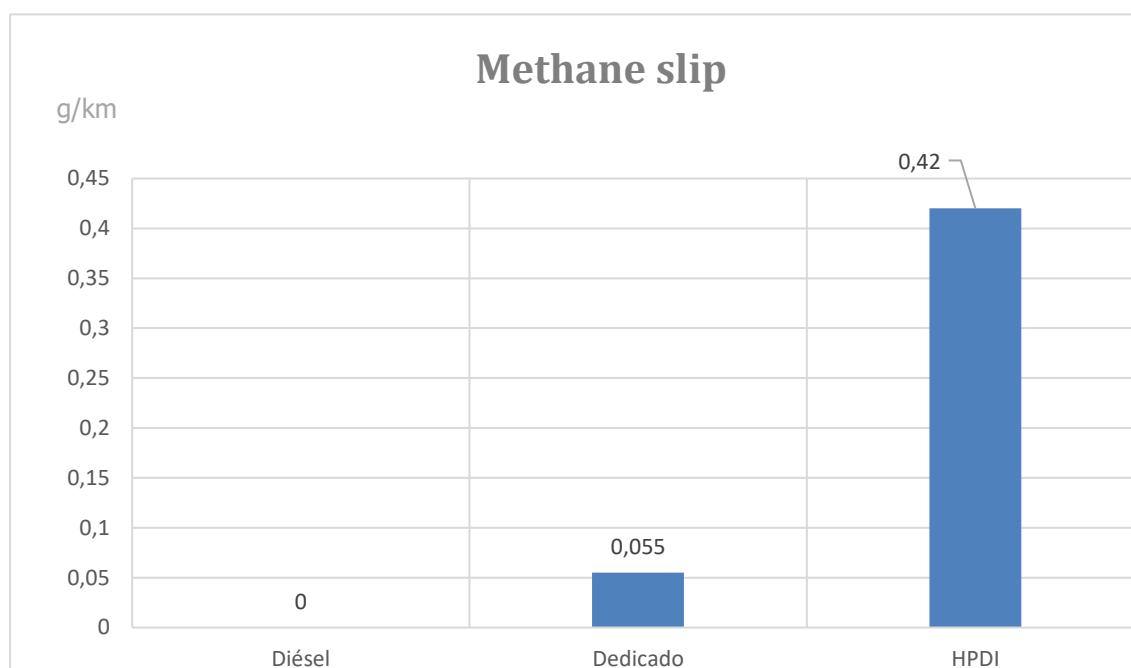


Figura 32. Comparación emisiones metano.

Con motivo del análisis WTW que se muestra en el siguiente capítulo, se realiza una gráfica comparativa del llamado CO₂ equivalente, esto es, las emisiones de cada tecnología en términos de CO₂ más las del metano (gracias a la equivalente de 21-1 anteriormente mencionada). Lo que se presente mostrar es, en definitiva, las emisiones de gases de efecto invernadero de los modelos analizados.

⁶ <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5724229/KS-31-09-272-EN.PDF/16497950-fa38-465d-a1fc-fe6b50ac092c?version=1.0>

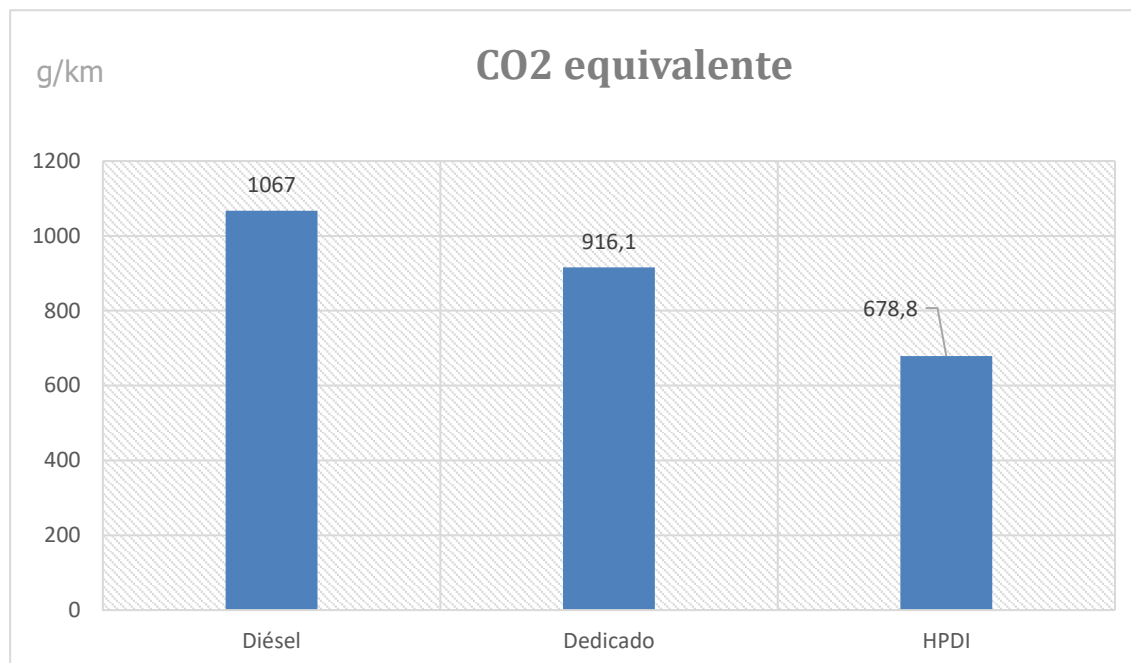


Figura 33. Comparación emisiones CO2-equivalente.

5.1 Metano no medido

En los ensayos realizados en carretera no se mide un aspecto que es intrínseco al hecho de circular con un vehículo a gas natural licuado, esto es, el calentamiento del propio combustible en el depósito con el paso del tiempo, y su posterior venteo a la atmósfera.

Este tipo de vehículos tienen un sistema diseñado para evitar la sobrepresión del gas en el tanque al calentarse este. Del propio depósito de gas licuado, depósito criogénico que mantiene el combustible a -160°C , salen diferentes conexiones tanto para el llenado, para la alimentación al motor y para el venteo, como se puede observar en la siguiente figura:

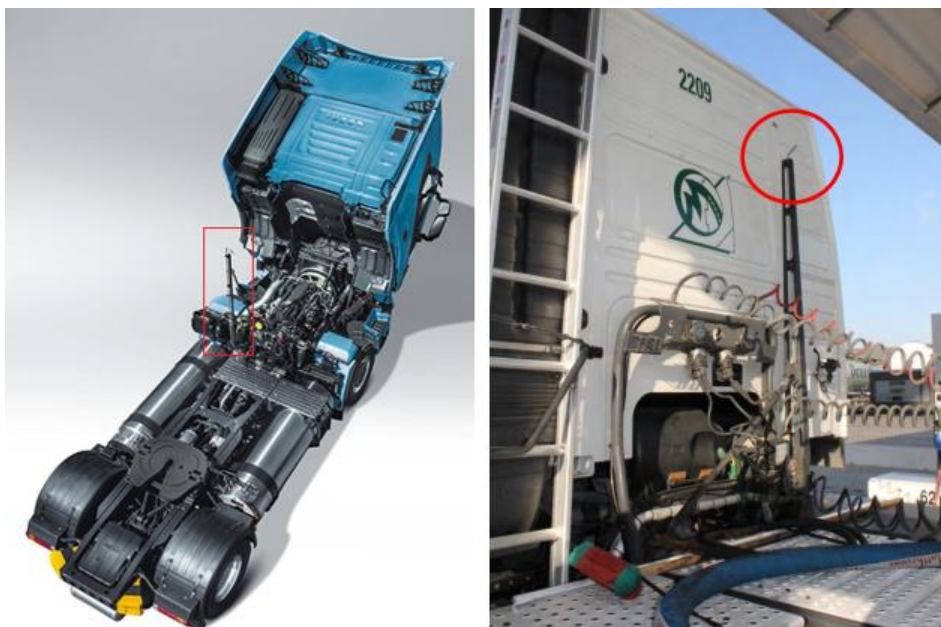


Figura 34. Vehículo GNL. Sistema de venteo.

El tanque de GNL está diseñado para mantener la presión por debajo de la válvula primaria (16 bar) durante al menos 5 días, siempre y cuando se garantice una actividad en el vehículo. Al circular con el camión, la presión de trabajo del tanque es de 8,5 bar (si se circula, hay consumo, por lo tanto no hay tiempo para que el combustible aumente su presión). Cuando la presión interna del combustible excede la presión de la válvula de alivio primaria, los 16 bar mencionados anteriormente, en sistema comienza a ventear tanta cantidad como sea necesaria a través de la tubería situada en la parte posterior de la cabina. El objetivo es claramente reducir la presión interior hasta alcanzar la presión adecuada. Este fenómeno hace que estos vehículos tengan prohibido su estacionamiento en espacios confinados, así como su acceso restringido en determinados pasos, como por ejemplo en el Eurotúnel⁷.

El tiempo necesario para que el tanque alcance los 16 bar y comience a ventear se denomina PRT (del inglés, Pressure Reaction Time), el cual depende de la presión inicial y del porcentaje de llenado del tanque. Para su cálculo aproximado, se utiliza la gráfica siguiente:

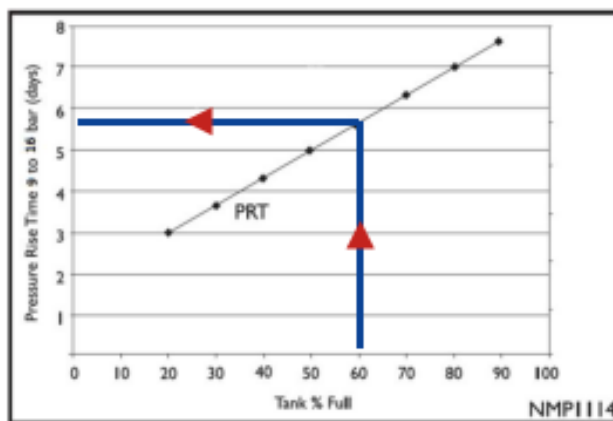


Figura 35. Condiciones de venteo. Fuente IVECO.

Para períodos de más de 7 días de inactividad, independientemente del nivel de llenado del tanque, es recomendable gastar todo el combustible para evitar que ventee, aunque este es el aspecto no controlado de este tipo de vehículos (ya que no puede ser dejado sin combustible totalmente, de lo contrario no se podría circular a la vuelta) e inevitablemente alguna cantidad de metano será venteadado a la atmósfera. En lo que concierne al presente documento, de cara al análisis Well-to-wheel de la siguiente sección, esta cantidad de metano no es tenida en consideración, ya que no entra dentro de los ensayos PEMS realizados.

6 ANÁLISIS WELL-TO-WHEEL

Actualmente, y sobre todo cuando se trata de cifras contaminantes a nivel global, es interesante hacer referencia a las emisiones de efecto invernadero producidas durante el uso del vehículo, pero también es recomendable y frecuente tener en cuenta las emisiones producidas durante la producción del propio combustible para poder hacer una evaluación certera de todos los puntos contaminantes.

⁷ <https://www.eurotunnelfreight.com/uk/safety-and-security/vehicle-restrictions/>

La Comisión Europea se refiere a este tipo de análisis como Well-to-Tank (WtT) para el proceso de producción del combustible y Tank-to-Wheel (TtW), para emisiones a nivel vehicular. En su conjunto, se denominan como análisis Well-to-Wheel (WtW). Merece la pena mencionar de forma breve que estos análisis son llevados a cabo por un consorcio denominado JEC, compuesto por el centro de Investigación de la Comisión Europea (*Joint Research Centre*, JEC), por el Consejo Europeo de I+D en el sector de la automoción (EUCAR) y por la Organización Europea de compañías petroleras para la protección del medio ambiente y la salud (CONCAWE), de donde se obtienen los valores de WtT para diésel.

En el caso de un vehículo con motor de combustión interna, el concepto WtW considera las emisiones producidas desde la extracción del combustible primario hasta su uso vehicular. El diagrama de la siguiente figura tiene una variación en el caso de los vehículos eléctricos. Éstos disponen de otro diagrama WTW ya que la generación de electricidad a partir de cualquier fuente de energía debe ser incluida.



Figura 36. Esquema del concepto "Well to Wheels" (WTW) en relación con los vehículos de MCI

6.1 Propiedades del combustible

Se muestran en la siguiente tabla las propiedades utilizadas para los cálculos del presente documento. El factor de emisión WTT está expresado en CO₂-eq, ya que además de CO₂, se incluyen también NO₂ y CH₄.

Tabla 3 – Propiedades combustibles fósiles utilizadas en el informe

Parámetros	LNG⁸	Diesel⁹
Densidad	431 ¹⁰ kg/m ³	845 kg/ m ³
Poder calorífico inferior	49,2 MJ/kg	43,1 MJ/kg

6.2 Vehículo dedicado

Las emisiones de CO₂ de esta tipología de vehículo se mostraron en el capítulo anterior. Esto corresponde a un valor medio de consumo de combustible de:

- Camión GNL: 27,5 kg/100km
- Camión diésel: 30,9 l/100km

En términos de energía de ambos vehículos para hacer una ruta similar, se obtiene la siguiente correspondencia:

Tabla 4 – Consumo y energía por vehículo (I)

	Consumo medio	Energía TTW
Euro VI dedicado 400cv	27,5 kg/100km	13,5 MJ/km
Euro VI diesel 420 cv	30,9 l/100km	11,1 MJ/km
Diferencia (GNL vs diesel)		+22%

⁸ <http://www.fluxys.com/belgium/en/Services/ServicesForConnectedCompanies/OperationalData/OperationalData>

⁹ Propiedades diesel: Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. JRC Tank-to-Wheels Report Version 4a, July 2013. http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/report_2013/ttw_report_v4_july_2013_final.pdf

¹⁰ http://gasnam.es/wp-content/uploads/2016/02/Tabla_equivalencias_GASNAM_SEDIGAS.pdf

6.3 Vehículo HPDI

Tabla 5 – Consumo y energía por vehículo (II)

	Consumo diésel	Consumo gas natural	Energía TTW
Euro VI HPDI 460cv	2,09 l	19,6 kg	10,5 MJ/km
Euro VI diesel 420 cv	30,9 l/100km	-	11,1 MJ/km
Diferencia (GNL vs diesel)			-5%

6.4 Resultados Well-to-wheel

En este capítulo se comparan los camiones de GNL y diésel. Esto incluye la eficiencia energética y las emisiones de CO₂-eq. También se evalúa el origen del GNL.

Como se ha calculado en la tabla 6, la energía usada para un camión dedicado gas natural es mayor (en torno al 22%) que su homólogo en la versión diésel. Por el contrario, en base a los consumos presentados por los camiones diésel y HPDI, la energía utilizada para el motor de este último es 5% menos que para un motor diésel de similar capacidad.

Con respecto a las emisiones de CO₂-eq, el camión GNL dedicado del ensayo proporcionó una reducción inmediata del 14% a nivel del tubo de escape (ver figura 32). Este beneficio se reduce ligeramente cuando se consideran las emisiones totales de CO₂-eq de pozo a la rueda. En los siguientes párrafos se aborda el análisis de WtW con respecto al CO₂-eq / km en función del origen del GNL.

Los valores de WtT para diésel son cogidos del estudio de JEC (versión 4a¹¹).

6.4.1 Origen del gas natural

La producción de GNL es intensiva en cuanto a energía, la licuefacción del gas se basa en un proceso criogénico. Según el estudio de JEC (versión 4a) sobre la eficiencia de WtW y las emisiones de CO₂-eq, el GNL es en una forma eficiente de transportar energía cuando las distancias de la tubería son superiores a 5000 - 6000 km. Según el mismo estudio, la huella de gases de efecto invernadero de GNL de la llamada " UE mix", basada en una longitud promedio de tuberías de 2500 km, es de 13,0 g de CO₂ eq / MJ, mientras que el promedio de GNL se establece en 19,4 g CO₂ eq / MJ. Esta cifra promedio para GNL se ha actualizado recientemente en la versión más reciente de este informe a 16,6 g de CO₂ eq / MJ.

¹¹ https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85329/wtw_report_v4a%20march%202014_final.pdf

Según un estudio realizado por "Thinkstep"¹², el GNL muestra un rendimiento muy diferente en términos de la huella de Gases de Efecto Invernadero del pozo a tanque, dependiendo de los diferentes orígenes geográficos: a día de hoy las principales fuentes de GNL en Europa están representadas por Qatar, Noruega, Nigeria y Argelia. La figura siguiente muestra la composición resultante de la mezcla global de GNL de la Unión Europea.

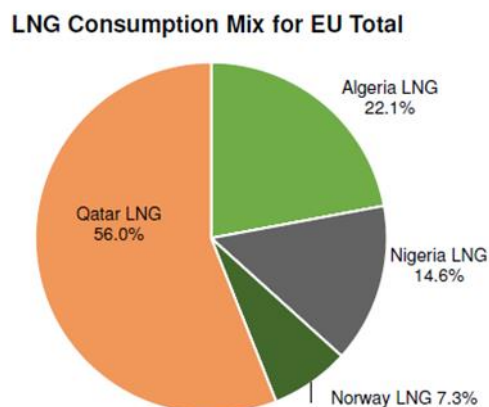


Figura 37. Origen GNL en el "EU mix".

El estudio ha recopilado datos recientes disponibles para determinar las diferentes huellas de GEI, proporcionando los valores promedio de acuerdo con 4 macro regiones definidas de la siguiente manera:

- Norte de la UE: Irlanda, Dinamarca, Finlandia, Suecia, Reino Unido.
- Centro de la UE: Austria, Bélgica, República Checa, Estonia, Alemania, Hungría, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Holanda, Polonia, Eslovaquia.
- Sudeste de la UE: Bulgaria, Croacia, Chipre, Grecia, Italia, Malta, Rumania, Eslovenia.
- Sudoeste de la UE: Francia, Portugal, España.

La figura siguiente muestra las diferentes composiciones de GNL en las cuatro macro regiones de la UE. Las huellas de GEI resultantes de las 4 regiones se muestran a continuación.

¹² <https://www.thinkstep.com/content/report-greenhouse-gas-intensity-study-natural-gas>

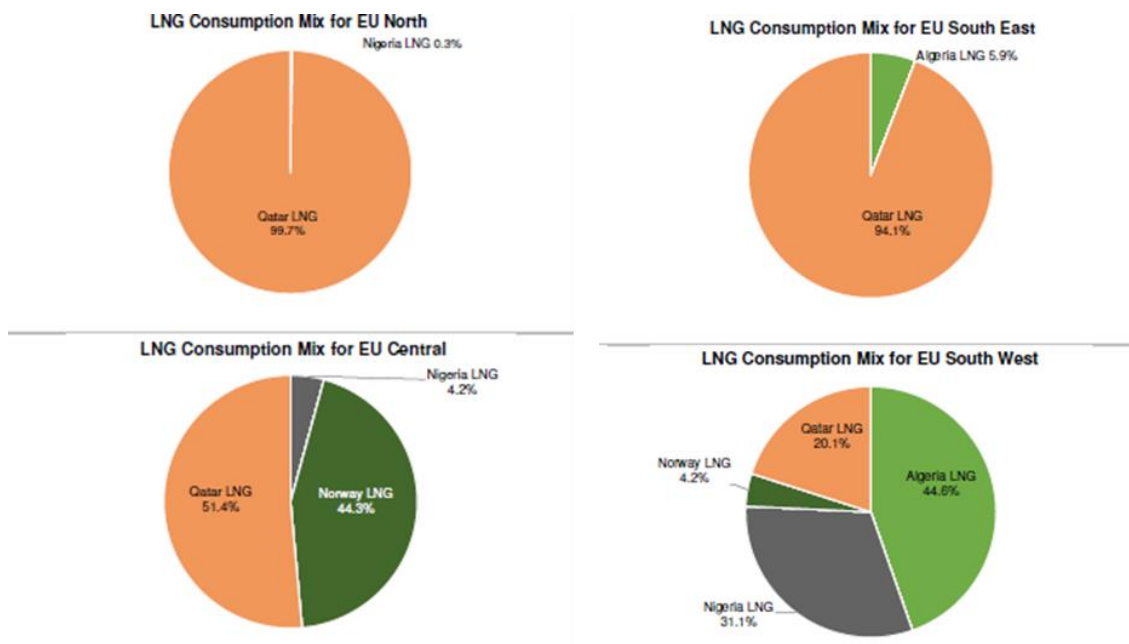


Figura 38. Diferentes composiciones de GNL en función de las regiones.

Las gráficas muestran tanto el origen de las actividades que produce los GEI para la producción de GNL, así como la composición de gases.

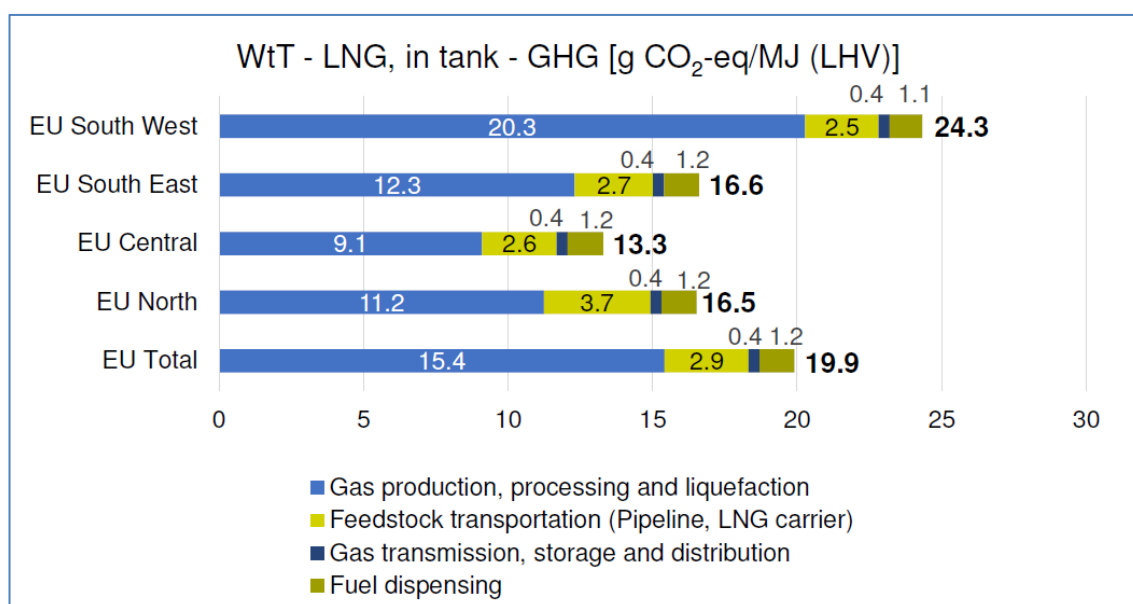


Figura 39. Huellas de GEI de las diferentes composiciones de GNL en los cuatro macrorregiones de la UE

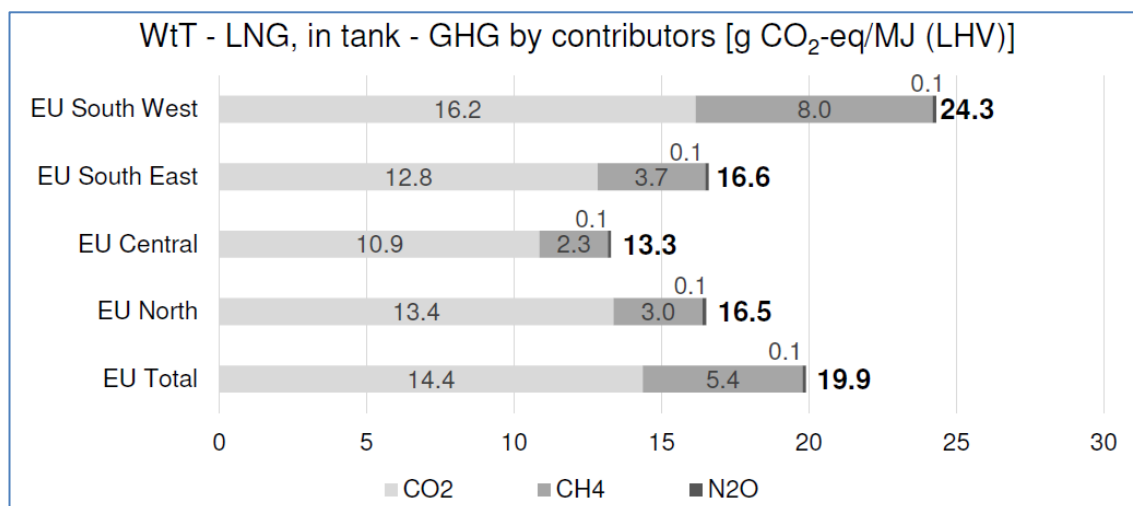


Figura 40. Desglose de la composición de CO₂eq en el análisis WtT.

Se observa una diferencia bastante amplia debido principalmente a la falta de datos disponibles para Argelia: se señala cómo estos datos son antiguos y están relacionados con tecnologías antiguas que también proporcionan malas cifras con respecto a las emisiones y fugas de metano no quemadas de las plantas.

Debido a la incertidumbre de los datos para el GNL proveniente de Argelia, el estudio propone un escenario en el que en 2020 Argelia adoptaría tecnologías de vanguardia como otros países: esto reduciría la huella global de GEI de la UE de 19,9 a 16,8 g de CO₂ eq / MJ.

Como se mencionó anteriormente, el presente documento muestra que el camión GNL Iveco dedicado tuvo emisiones de CO₂ eq TtW de 916,4 g CO₂ eq / km. El camión Volvo HPDI con emisiones TtW CO₂-eq de 680,5 g CO₂ eq / km. Se vio que los camiones diésel comparables tienen 1067 g de CO₂-eq / km. La emisión de WtW CO₂-eq resultante de la tecnología dedicada (en los diferentes escenarios) y el camión diésel se muestran en la figura siguiente. La situación actual, se muestra una menor emisión de CO₂-eq de WtW para los camiones de GNL (encendido por chispa, dedicados) en comparación con los camiones diésel (-24%) en gases provenientes del norte de la UE, el sudeste de la UE y el escenario en el que Argelia aplicase tecnología de vanguardia. El central de la UE conduce a un 27% más bajo, y el sudoeste de la UE a un 14% más de emisiones de CO₂-WtW de CO₂ para camiones de GNL.

El camión de GNL (HPDI) muestra una menor emisión de CO₂ eq de WtW en comparación con los camiones diésel. El norte de la UE, el sudeste de la UE y el escenario en el que Argelia aplica tecnología de punta, conducen a la misma reducción en las emisiones de CO₂ eq WtW para GNL en comparación con los camiones diésel (-30%). La central de la UE conduce a un 33% más bajo, y el sudoeste de la UE a un 19% menos de emisiones de CO₂ eq WtW para camiones de GNL.

En ambos casos, el origen central de gas de la UE es el más beneficioso al evaluar el CO₂ total por km. El menos beneficioso es claramente el origen de gas del suroeste de la UE.

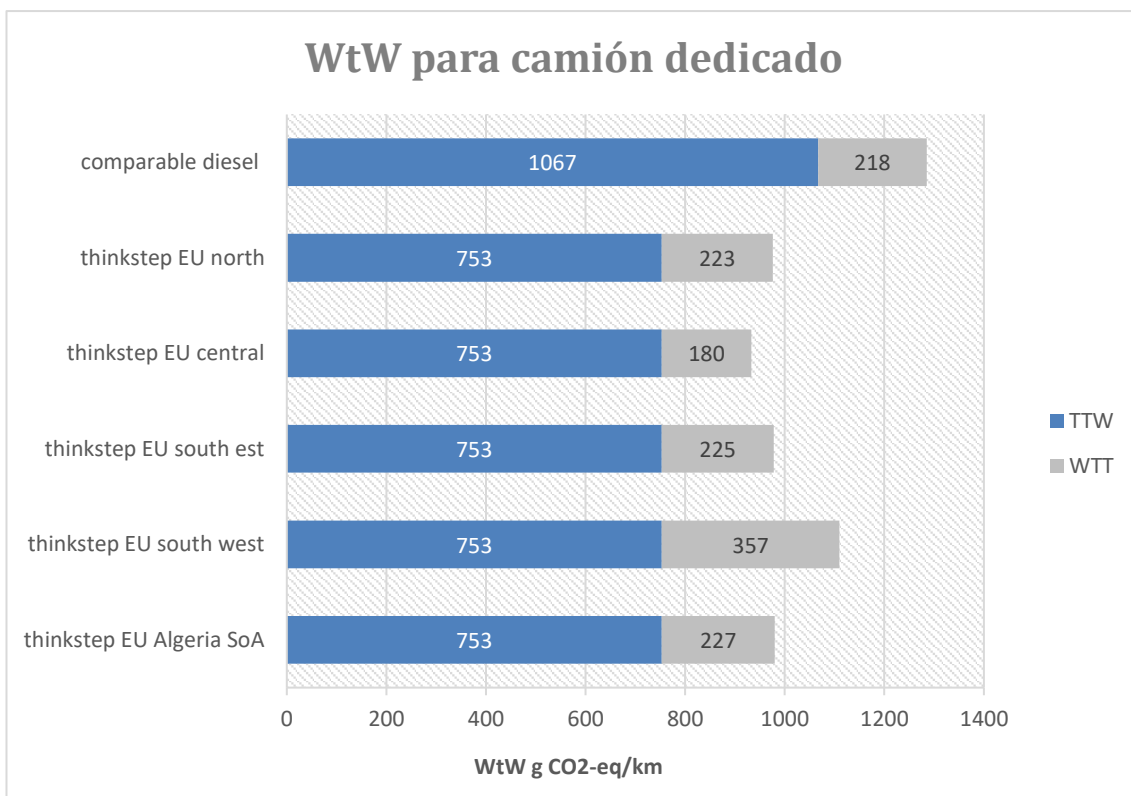


Figura 41. Análisis WtW para vehículo IVECO.

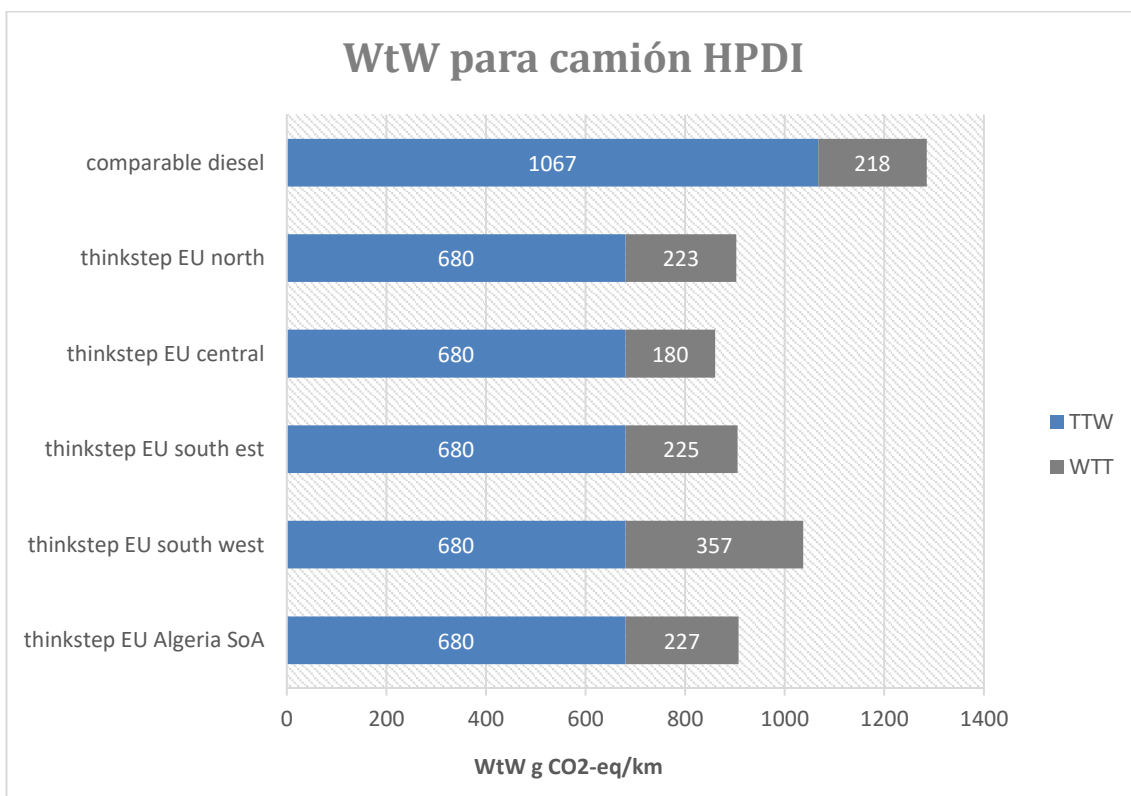


Figura 42. Análisis WtW para vehículo VOLVO HPDI.

6.4.2 Beneficios del biometano

Pasar de combustible diésel a gas natural tiene beneficios a nivel medio ambiental cuando es utilizado en camiones. Como se ha visto, las emisiones contaminantes se reducen significativamente, en función de la tecnología utilizada. Esta reducción a nivel vehicular no varía si el combustible utilizado es gas natural o biometano, ya que ambos son gas metano con diferentes orígenes: uno fósil y otro de origen renovable. Sin embargo, existen beneficios al incluir un porcentaje de gas renovable desde el punto de vista medioambiental, como se muestra a continuación.

Existen varios informes en los que se estudia la viabilidad del biometano como combustible, así como su eficiencia en motor, en función del tipo de vehículo y del ratio de biometano incluido. Una de las primeras empresas en la producción de biometano en Europa fue Gasrec Ltd¹³, encargados de la producción, distribución y suministro de biometano en Reino Unido. Gracias a sus estaciones de repostaje con este combustible, Gasrec está en posición de medir directamente el efecto del biometano procedente de su propia producción en aplicaciones vehiculares. En la actualidad cuentan con 10 estaciones de suministro, sobre todo localizados en centros logísticos y de gran tránsito de mercancías.



Figura 43. Estación Gasrec biometano.

En uno de sus estudios realizados¹⁴, se muestra la reducción de CO₂ (en Whell-to-Tank y Tank-to-Wheel) de camiones propulsados solamente con biometano con respecto a camiones diésel en función de la mezcla de biometano utilizado.

¹³ <https://www.gasrec.co.uk/>

¹⁴

http://Ingbc.eu/system/files/deliverable_attachments/LNG%20BC%20D3.9%20Potential%20of%20LBM%20in%20Europe%20UPDATE.pdf

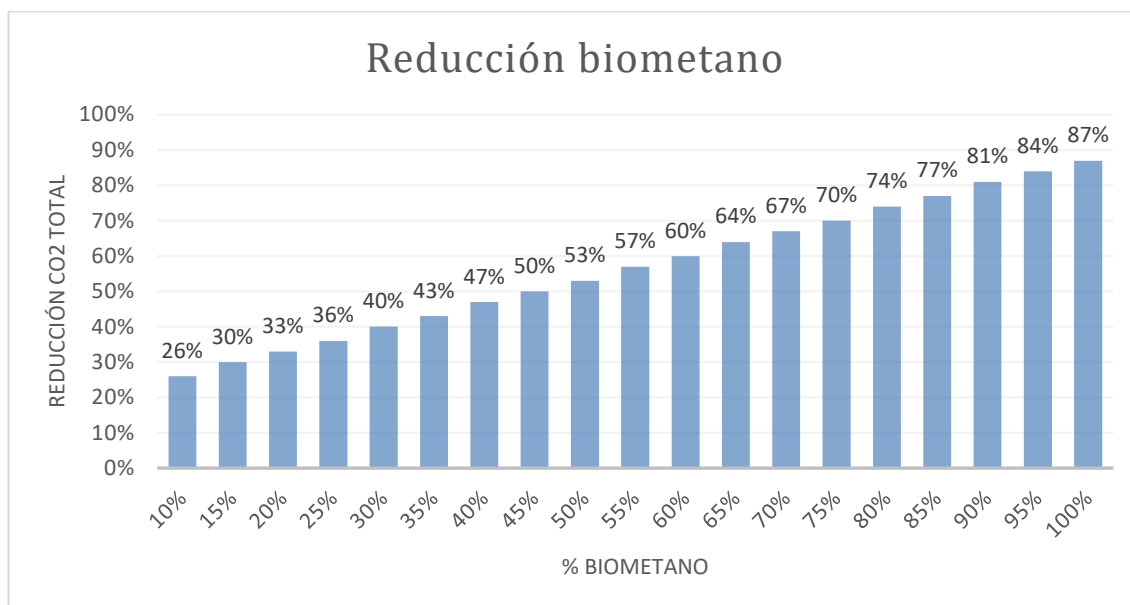


Figura 44. Reducción CO₂ en WtW utilizando biometano. Fuente LNG Blue Corridors.

En base a la gráfica anterior, se puede observar que, a medida que aumenta el porcentaje de mezcla del biometano en combustible – complementado con gas natural hasta el 100% - disminuyen las emisiones de CO₂ totales con respecto al diésel. A nivel vehicular esto ya era conocido, pero no aguas arriba en la cadena de valor, esto es, en la producción y distribución del propio combustible. En base a ello, para vehículos pesados que utilicen motores dedicados 100% gas, como los analizados en los ensayos del presente documento, en caso de utilizarse un combustible totalmente renovable como biometano, las emisiones de CO₂ durante todo el proceso podrían disminuir hasta casi un 90%.

De igual modo, para el mismo modelo de vehículo, si se utiliza un porcentaje del 20% de biometano, la reducción sería de aproximadamente el 40%.

De igual manera, si se pretende comparar el posible impacto de la reducción de gases de efecto invernadero, no sólo en vehículos de larga distancia, sino también en vehículo de pasajeros, las posibilidades de reducción de CO₂ con respecto a otros combustibles resultan ser del mismo orden de magnitud, como se puede ver en el siguiente gráfico.

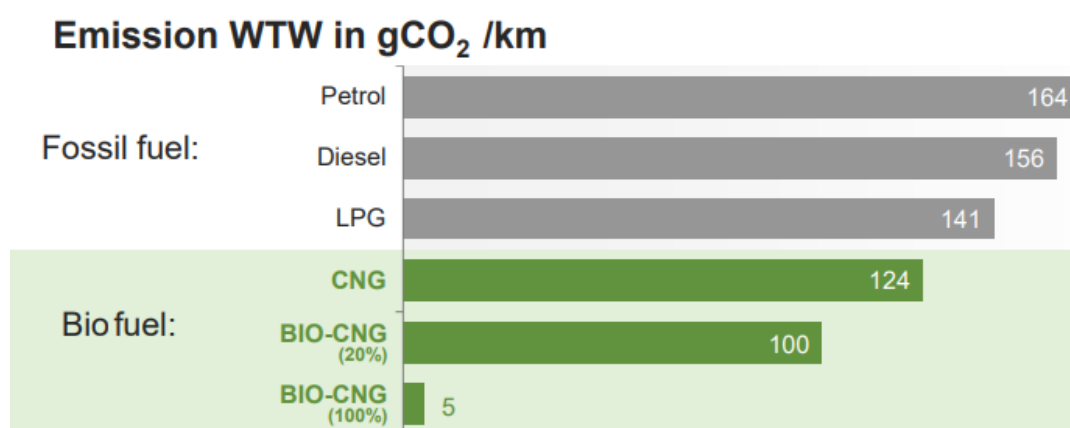


Figura 45. Emisiones CO₂ en WtW. Fuente NGVA.

6.4.3 Precio combustible por kilómetro

En base a las tres tecnologías probadas, resulta interesante analizar cuál es la más ventajosa desde el punto de vista del precio del combustible por kilómetro recorrido. Normalmente, este es un parámetro que se tiene en consideración por parte de operadores de flota a la hora de comparar en detalle la rentabilidad de un vehículo comercial. En base a los consumos mostrados anteriormente y al precio del combustible en el momento de la realización de los ensayos (año 2019), se realiza la siguiente gráfica comparativa:

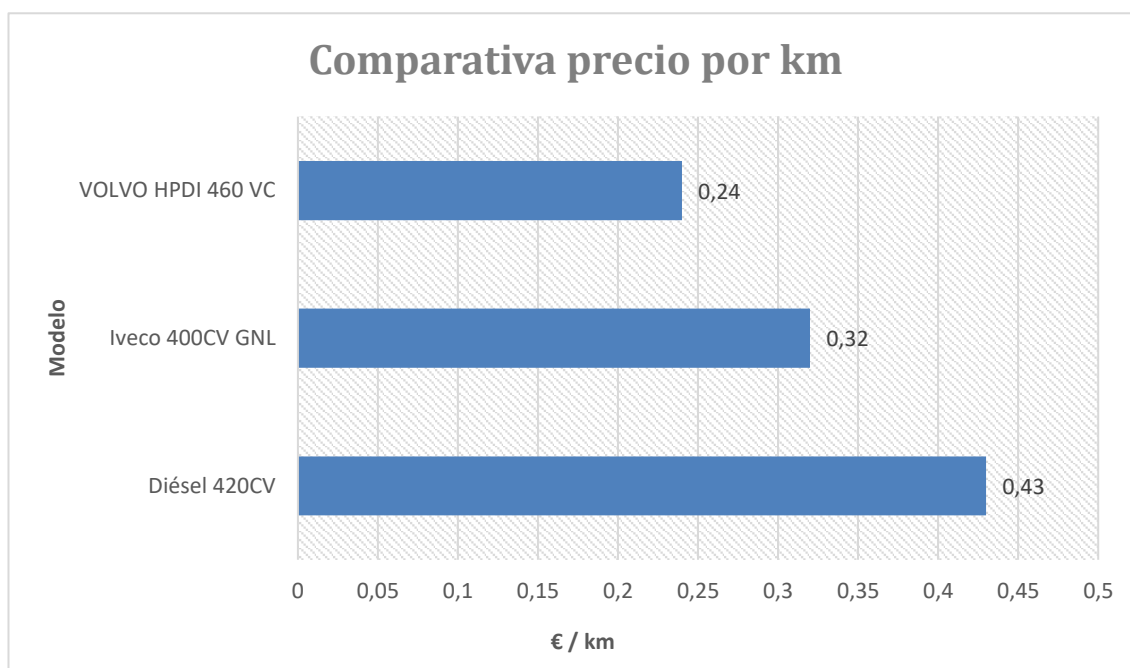


Figura 46. Comparación del precio por kilómetro recorrido.

Precio LNG: 0,895 €/kg¹⁵

Precio diésel: 1,21 €/l¹⁶

En base a los resultados mostrados en la figura anterior, se muestra una reducción considerable de las tecnologías que utilizan gas natural con respecto a las de diésel. Por un lado, a pesar de que el vehículo Volvo tiene una mayor potencia que el camión diésel, el precio de combustible (diésel y gas) utilizado por kilómetro es significativamente más bajo (-44%). Por su parte, el vehículo Iveco GNL, con una capacidad de motor muy similar a la del diésel ensayado, muestra unos valores de Euro por kilómetro inferiores al diésel (-25%).

En términos generales, se puede afirmar que los consumos obtenidos en los ensayos realizados en campo son algo superiores a la media que suele registrar un transportista. Ello es debido, a que el recorrido realizado en los ensayos siempre se hizo con la carga máxima permitida, cosa que no ocurre en la realidad (no todos los trayectos van totalmente cargados, ya que tienen que distribuir la mercancía).

¹⁵ <https://www.glpautogas.info/precio-gas-natural-comprimido.html>

¹⁶ <https://www.cetm.es/evolucion-precios-gasoleo/>

7 CONCLUSIONES

A continuación, se enumeran las principales ideas extraídas en base a los ensayos realizados y a los temas tratados en el presente documento:

- La tecnología a nivel motor y vehicular que utiliza el gas natural como combustible, bien sea de forma única o complementaria al diésel, es una tecnología madura y desarrollada. En la actualidad los modelos lanzados al mercado presentan las mismas prestaciones que sus homólogos en versión diésel.
- Las emisiones de CO₂ en vehículo (Tank-to-wheel) medidas en campo a través de ensayos PEMS son significativamente más bajas cuando se utiliza gas natural como combustible, tanto en la tecnología HPDI como en motores dedicados. En lo que se refiere a CO₂ equivalente, la ventaja con esta alternativa es clara. Sin embargo, la reducción de NO_x depende claramente de las condiciones en las que se mida, principalmente de los transitorios que el camión experimente: 0,24 g/km en el vehículo diésel, frente a 0,17 g/km en el vehículo dedicado y 0,35 g/km con la tecnología HPDI.
- La reducción de emisiones contaminantes que se consigue con la utilización de la tecnología HPDI está totalmente en línea a los objetivos marcados por parte de la Comisión Europea.
- A nivel de vehículo, en lo referente a motor y sistema de postratamiento, la reducción de emisiones es difícilmente mejorable respetando las dimensiones del propio vehículo y ofreciendo soluciones económicamente asumibles para el cliente final. Sin embargo, sí se puede reducir la producción de CO₂ aguas arriba, en la producción y distribución de GNL, con valores que varían desde 180 g CO₂ eq por kilómetro hasta 357 g CO₂ eq por kilómetro.
- Según los datos mostrados en el documento, el metano no quemado (methane slip) en motores dedicados es prácticamente cero, siendo bajo en motores HPDI. Con la tecnología actual existente desarrollada por los fabricantes, este aspecto está totalmente controlado gracias a la combustión realizada y a los sistemas de tratamiento de gases instalados ad-hoc en cada tipo de vehículo. El impacto de este componente como gas de efecto invernadero es del orden de 20 veces más perjudicial que el CO₂.
- A pesar de la madurez de la tecnología a gas natural, sigue habiendo gaps en el mercado que dificultan su desarrollo a gran escala: la infraestructura de gas es aún insuficiente y desequilibrada en los países europeos. Puesto que estos vehículos están pensados para recorridos de larga distancia, resulta incoherente que haya mercados con una gran cantidad de puntos de repostaje, mientras que en los mercados de destino no hay infraestructura. Es por ello, como otro gap que afronta el mercado, que no todos los fabricantes de vehículos ofrecen modelos a gas natural licuado. La escasez en estaciones junto con los elevados precios de los vehículos, hacen que tanto fabricantes como flotas no inviertan de forma similar a como lo hacen en diésel.
- Las ventajas en vehículo parecen claras al hacer la comparativa diésel versus gas natural, sin embargo existe cierta incertidumbre y variabilidad a la hora de medir los gases de efecto invernadero emitidos durante la producción y distribución de metano. En este documento se presentan valores extraídos de algunos estudios, aunque sin embargo hay muchos otros no tan favorables al gas natural en emisiones Wheel-to-tank. Por lo tanto, no resulta sencillo calcular de forma precisa las emisiones producidas durante este tramo de la cadena. Se estima que los valores de emisiones en extracción

de diésel son aproximadamente 218 g CO₂ eq /km, por 202 g CO₂ eq/km de media para el gas natural en los escenarios mostrados.

- Aunque en el presente no tiene gran incidencia en cuanto a la movilidad se refiere, todo parece indicar que el biometano se encamina a ser uno de los combustibles más sostenibles en el futuro a largo plazo. Este gas renovable no sólo es en una energía segura y limpia, sino también en una fuente de recursos inagotable gracias a la reutilización de los propios residuos, las aguas de alcantarillado de pueblos y ciudades o los desechos agrícolas, ganaderos e industriales. Se podría tener una reducción de emisiones totales de hasta el 90% con respecto al diésel si se utiliza como combustible biometano al 100% utilizando la tecnología vehicular ya existente.