



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y
Protección del Medio Ambiente
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede
Bogotá D.C.
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:
gruicte_bog@unal.edu.co

**ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES
PARA INCENTIVAR EL USO DEL GAS
COMBUSTIBLE EN EL SECTOR TRANSPORTE
(Informe Final-Tomo I)**

Informe preparado para:

**Unidad de Planeación Minero Energética –
UPME**

Contrato # C-005-2014

Informe preparado por:

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA –
FACULTAD DE INGENIERIA**

Noviembre de 2014



CONTENIDO

1.	MARCO REFERENCIAL Y TEÓRICO.....	19
1.1	MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	19
1.1.1	Parámetros de los motores de combustión interna	19
1.2	MOTOR DEDICADO	20
-	Motor dedicado a Gas Natural (GN).....	20
-	Motor dedicado a Gas Licuado de Petróleo (GLP)	20
-	Motor dedicado a diésel	20
-	Motor dedicado a gasolina.....	20
1.3	MOTOR DUAL.....	20
1.3.1	Motor dual diésel- Gas Natural (GN).....	21
1.3.2	Motor dual diésel- Gas Licuado de Petróleo (GLP)	21
1.4	MOTOR BICOMBUSTIBLE.....	21
-	Motor Bi-Combustible Gasolina-Gas Natural	21
-	Motor Bi-Combustible Gasolina-Gas Licuado de Petróleo.....	21
1.5	NORMAS DE EMISIONES	21
1.5.1	Norma Europea-EURO	21
1.5.2	Norma de Estados Unidos - EPA	24
1.5.3	Normas Colombianas.....	25
1.6	TECNOLOGÍAS EN GAS	27
1.6.1	Gas Natural Seco (GNS).....	27
1.6.2	Gas Natural Comprimido (GNC).....	29
1.6.3	Gas Natural Licuado (GNL)	29
1.6.4	Gas Licuado de Petróleo (GLP).....	33
1.6.5	Combustibles líquidos realizados a partir de Gas Natural (GAL)	35
2.	INVENTARIO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES EN EL MERCADO PARA EL USO DE GAS COMBUSTIBLE AUTOMOTOR	36
2.1	VEHÍCULOS DEDICADOS	36



2.2	VEHÍCULOS DUALES	38
2.2.1	Conversión de diésel a dual diésel –Gas Natural (GNC o GNL) con un mezclador a la entrada del turbo – También llamado sistema de lazo abierto	39
2.2.2	Conversión de diésel a dual Diésel –Gas Natural (GNC o GNL)/GLP con un riel de inyectores en el múltiple de admisión – También llamado de lazo cerrado	40
2.3	VEHÍCULOS TRANSFORMADOS	40
2.3.1	Transformación de un motor diésel a gas conservando el turbo	41
2.3.2	Transformación de un motor diésel a Gas Natural GNC/GNL suprimiendo el turbo	47
2.4	VEHÍCULOS BICOMBUSTIBLES.....	50
3.	COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE COMBUSTIBLES	55
3.1	DENSIDAD.....	57
3.2	GRAVEDAD ESPECÍFICA	57
3.3	INFLAMABILIDAD.....	58
3.4	OCTANAJE Y NÚMERO DE CETANO	58
3.5	PUNTO DE EBULLICIÓN	58
3.6	PUNTO DE INFLAMACIÓN.....	59
3.7	RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE.....	59
3.8	TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO	59
3.9	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA.....	60
3.10	VISCOSIDAD	60
4.	COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE TECNOLOGÍAS	61
4.1	COMPARACIÓN DE CONSUMOS DE COMBUSTIBLE	62
4.1.1	Comparación de consumo de combustible entre bus dedicado a gas natural EURO VI, y buses diésel Euro V y diésel Euro IV en Colombia.....	62
4.1.2	Comparación de consumo entre vehículo dedicado diésel y vehículo dedicado GNC OEM	63
4.1.3	Comparación de consumo en un motor operado en diésel y en dual diésel –gas natural	64
4.1.4	Comparación de consumo en un motor de 6 L encendido por compresión operado a diésel y a dual diésel-GLP.....	67



4.2	COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GASES.....	69
4.2.1	Comparación de emisiones entre bus dedicado a gas natural EURO VI, y buses diésel Euro V y diésel Euro IV en Colombia.....	69
4.2.2	Comparación de emisiones entre vehículo dedicado diésel y vehículo convertido a dual diésel-GLP.....	70
4.2.3	Comparación de emisiones en un motor con alimentación diésel y dual diésel – gas natural.....	72
4.2.4	Comparación de emisiones de gases y de material particulado en motor de 6L operado en diésel y en dual diésel-GLP.....	72
4.2.5	Comparación de emisiones de gases y material particulado en autobuses alimentados con Gas natural y con diésel bajo cuatro cargas en estado estable.	73
4.3	COMPARACIÓN DE RENDIMIENTO.....	75
4.3.1	Rendimiento en un motor dedicado diésel y motor convertido a dual diésel-GLP	75
4.3.2	Rendimiento en un motor de carga pesada alimentado con diésel y dual diésel – gas natural.....	75
4.3.3	Presión máxima y cambio de presión en los cilindros de un motor operado en diésel y dual diésel-GLP	77
4.3.4	Efectos de los parámetros del motor en el rendimiento de motores duales diésel-Gas Natural y diésel-GLP.....	78
5.	NORMATIVIDAD.....	80
5.1	NORMATIVIDAD INTERNACIONAL.....	80
5.1.1	Normatividad internacional referente a aplicaciones de Gas Natural Comprimido y Gas Natural Licuado en vehículos	80
5.1.2	Normatividad Internacional referente a aplicaciones de GLP vehiculares.	82
5.2	NORMATIVIDAD COLOMBIANA	83
5.2.1	Comparación normativa de componentes de sistemas de conversión e infraestructura del GLP en uso vehicular.....	84
5.2.2	Comparación normativa de componentes de sistemas de conversión e infraestructura del GNC vehicular.....	89
5.2.3	Normatividad arancelaria para vehículos dedicados a GNC, GNL, GLP o para kits de conversión.	94



5.3	DIFERENCIAS DE FORMA Y DE CONTENIDO ENTRE NORMATIVIDAD EXISTENTE PARA GAS NATURAL (GNC – GNL) Y GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) EN COLOMBIA	97
5.4	DIFERENCIAS EN REGULACIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE GAS NATURAL EN COLOMBIA Y A NIVEL INTERNACIONAL.....	102
5.4.1	Comparación entre normatividad internacional y nacional para composición del gas natural.....	102
5.4.2	Calidad del gas natural comercializado en Colombia.....	104
5.5	DIFERENCIAS EN REGULACIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO	106
5.5.1	Comparación entre normatividad nacional e internacional para la composición de GLP	106
5.5.2	Calidad del GLP comercializado en Colombia.....	108
5.6	ANÁLISIS DEL ALCANCE DE LA NORMATIVIDAD NACIONAL APLICADA A VEHÍCULOS A GAS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS TECNOLOGÍAS EVALUADAS	109
5.7	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA NORMATIVIDAD NACIONAL RELATIVA A LA CALIDAD DEL GAS NATURAL VEHICULAR Y EL GAS LICUADO DE PETRÓLEO	111
6.	RECOMENDACIONES	112



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estándar de emisiones normatividad Europea para vehículos diésel de carga pesada [g / kWh]	22
Tabla 2. Estándar de emisiones normatividad europea para vehículos de carga pesada duales diésel-gas o dedicados a gas [g / kWh]	24
Tabla 3. Estándar de emisiones Americana para vehículos de carga dedicados a diésel. [g/bhp-hr]	25
Tabla 4. Opacidad permisible en vehículos diésel en Colombia.....	26
Tabla 5. Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos en Colombia (g/bhp-h).....	26
Tabla 6. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos pesados con motores ciclo Otto a gas natural o a GLP evaluados mediante ciclos de normatividad europea en Colombia (g/bhp-h)	27
Tabla 7. Propiedades del Gas Natural	28
Tabla 8. Composición típica de un gas natural al momento de su extracción.....	29
Tabla 9. Principales componentes de un motor dedicado a diésel, a gasolina, a GNC, a GNL y a GLP.....	37
Tabla 10. Sistema de conversión bicomcombustible según el sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GNC	51
Tabla 11. Sistemas de conversión bicomcombustible según el sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GLP	52
Tabla 12. Propiedades físico-químicas de los combustibles	55
Tabla 13. Consumo de combustible para buses diésel en comparación a un bus dedicado a gas natural comprimido.....	62
Tabla 14. Consumo vehículo dedicado a gas y dedicado a diésel de características similares....	63
Tabla 15. Especificaciones motor Hyundai D6CA.....	64
Tabla 16. Propiedades de GNL y de diésel utilizado en las pruebas al motor Hyundai D6CA.....	65
Tabla 17. Especificaciones motor Cummins ISBe 220 31.....	67
Tabla 18. Propiedades de los combustibles utilizados en el estudio con el motor Cummins ISBe 220 31	67
Tabla 19. Consumo de combustible en sistema diésel y dual diésel-GLP en motor Cummins encendido por compresión para distintas condiciones de carga y de concentración de GLP	68
Tabla 20. Comparación factores de emisión entre bus dedicado a Gas Natural Comprimido GNC EURO 6 y Buses diésel EURO 5 y EURO 4 en Colombia	69
Tabla 21. Variación de las emisiones entre un motor 100% diésel y uno dual diésel-GLP ve en función de la carga y en función del porcentaje de diésel sustituido por Gas propano	71



Tabla 22. Vehículos utilizados en las pruebas	73
Tabla 23. Emisiones específicas de CO ₂ , NO _x , conteo de partículas y material particulado para buses dedicados a GNC y buses dedicados a diésel	74
Tabla 24. Máxima presión y máximo aumento de la presión en las cámaras de combustión en motor Cummins operado en diésel y en dual diésel-GLP	77
Tabla 25. Normatividad aplicable a tecnologías de gas natural vehicular.....	80
Tabla 26. Normatividad internacional en referencia a GLP	82
Tabla 27. Comparación normativa de exigencias en componentes de sistemas de GLP	87
Tabla 28. Comparación normativa sobre requerimientos de instalación para sistemas de GLP	88
Tabla 29. Especificaciones del Gas Natural al momento de entregarse a un proveedor.....	92
Tabla 30. Especificaciones del gas natural según NTC 4826	93
Tabla 31. Arancel de aduanas para vehículos automotores en Colombia.....	94
Tabla 32. Comparación entre normatividad técnica existente en Colombia para Gas Natural Vehicular (GNC y GNL) y Gas Licuado de Petróleo (GLP).....	98
Tabla 33. Tabla comparativa entre normatividad nacional e internacional sobre composición del Gas Natural	102
Tabla 34. Composición de gas natural según refinería.....	104
Tabla 35. Tabla comparativa entre normatividad nacional e internacional sobre composición en GLP.....	106
Tabla 36. Calidad del GLP en Colombia	108



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de obtención de Gas Natural, uso de tecnología GNL	30
Figura 2. Estación de descarga y suministro de GNL.....	32
Figura 3. Diagrama esquemático de componentes de un sistema de conversión a GLP	34
Figura 4. Componentes de un kit de conversión dual diésel-GNC o diésel-GNL con mezclador en la entrada del turbo.....	39
Figura 5. Kit de conversión dual diésel-Gas con riel de inyectores.....	40
Figura 6. Modificación de la culata	41
Figura 7. Cambio de los sellos de las válvulas	42
Figura 8. Modificación de los pistones	42
Figura 9. Instalación de rueda dentada	43
Figura 10. Instalación del cuerpo de aceleración	43
Figura 11. Instalación del sensor Lambda.....	44
Figura 12. Instalación del sistema de suministro de gas parte 1.....	44
Figura 13. Sistema de suministro de gas	45
Figura 14. Instalación eléctrica de la válvula de control de flujo, del sensor lambda, bujías, instalación de alta y bobinas, todo hacia la ECU	45
Figura 15. Instalación de válvulas de control del flujo de aire de entrada del turbo	46
Figura 16. Instalación de inyectores de gas	46
Figura 17. Instalación del sistema de suministro de gas	47
Figura 18. Componentes de un kit de conversión Dual Diésel-GNC con riel de inyectores en el múltiple de admisión	49
Figura 19. Sistema de almacenamiento de GLP	54
Figura 20. Consumo de combustible para motor Hyundai D6CA en operación diésel y dual diésel-GNL.	66
Figura 21. Eficiencia térmica y consumo específico de combustible para motor Hyundai D6CA en operación diésel y dual diésel-GNL.	66
Figura 22. Curvas de torque y potencia para el motor Hyundai D6CA operado en diésel y en dual diésel-GNL.....	76



RESUMEN EJECUTIVO

Este documento muestra una evaluación de tecnologías existentes en el uso de gas natural en el sector transporte a nivel mundial, haciendo una comparación técnico ambiental con tecnologías como vehículos accionados por combustible diésel, a gasolina, híbridos y eléctricos. Además se muestra el estado técnico y normativo de cada una de esas tecnologías en Colombia.

El estudio se centra en el análisis de tecnologías para vehículos de carga liviana (hasta 3.5 toneladas), de carga mediana (de 3.5 a 14 toneladas) y de carga pesada (más de 14 toneladas), además de los requerimientos técnicos y de infraestructura para llevar a cabo una posible implementación de las tecnologías.

En general, las tecnologías disponibles para el uso de gas natural vehicular en el sector carga se centra en tres:

1. Vehículos dedicados a gas natural
2. Vehículos transformados para operar con gas natural (aquellos que originalmente fueron diseñados para operar en el ciclo Diésel y que mediante transformaciones mecánicas y electrónicas, se convierten en ciclo Otto para uso con gas natural vehicular)
3. Vehículos convertidos para operación dual (diésel – Gas Natural)

La penetración de estas tecnologías está supeditada a factores económicos, ambientales, de infraestructura, y de disponibilidad de reservas gasíferas. Los retos para implementar en Colombia tecnologías basadas en gas natural o gas licuado del petróleo en el sector carga van desde un cambio comportamental del sector transporte, pasando por una reestructuración en la oferta vehicular o de motores con tecnologías dedicadas, hasta la ampliación en la infraestructura a lo largo del territorio nacional. Efectivamente, el refuerzo en el sistema de transporte y el mejoramiento de sus especificidades técnicas, sobre todo para el GLP, serán determinantes en la consecución de un proceso de conversión diésel-GNV/GLP exitoso.

De este informe, se puede concluir que existen en general tecnologías vehiculares maduras de motores dedicados a gas natural, tecnologías maduras de sistemas de conversión dual (bien sea diésel-gas natural vehicular o diésel-gas licuado del petróleo), tecnologías en desarrollo de transformación de motores de Ciclo diésel a ciclo Otto. Por otro lado, aunque la infraestructura de redes de gas natural es aceptable en el país, existen zonas de alta movilidad de carga que aún no son cubiertas por esta infraestructura, que las reservas de gas no han sido ampliamente validadas, y que los fabricantes de motores y de sistemas de conversión aún perciben pobre los incentivos para traer tecnologías a gas al país. Además, tendrán que



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y
Protección del Medio Ambiente
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede
Bogotá D.C.
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:
gruicte_bog@unal.edu.co

revaluarse las estructuras tarifarias que soportan las respectivas cadenas de valor. Si no se hace una juiciosa indexación de los precios del gas a los del petróleo, los criterios de rentabilidad se verán desvirtuados, opacando la viabilidad técnica y ambiental de las nuevas tecnologías, menguando, muy probablemente, el esfuerzo regulatorio sobre estos mercados con tan particular estructura de costos.

En referencia a la calidad del gas natural vehicular se encuentra que hay una caracterización por parte de las fuentes de suministro de gas sobre las calidades entregadas, adicionalmente, en comparación a normatividades internacionales, se encuentra que la normatividad colombiana que regula la composición y las propiedades del gas natural (NTC 4826) es tomada de un estándar internacional (ISO 15403:-1) no se regula el contenido de metano directamente como en otras normas internacionales, parámetro importante por temas de seguridad y confiabilidad en el uso vehicular. Con respecto a la calidad y normatividad del gas licuado de petróleo en Colombia se encuentra que hay una normatividad para tecnologías de vehículos con sistema de alimentación por carburador, quedando poco útil para aplicaciones en vehículos de inyección y vehículos encendidos por compresión. En el capítulo 5 se encuentra en detalle el estado normativo colombiano en comparación al encontrado a nivel internacional y en comparación al marco de referencia desarrollado en los capítulos anteriores a partir de las tecnologías encontradas y a estudios de rendimiento, emisiones y consumo.



ALCANCES

En este informe se incluyen los alcances presentados en el segundo informe que hacen parte del contrato C005 de 2014 suscrito entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, adicionalmente cubre los siguientes alcances:

1. Efectuar un inventario completo de tecnologías disponibles en el mercado para el uso de gas combustible (gas natural -GNL y GNC- y GLP) automotor.
2. Recopilar información actualizada y detallada de especificaciones técnicas, rendimientos, limitaciones de uso e infraestructura, emisiones, ahorros de combustible, países donde se utilizan, costos de inversión y operativos, ventajas y desventajas de cada una de ellas.
3. Comparar dichas tecnologías por tipo de gas combustible (gas natural -GNL y GNC- y GLP), y con las respectivas para gasolina y diésel, y con otras ambientalmente sostenibles, tales como los vehículos eléctricos.
4. Revisar detalladamente la normatividad vigente en el país aplicable a vehículos a gas (gas natural-GNL-GNC y GLP). Compararla con las exigencias establecidas en otros países.
5. Analizar el alcance de dicha normatividad teniendo en cuenta las tecnologías evaluadas y los resultados obtenidos en el estudio.
6. Efectuar recomendaciones frente a la normatividad técnica
7. Revisar detalladamente la normatividad vigente en el país en cuanto a la calidad del gas natural vehicular y GLP. Compararla con las exigencias establecidas en otros países.
8. Analizar el impacto ambiental de dicha normatividad y efectuar las recomendaciones pertinentes.



DEFINICIONES

ARBOL DE LEVAS

Es el encargado de controlar la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape de acuerdo a los tiempos del motor.

BLOQUE DEL MOTOR

Es el elemento más grande del motor de combustión interna, en el cual se montan los demás componentes, tales como el cigüeñal, cárter, cilindros, pistones, bielas y culata. El bloque está soportado en el chasis del vehículo.

BIELAS

Son los elementos de unión entre el cigüeñal y los pistones de un motor.

BUJÍAS

Son los elementos encargados de generar la chispa eléctrica dentro de la cámara de combustión en los motores que operan con ciclo Otto, para hacer la ignición de la mezcla aire-combustible.

CALOR DE COMBUSTIÓN (ΔH_f°)

Es la energía liberada en forma de calor cuando un componente logra combustión completa con oxígeno bajo condiciones estándar. Está expresado en unidades de energía por unidad de masa (kJ/kg o BTU/lb) o en unidades de energía por unidad de volumen (kJ/litro o BTU/gal).

CALOR ESPECÍFICO ($C_p - C_v$)

Se define como la energía requerida para elevar en un grado Celsius la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. Dicha energía depende de cómo se realice el proceso, por lo cual puede ser calor específico a volumen constante (C_v) o calor específico a presión constante (C_p). El calor específico a presión constante es siempre mayor que el de volumen constante porque la presión constante permite que el sistema se expanda y la energía de expansión también debe ser suministrada al sistema. Un mayor valor en el calor específico de un material muestra una mayor capacidad de almacenamiento de energía por parte de dicho material.



CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN

Es el valor de la energía requerida para el cambio de fase de un líquido a vapor. Depende de las condiciones de temperatura y presión y está expresado en unidades de energía por unidad de masa (kJ/kg o BTU/lb) o en unidades de energía por unidad de volumen (kJ/litro o BTU/gal).

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO

Es la capacidad volumétrica o másica de un vehículo para almacenar combustible en sus tanques, bien sea gas o líquido.

CÁRTER

Se ubica en la parte inferior del bloque del motor y sirve como depósito del aceite lubricante.

CIGÜEÑAL

Es el eje principal del motor y se encarga de convertir el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotativo a partir del accionamiento de las bielas.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k)

Indica la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura entre los extremos de dicho espesor. Es por tanto, una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un material es buen conductor térmico cuando su conductividad térmica es elevada y, en contraste, un valor bajo de conductividad significa que el material es un aislante térmico. Sus unidades son energía por unidad de tiempo, distancia y temperatura (W/m °C o BTU/h lb °F).

CULATA

Se ubica en la parte superior del motor, encima del bloque del motor y forma la cámara de combustión. En la culata se instalan las válvulas de admisión y de escape así como los elementos de encendido e inyección del motor.

Dinámica vehicular

Rama de la ingeniería que presenta en detalle la mecánica que se presenta en los diferentes desplazamientos de un vehículo, se clasifica en tres partes de acuerdo al plano de desplazamiento del vehículo: dinámica longitudinal, dinámica lateral y dinámica vertical.

DENSIDAD (ρ)

Indica la cantidad de masa de una sustancia que está contenida en un volumen unitario.



$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

DYNO

Banco dinamométrico, dispositivo mecánico diseñado para montar vehículos sobre sus rodillos y poder frenarlo por diferentes mecanismos de manera controlada.

ENERGÍA MÍNIMA DE INFLAMACIÓN

Es la energía mínima necesaria para conseguir la inflamación de un combustible en condiciones atmosféricas estándar.

GAS A LIQUIDO (GAL)

Es el proceso de conversión de un combustible gaseoso a un combustible líquido, con origen en la tecnología conocida como Fischer Tropsch.

GAL DIESEL

Es un tipo de diésel de alta calidad obtenido a partir de un proceso GAL.

GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)

Conocida también como densidad relativa, es la relación entre la densidad de un gas y la densidad del aire medida a las mismas condiciones de referencia.

$$G_s = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{aire}}$$

ÍNDICE WOBBE (W_s)

Es la relación entre el poder calorífico inferior de un combustible y la raíz cuadrada de su gravedad específica. Este parámetro sirve para establecer la intercambiabilidad entre gases combustibles usados en motores de combustión interna.

$$W_s = \frac{LHV}{G_s}$$

INTERVALO DE INFLAMABILIDAD

Es el intervalo de concentraciones de gases, nieblas o vapores de un combustible en aire en el cual puede generarse la ignición de la mezcla aire-combustible. Se expresa como un par de números que indican el límite inferior y el límite superior de dicho intervalo.

- Límite inferior de inflamabilidad: Es la concentración de gases, vapores o nieblas en aire, por debajo de la cual la mezcla no es inflamable.



- Límite superior de inflamabilidad: Es la concentración de gases, vapores o nieblas en aire, por encima de la cual la mezcla no es inflamable.

INTERENFRIADOR

Es un intercambiador de calor que disminuye la temperatura del aire de admisión de un motor una vez pasa por el turbocargador.

KNOCK

Es la combustión detonante no controlada al interior de los cilindros de un motor de combustión interna. Puede presentarse debido a la baja capacidad antidetonante del combustible en comparación con la relación de compresión del motor, a temperaturas muy altas dentro de la cámara de combustión (como en las paredes de los cilindros o en los electrodos de las bujías), o a una mala calibración en el tiempo de inicio de la chispa en las bujías. En todos los casos, se presenta la ignición temprana de la mezcla aire-combustible, con respecto al momento ideal para dicha ignición.

MANTO

Superficie graficada en 3D que permite representar las emisiones en función de dos variables dinámicas del vehículo. Por ejemplo: las emisiones de CO en función de la velocidad y la aceleración desarrolladas durante una prueba en ruta.

MÚLTIPLE DE ADMISIÓN

Es un elemento que tiene como función principal servir de distribuidor del aire de admisión, desde el sistema de admisión hacia cada uno de los cilindros del motor, donde es alimentado mediante las válvulas de admisión.

MÚLTIPLE DE ESCAPE

Es un elemento que tiene como función principal servir de colector de los gases de escape producidos en la combustión al ser liberados por cada cilindro mediante válvulas de escape y conducidos hacia el tubo de escape del vehículo.

NÚMERO DE CETANO

Es un indicativo de la facilidad con la cual un combustible hace ignición en un motor diésel. Se toma como referencia el valor de 100 para el cetano (n-hexadecano) puro y el valor de 15 para el heptametilnonano. Es medido en un motor que opera bajo condiciones estándar. Típicamente, los motores diésel se diseñan para un número de cetano entre 40 y 55. Por debajo de 38, se incrementa el retardo de la ignición en el motor.



OCTANAJE

También denominado número de octano es el índice de resistencia al *knock*, con base en combustibles de referencia como son el iso-octano (octanaje=100) y el n-heptano (octanaje=0).

PESO EN VACÍO

Es el peso del vehículo incluyendo chasis, motor y carrocería delantera. No incluye peso de carrocería posterior, por ejemplo peso de furgones, estacas, etc.

PESO NETO VEHICULAR

Es el peso original del vehículo en condiciones de operación con todo el equipo estándar de fábrica y con el tanque de combustible lleno a la capacidad nominal del tanque.

PESO BRUTO VEHICULAR (PBV)

Es el peso máximo de diseño del vehículo cargado, especificado por el fabricante mismo. Incluye el peso del vehículo en vacío, más el peso de la tripulación, más el peso máximo de carga que puede transportar

$$PBV = \text{Peso en vacío} + \text{peso carrocería posterior} + \text{peso tripulación} + \text{carga útil}$$

PISTÓN

Es un elemento que recibe la presión o energía liberada en la combustión para convertirla en un movimiento lineal, el cual es transmitido a las bielas.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (UHV por sus siglas en inglés)

Es la cantidad de energía que entrega un kilogramo o un metro cúbico de combustible al oxidarse de forma completa. Se considera que el vapor de agua contenido en los gases de combustión se condensa.

PODER CALORÍFICO INFERIOR (LHV por sus siglas en inglés)

Es el poder calorífico superior menos el calor latente de condensación de los productos de combustión.

PUNTO DE EBULLICIÓN (T_e)

Es la temperatura a la cual ocurre el cambio de fase de una sustancia entre la fase gaseosa y la fase líquida.



PUNTO DE FUSIÓN (T_F)

Es la temperatura a la cual ocurre el cambio de fase de una sustancia entre la fase líquida y la fase sólida.

PUNTO DE INFLAMACIÓN

Es la temperatura mínima en condiciones normales de presión, donde se desprende la suficiente cantidad de vapores de una sustancia para que se produzca la inflamación de la mezcla de dichos vapores con aire mediante el aporte de un foco de ignición externo.

RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

Es la relación entre la masa de aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Si dicha relación corresponde a la relación teórica requerida para una combustión completa, se denomina relación estequiométrica. Si el valor de la relación es mayor que la estequiométrica, la mezcla aire-combustible se denomina mezcla pobre y si la relación es menor que la estequiométrica, la mezcla se denomina mezcla rica.

SONDA LAMBDA

Es un sensor encargado de medir el nivel de oxígeno presente en los gases de escape del motor a partir del índice Lambda. Lambda es el índice que relaciona la masa de aire proporcionada y la masa de aire necesaria, por tanto si la cantidad de aire proporcionado es igual al necesario $\lambda=1$ entonces la mezcla es estequiométrica, si es mayor $\lambda>1$ entonces la mezcla es pobre y si es menor $\lambda<1$ la mezcla es rica.

TEMPERATURA DE LLAMA ADIABÁTICA

Es la temperatura que alcanzarían los productos de combustión de una mezcla aire-combustible debido al calentamiento producido por la energía liberada en la combustión en condiciones adiabáticas, es decir, sin pérdida de calor hacia el entorno.

TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO

Es la temperatura mínima para que un combustible haga ignición en aire de forma espontánea en una atmósfera normal, sin un foco externo de ignición (chispa o llama).

TURBOCARGADOR

Es un dispositivo que se utiliza para aumentar la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión del motor, a partir del aumento de presión del aire. Está conformado por una turbina accionada por la energía presente en los gases de escape y por un compresor encargado de aumentar la presión del aire de admisión antes de ser conducido a los pistones.



VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

Son elementos ubicados en la culata y accionados por el eje de levas, que tienen como función permitir el ingreso del aire (válvulas de admisión) y la salida de los gases producto de la combustión (válvulas de escape).

VISCOSIDAD CINEMÁTICA (ν)

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido.

Dos unidades son el m^2/s y el stoke ($1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/s$)

VISCOSIDAD DINÁMICA (μ)

Es una medida de la resistencia a fluir de un líquido o un gas. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. Su unidad es el poise que equivale a $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (pascal por segundo).



1. MARCO REFERENCIAL Y TEÓRICO

1.1 MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor es una máquina que transforma cualquier tipo de energía que se le aplique en energía mecánica para obtener movimiento, en el caso del motor de combustión interna transforma la energía liberada por la combustión, en energía mecánica en un eje de salida.

Según la forma en que se libere u obtenga esta energía del combustible, un motor de combustión interna puede clasificarse como de ciclo Otto o ciclo diésel.

- Ciclo diésel

Un motor se clasifica como de ciclo diésel cuando el proceso de combustión y liberación de la energía del combustible se realiza en un proceso termodinámico de la sustancia de trabajo aire-combustible aproximadamente a presión constante. El aire de admisión se comprime, produciendo un incremento de la presión y consecuentemente de la temperatura hasta una temperatura superior a la temperatura de autoencendido del combustible diésel, la combustión se presenta cuando el combustible es inyectado dentro del aire caliente y presurizado en la cámara de combustión.

- Ciclo Otto

Un motor se clasifica como de ciclo Otto cuando el proceso de combustión y liberación de la energía del combustible se realiza en un proceso termodinámico de la sustancia de trabajo (mezcla aire-combustible y posteriormente productos de combustión) aproximadamente a volumen constante. Para lograr la combustión en los motores que funcionan bajo este ciclo, es necesario producir una chispa que cause la ignición.

1.1.1 Parámetros de los motores de combustión interna

Para el estudio y análisis de los motores de combustión interna es importante conocer algunas de sus características y parámetros como lo son:

- Punto Muerto Superior (PMS): es el punto en el que el pistón se encuentra más alejado del cigüeñal y el volumen de la cámara de combustión se hace mínimo.



- Punto Muerto Inferior (PMI): es el punto en el que el pistón se encuentra más próximo al cigüeñal y el volumen de la cámara de combustión se hace máximo.
- Volumen de desplazamiento: Es el volumen que desplazan los cilindros del motor expresada en centímetros cúbicos al desplazarse desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior. Coloquialmente se denomina cilindraje.
- Volumen libre: es el volumen de la cámara de combustión cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior.
- Relación de compresión: es la relación entre el volumen de desplazamiento más el volumen libre dividido entre el volumen libre.

1.2 MOTOR DEDICADO

Un motor de combustión interna es dedicado cuando el diseño inicial por parte del fabricante está realizado para operar de forma exclusiva con un solo tipo de combustible como son gasolina, diésel, gas natural, propano, entre otros. Según el tipo de combustible aplicado al sector transporte, los motores dedicados se clasifican en:

- Motor dedicado a Gas Natural (GN)
- Motor dedicado a Gas Licuado de Petróleo (GLP)
- Motor dedicado a diésel
- Motor dedicado a gasolina

1.3 MOTOR DUAL

Un motor de combustión interna es dual cuando es posible hacer uso de dos combustibles diferentes de manera simultánea. En aplicaciones al sector transporte, se encuentran motores duales a partir de kits de conversión que permiten utilizar diésel y gas natural en un motor originalmente dedicado a diésel. Un motor dual puede operar con un suministro de 100% diésel o con suministro simultáneo diésel-gas, pero no puede operar en 100% gas. Hay dos formas de conversión según el tipo de inyección del segundo combustible: puede ser inyectado en la entrada del turbocargador a partir de un mezclador de aire gas o puede ser inyectado en el múltiple de admisión, a partir de un riel común de inyectores a gas.



1.3.1 Motor dual diésel- Gas Natural (GN)

El suministro de gas natural puede hacerse en el múltiple de admisión o en la entrada del turbocargador.

1.3.2 Motor dual diésel- Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El suministro puede hacerse en el múltiple de admisión como gas licuado o como gas propano, o bien como gas propano en la entrada de admisión de aire del turbocargador.

1.4 MOTOR BICOMBUSTIBLE

Se dice que un motor de combustión interna es bicomcombustible cuando es posible el uso de dos combustibles de forma no simultánea dentro del motor. Los combustibles se encuentran en diferentes depósitos y sus líneas de alimentación son independientes. A partir de un sistema de control, se conmutan las líneas para dar uso en una sola de las dos formas de suministro. En el mercado se encuentran sistemas de conversión a motores bicomcombustibles para gasolina-gas, pero no se encuentran para motores diésel.

- Motor Bi-Combustible Gasolina-Gas Natural
- Motor Bi-Combustible Gasolina-Gas Licuado de Petróleo

1.5 NORMAS DE EMISIONES

1.5.1 Norma Europea-EURO

La normatividad europea tiene dos tipos de estándar de emisiones en vehículos de carga pesada, la primera para vehículos dedicados a diésel y la segunda para vehículos con sistema dual diésel-gas o sistema gas dedicado. Las diferencias entre ellos están relacionadas en cuanto que para la normatividad de vehículos dedicados a diésel se incluye la medición de opacidad, los hidrocarburos sin quemar totales (THC) tienen valores máximos permisibles más bajos, y los valores de monóxido de carbono (CO) máximos permisibles son más bajos, mientras que para la normatividad para vehículos duales diésel-gas o dedicados a gas, se separa la medición de hidrocarburos sin quemar sin incluir metano (NMHC) y en metano (CH₄) con valores permisibles más altos junto a los valores de monóxido de carbono.



En el caso de regulación para motores dedicados a diésel, se controlan los óxidos de nitrógeno (NOx), los hidrocarburos sin quemar totales (THC), el monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) y hollín (opacidad). Aunque en la última normatividad vigente, EURO VI, se incluye un parámetro adicional que es el conteo de partículas finas (NP) en reemplazo del parámetro de medición de opacidad. Según el tipo de normatividad se realizan varias pruebas a cargas y velocidades constantes (denominadas pruebas en estado estable), las pruebas se enuncian a continuación:

- Prueba ECE R-49: Esta prueba aplica para vehículos diésel EURO I y EURO II. La prueba debe ser realizada en un dinamómetro operado a través de trece condiciones diferentes de carga (entre el 2% y el 25%) y velocidad (velocidad de ralentí, de gobernación y velocidad del punto de torque máximo), donde se mide cada una de las emisiones de gases en el escape. El resultado final es el promedio de las emisiones de las 13 condiciones. Adicionalmente, hay unos factores de peso, según la capacidad de carga del vehículo.
- Pruebas ESC y ELR: Las pruebas ESC (Ciclo Estacionario Europeo) y ELR (Respuesta de Carga Europea) aplican para vehículos EURO III, EURO IV y EURO V. Al igual que la prueba ECE R-49, es una medición de emisiones para vehículos de carga pesada realizada a partir de trece condiciones diferentes de carga y velocidad en un dinamómetro, la diferencia radica en el orden de condición de carga y que tiene un límite de tiempo para cada condición de operación, además, se incluye medición de opacidad.
- Prueba WHSC: Se aplica para vehículos diésel de carga pesada EURO VI de forma controlada en dinamómetro, a comparación de los anteriores, ya no se mide opacidad, sino conteo de partículas finas, adicionalmente cambian los factores de peso y las velocidades.

En la Tabla 1 se muestra la evolución de la normatividad Euro para vehículos de carga pesada dedicados a diésel:

Tabla 1. Estándar de emisiones normatividad Europea para vehículos diésel de carga pesada [g / kWh]

Norma de emisión	Año	Prueba	CO	THC	NOx	MP	Opacidad (m ⁻¹)	NP (1/kWh)
EURO I	1992, ≤85kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, >85kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
EURO II	1996	ECE R-49	4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998		4.0	1.1	7.0	0.15		



Norma de emisión	Año	Prueba	CO	THC	NOx	MP	Opacidad (m ⁻¹)	NP (1/kWh)
EURO III	2000	ESC y ELR	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8	
EURO IV	2005	ESC y ELR	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5	
EURO V	2008	ESC y ELR	1.5	0.25	2.0	0.02	0.5	
EURO VI	2013	WHSC	1.5	0.13	0.4	0.01		8.0x10 ¹¹

Fuente. <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>

En el caso de regulación de motores duales diésel-gas o dedicados a gas las emisiones que se miden en los vehículos son: monóxido de carbono (CO), Hidrocarburos sin quemar sin incluir metano (NMHC), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado (MP) y en la última versión EURO VI se incluye conteo de partículas (NP). A diferencia de la normatividad para vehículos dedicados a diésel, las pruebas que se realizan son ciclos de manejo con variación en su velocidad y carga (se denominan pruebas en estado transciente), las cuales pruebas se enuncian a continuación:

- Prueba ETC: El Ciclo Transciente Europeo es un ciclo de manejo que simula las condiciones de operación de los vehículos de carga pesada en tres escenarios: el primero en una ruta urbana, el segundo en una ruta rural y el tercero en una ruta de autopista, la duración del ciclo completo es de 1800 s, cada parte es de 600 s. Al igual que los ciclos de estado estable, se realiza en un dinamómetro.
- Prueba WHTC: Este ciclo se implementa para vehículos con normatividad EURO VI. A diferencia del ciclo ETC, en éste se incluye operación del vehículo en frío y en caliente, adicionalmente no está dividido en tres secciones.



En la Tabla 2 se muestran los valores máximos permisibles de emisiones según la normatividad Europea aplicable a vehículos duales diésel-gas o dedicados a gas.

Tabla 2. Estándar de emisiones normatividad europea para vehículos de carga pesada duales diésel-gas o dedicados a gas [g / kWh]

Norma de emisión	Año	Prueba	CO	NMHC	NOx	MP ^b	CH ₄ ^a	NP ^e (1/kWh)
EURO III	2000	ETC	5.45	0.78	5.0	0.16 ^c	1.6	
EURO IV	2005	ETC	4.0	0.55	3.5	0.03	1.1	
EURO V	2008	ETC	4.0	0.55	2.0	0.03	1.1	
EURO VI	2013	WHTC	4.0	0.16 ^d	0.46	0.01	0.5	8.0x10 ¹¹

^a Solo para vehículos dedicados a gas (EURO III-V: 100% gas natural, EURO VI: Gas natural o Gas Licuado de petróleo)
^b No aplicable para vehículos dedicados a gas, entre EURO III y EURO V
^c PM = 0.21 g/kWh para motores con un volumen de desplazamiento por cilindro < 0.75 dm³ y una velocidad de la potencia máxima de 300 rpm
^d Hidrocarburos totales (THC) para motores duales
^e Número de partículas para motores duales.

Fuente: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>

1.5.2 Norma de Estados Unidos - EPA

A través de esta normatividad la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos busca proteger la salud humana y el medio ambiente. Estas normas a diferencia de las europeas solamente están disponibles para vehículos de carga dedicados a diésel, no hay una norma para vehículos duales diésel-gas o dedicado a gas. Adicionalmente no tiene medición de conteo de partículas y la opacidad máxima permisible se mantiene independientemente del modelo del vehículo.

Hay tres tipos de pruebas para medir las emisiones y comparar con los niveles máximos permitidos:

- Prueba FTP: Es un ciclo de manejo transiente, es decir que varía la velocidad del vehículo y la carga durante su realización. Costa de 1200 s y necesita un dinamómetro eléctrico capaz de absorber y proveer energía.
- Prueba SET: Es una prueba en estado estable equivalente a la prueba ESC de la norma europea.
- Prueba NTE: La prueba NTE no se desarrolla a partir de un ciclo de manejo definido, el enfoque de la NTE establece un área de control la cual representa las velocidades y las cargas esperadas en operación según el vehículo a evaluar, dentro de dicha área, las emisiones pueden ser tomadas y los límites se dan a partir de unos factores de corrección.



En la Tabla 3 se muestran los valores de las emisiones de gases que se miden en la normatividad americana EPA:

**Tabla 3. Estándar de emisiones Americana para vehículos de carga dedicados a diésel.
 [g/bhp-hr]**

Año	CO	THC	NOx	NMHC	NMHC + NOx	PM	Opacidad ^a (%)
1974-1978	40	-	-	-	16	-	20/15/50
1979-1984	25	1.5	-	-	10	-	20/15/50
1985-1987	15.5	1.3	10.7	-	-	-	20/15/50
1988-1989	15.5	1.3	10.7	-	-	0.6	20/15/50
1990	15.5	1.3	6.0	-	-	0.6	20/15/50
1991-1993	15.5	1.3	5.0	-	-	0.25	20/15/50
1994-1997	15.5	1.3	5.0	-	-	0.1	20/15/50
1998-2003	15.5	1.3	4.0	-	-	0.1	20/15/50
2004-2006	15.5	-	-	-	2.4	0.1	20/15/50
2007	15.5	-	0.2	0.14	2.4	0.01	20/15/50

^a Para vehículos de carga ligera, mediana y pesada respectivamente.

Fuente: <http://www.epa.gov/otaq/standards/heavy-duty/hdci-exhaust.htm>

1.5.3 Normas Colombianas

A nivel nacional, la regulación en emisiones en fuentes móviles está dada por la Resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, donde se especifica valores máximos permisibles de emisiones de contaminantes a partir de prueba estática, para vehículos a gasolina, bi-combustibles gasolina-gas o gasolina-Gas Licuado de Petróleo se regula solamente hidrocarburos sin quemar (HC) y monóxido de Carbono (CO). Para vehículos diésel las emisiones se regulan a partir de la opacidad, aunque para ciudades como Bogotá, en la Resolución 1304 de 2012 de la Secretaría Distrital de Ambiente, se encuentran valores permisibles más bajos según el modelo del vehículo. Adicionalmente, en la resolución 2604 de 2009 del Ministerio de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se reglamentan los límites de emisiones permisibles en prueba dinámica para vehículos de servicio público de pasajeros, basados en ciclos de prueba de Europa y de Estados Unidos.



Para la ciudad de Bogotá los valores máximos permisibles de opacidad para vehículos diésel son más bajos en comparación a los que rigen a nivel nacional. En la Tabla 4 se muestran los valores máximos permisibles de opacidad según la Resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente y según la Resolución 1304 de 2012 de la Secretaría Distrital de Ambiente.

Tabla 4. Opacidad permisible en vehículos diésel en Colombia.

Opacidad. Resolución 910 de 2008 (Nivel Nacional)		Opacidad. Resolución 1304 de 2012 (Aplica para Bogotá)	
Año Modelo	Opacidad (%)	Año Modelo	Opacidad (%)
1970 y anterior	50	1970 y anterior	50
1971 - 1984	45	1971 - 1984	26
1985 - 1997	40	1985 - 1997	24
1998 y posterior	35	1998 - 2009	20
		2010 y posterior	15

Fuentes: Resolución 910 de 2008. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial.
 Resolución 1304 de 2012. Secretaría Distrital de Ambiente

En la resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente, modificada por la Resolución 2604 de 2009 del Ministerio de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se especifican valores límite de material particulado, hidrocarburos sin quemar, monóxido de Carbono y de óxidos de Nitrógeno para vehículos de carga dedicados a diésel en prueba dinámica, según los ciclos disponibles en la normatividad americana (ciclos FTP, SET y NTE). En la Tabla 5 se especifican los límites máximos. A pesar de tener la normatividad para control de emisiones en pruebas dinámicas para vehículos de carga, no se realiza así, sino se regula a partir de la opacidad solamente, adicionalmente no se encuentra ciclo de manejo para cada una de las tipologías de vehículos, sino se consideran los ciclos de manejo utilizados para Estados Unidos.

Tabla 5. Límites máximos de emisiones permisibles para motores ciclo diésel de vehículos pesados, evaluados mediante ciclos de Estados Unidos en Colombia (g/bhp-h)

Ciclo	Aplicación	CO	NOx	NMHC	PM
FTP & SET/NTE	LHDDE	15,5	0,2	0,14	0,01
	MHDDE				
	HHDE				
	Bus urbano				

Fuente. Resolución 2604 de 2009. Ministerio de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.



En referencia a normatividad colombiana aplicable a vehículos de carga pesada alimentados con gas natural o con gas licuado de petróleo, en la Resolución 2604 de 2009 del Ministerio de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se encuentran los límites máximos permisibles de emisiones de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos sin quemar (HC y NMHC), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP) y opacidad a partir de ciclos de la normatividad europea (Ciclo ESC, ETC y ELR). Al igual que para la normatividad de emisiones para vehículos con motores diésel, esta norma no se está aplicando actualmente en el país, además los ciclos estáticos y dinámicos son tomados de la normatividad Europea, pero no hay unos ciclos generados para las condiciones de Colombia.

En la Tabla 6 se muestran los límites máximos permisibles de emisiones en vehículos de carga pesada con motor Otto a gas natural o a GLP a partir de los ciclos de la normatividad europea. No hay especificaciones para motores duales diésel-gas.

Tabla 6. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos pesados con motores ciclo Otto a gas natural o a GLP evaluados mediante ciclos de normatividad europea en Colombia (g/bhp-h)

Subcategoría	CO		HC		NMHC		CH ₄		NO _x		PM		Opacidad
	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	(m ⁻¹)
M2,M3	1.5	4.0	0.46	-	-	0.55	-	1.1	3.5	3.5	0.02	0.03	0.5

Fuente. Resolución 2604 de 2009. Ministerio de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

1.6 TECNOLOGÍAS EN GAS

A continuación se muestran las diferentes tecnologías aplicadas al gas para el uso en motores de combustión interna. Según la composición se pueden dividir en Gas Natural (también llamado Gas Natural Seco (GNS) y Gas Licuado de Petróleo (GLP)

1.6.1 Gas Natural Seco (GNS)

El GNS es un gas compuesto principalmente por metano a condiciones ambientales, es incoloro, inodoro, insípido, y más luminoso que el aire. Tiene tratamientos de reducción de ácidos gaseosos, odorización, ajuste de humedad y de hidrocarburos. Dependiendo de su aplicación, los valores de sus propiedades pueden cambiar. La combustión en motores de



combustión interna ocurre en fase gaseosa, aunque se puede almacenar de dos formas en los vehículos, como gas natural comprimido y como gas natural licuado.

Independientemente de la forma en que se almacena, para aplicaciones como combustible de motores de combustión interna éste llega como GNS.

En la Tabla 7 se muestran las propiedades del gas natural al momento de su obtención:

Tabla 7. Propiedades del Gas Natural

Propiedad	Valor
Masa molar relativa	17-22
Contenido de carbono. % Peso	73.3
Contenido de hidrógeno. % Peso	23.9
Contenido de Oxígeno. % Peso	0.4
Densidad relativa a 15°C	0.72 a 0.81
Punto de fusión. °C	-162
Temperatura de autoignición. °C	540-560
Octanaje	120-130
Número de Metano	69-99
Relación Aire/Combustible estequiométrica, en peso	17.2
Límites de inflamabilidad en aire, % volumen	5-15
Poder calorífico inferior LHV, MJ/kg	47
Concentración de Metano, % volumen	80-99
Concentración de Etano, % volumen	2.7-4.6
Concentración de Nitrógeno, % volumen	0.1-15
Concentración de dióxido de Carbono, % volumen	1-5
Concentración de Azufre, % peso	<5

Fuente Mokhatab, W. Poe, J. Speight. Handbook of Natural Gas transmission and Processing. Elsevier. 2006. Pg.9. Table 1-2 Properties of natural gas

Las ventajas del gas natural en comparación a otros combustibles radican en que se obtienen menos gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) e hidrocarburos (HC), debido a su composición simple de hidrocarburos (siempre y cuando la mezcla en las cámaras del motor de combustión interna sean cercanas a las estequiométricas) y menos cantidad de material particulado en comparación al diésel y a la gasolina ya que no tiene compuestos complejos aromáticos ni olefinas.

La principal desventaja es que genera menor potencia comparado con un vehículo a gasolina o diésel de las mismas características sin turbo, esto se debe a su relación aire/combustible ($A/F=17.2$) que es mucho mayor que la de motores a gasolina o diésel ($A/F=14.7$) esto implica que para un mismo volumen se requiera menor cantidad de gas en las cámaras de combustión,



causando una menor potencia, aunque también conlleva a un menor consumo, la pérdida de potencia por condiciones volumétricas están entre un 10% y un 20% comparado a vehículos diésel y gasolina.

En la Tabla 8 se muestran los valores típicos en la composición de un gas natural al momento de su extracción:

Tabla 8. Composición típica de un gas natural al momento de su extracción

Nombre	Formula	Volumen (%)
Metano	CH ₄	>85
Etano	C ₂ H ₆	3-8
Propano	C ₃ H ₈	1-2
Butano	C ₄ H ₁₀	<1
Pentano	C ₅ H ₁₂	<1
Dióxido de Carbono	CO ₂	1-2
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	<1
Nitrógeno	N ₂	1-5
Helio	He	<0.5

Fuente. Mokhatab, W. Poe, J. Speight. Handbook of Natural Gas transmission and Processing. Elsevier. 2006. Pg.3. Table 1-1 typical composition of natural gas

Dependiendo de la regulación en gas natural de cada país, el rango permisible en su composición para uso en vehículos puede variar, dichas variaciones son disminuciones sustanciales en el contenido de H₂S y en el contenido de alcanos pesados como son el propano, butano y pentano.

1.6.2 Gas Natural Comprimido (GNC)

Comprimido a una presión entre 3000 y 3600 psi (entre 20 y 25 MPa) con el fin de almacenarlo. El suministro a las cámaras de combustión se da a condiciones ambientales. Un vehículo a GNC tiene menos autonomía que los combustibles líquidos, un litro de diésel equivale a cerca de 5 litros de gas natural comprimido a 3000 Psi.

1.6.3 Gas Natural Licuado (GNL)

El gas natural es llevado a fase líquida a una temperatura inferior a -160°C, que es su temperatura de fusión. El GNL es inodoro, incoloro, no tóxico, su densidad relativa en comparación a la del agua es 0.45, y conserva las demás propiedades del GNS. El GNL se utiliza

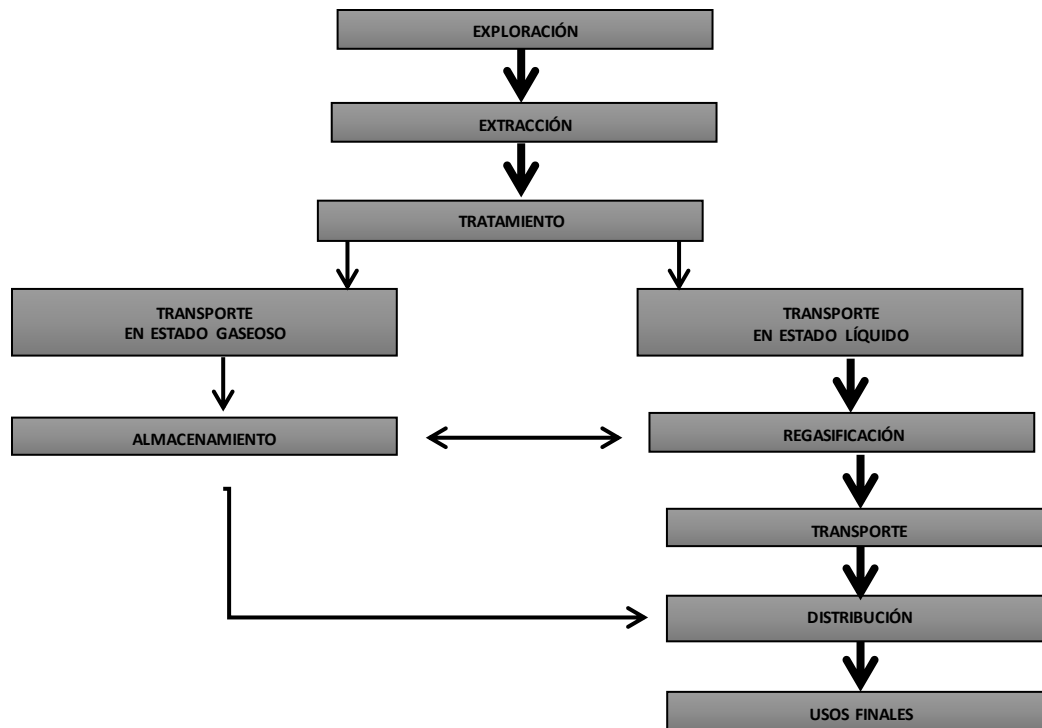


en motores de combustión interna, como sistema de almacenamiento y suministro de gas al motor, es decir que un sistema GNL vehicular tiene tanques de almacenamiento en GNL y posteriormente tiene componentes (evaporadores, válvulas entre otros) para transformarlo en gas natural seco GNS y ser quemado en ese estado en las cámaras de combustión. Un vehículo a GNL tiene cerca de 3 veces más autonomía que uno a GNC para el mismo volumen.

Actualmente, el uso del GNL es dedicado al transporte eficiente de gas natural a zonas de difícil acceso o zonas carentes de reservas de gas, (debido a su reducción en volumen en 600 veces al estar en estado líquido) pese a que tiene un gran inconveniente que es la necesidad de una planta regasificadora en los sitios objetivo. Ejemplo de su uso se encuentra en países importadores de GNL como son Japón, Corea, Taiwan, Francia y España.

En la Figura 1 se muestra el uso del gas natural en la cadena de suministro de gas:

Figura 1. Etapas de obtención de Gas Natural, uso de tecnología GNL



Fuente. Jorge Díaz. 2006. Gas Natural Licuado, Tecnología y mercado. Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi". Trabajo de investigación.



Básicamente consta de cuatro etapas:

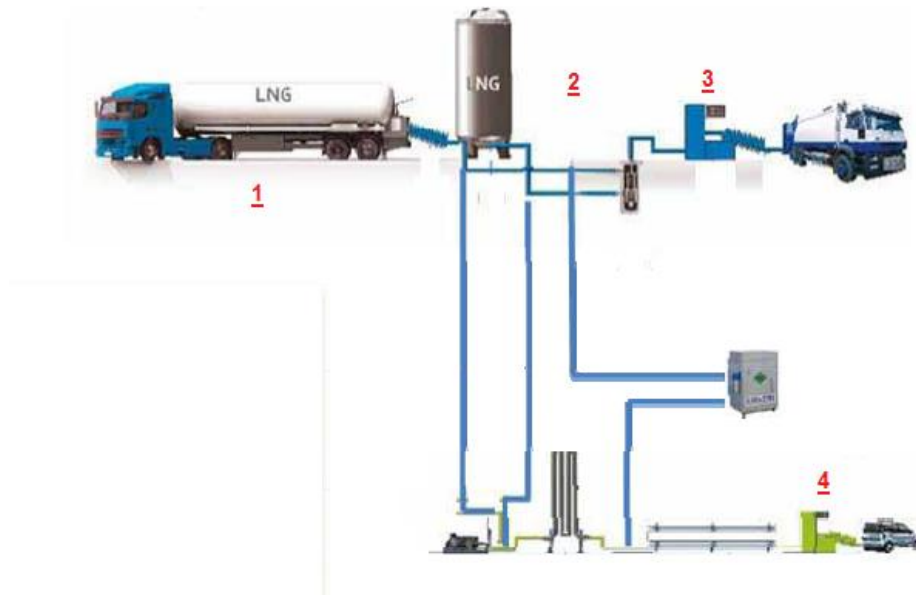
1. Licuefacción del gas Natural: es el proceso de cambio de estado gaseoso a estado líquido del gas natural, se basa en los siguientes pasos:
 - Deshidratación: A partir de enfriamiento directo, absorción de agua en glicoles o adsorción de agua por sólidos.
 - Tratamiento: En este punto se remueven gases ácidos, CO_2 , H_2S entre otros. El objeto de la remoción es evitar daños al equipo de procesamiento al momento de la congelación de las impurezas y disminuir los efectos de corrosión en los equipos.
 - Circuito de refrigeración: A partir de cambios de presión y de temperatura se pasa el gas de estado gaseoso a estado líquido. Después de encontrarse en estado líquido, éste es sub-enfriado antes de su almacenamiento, la temperatura aproximada de su estado líquido a presión ambiente es de -161°C .
 - Almacenamiento: Los tanques de almacenamiento de GNL constan de una pared interna metálica, una pared intermedia aislante y una pared externa de hormigón, con el fin de minimizar la entrada de calor ambiente.
2. Transporte en estado líquido: principalmente su transporte es marítimo a partir de buques metaneros, aunque también se pueden transportar por tierra en camiones cisterna para transporte criogénico.
3. Regasificación: al llegar a su destino, el proceso de regasificación del GNL consta en llevarlo nuevamente a su estado gaseoso, para ello se aumenta la temperatura de forma controlada. Posteriormente es almacenado como GNS listo para su distribución. La desventaja al momento de realizar el proceso de regasificación es que se necesita mayores espacios de almacenamiento en estado gaseoso.
4. Transporte en estado gaseoso: el transporte en estado gaseoso se realiza a partir de gasoductos o a partir de camiones de gas presurizado llevándolo a cada una de las estaciones de servicio.

El suministro de GNL para un vehículo a partir de una estación de servicio se entrega en estado líquido sin pasar por la etapa de regasificación a la estación de servicio, la regasificación para su posterior quema se realiza en el sistema evaporador de GNL en el vehículo dedicado a este tipo de combustible.



En la Figura 2 se muestra el diagrama de funcionamiento de una estación de descarga de GNL:

Figura 2. Estación de descarga y suministro de GNL



Fuente. José Ramón Freire. 2013. Usos del Gas Natural en Transporte. Gas Natural Fenosa. Estación de carga GNL, página 22

A continuación se presentan los pasos:

1. Descarga del GNL por parte del camión cisterna criogénico, la descarga se realiza a unos tanques de almacenamiento criogénico que se encuentran a temperaturas inferiores a -160°C .
2. Tanques de almacenamiento, no tienen ningún sistema de refrigeración, en dado caso de disminuir el nivel por evaporación, los vapores pasan a un compresor y puede usarse como GNC.
3. Suministro a vehículos con tecnología GNL.
4. Suministro de GNC después de pasar por un proceso de evaporación y de un proceso de compresión del gas evaporado.



1.6.4 Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El GLP, también denominado Autogas en países europeos, es un gas conformado por una mezcla de butano y propano obtenido de yacimientos de gas natural y petróleo, su almacenamiento se realiza a presiones moderadas (de 0.3 a 1 MPa). Principalmente, hay tres formas de obtención de GLP:

1. Procesado durante la extracción de gas (también llamado gas no asociado, incluido GLP)
2. Procesado durante la extracción de petróleo (también llamado gas asociado)
3. Como producto de origen natural que se obtiene durante el refinado del crudo.

En el uso vehicular tiene ventajas como bajas emisiones de NOx y de PM logrando estándar de emisiones Euro V para motores en ciclo diésel (NOx por encima de 80 mg/km). Los análisis de pozo a las ruedas demuestran que un vehículo movido por GLP genera un 14% y un 10% menos emisiones de CO₂ en comparación a sus equivalentes de gasolina y diésel respectivamente, adicionalmente, 20 vehículos a GLP emiten la misma cantidad de NOx que uno potenciado a diésel.

El GLP tiene aplicaciones industriales, comerciales, domésticas y en transporte, se utiliza ampliamente en sitios donde el acceso a gas natural como fuente energética es limitado, tiene una gran versatilidad ya que se encuentra en el mercado almacenado en tanques, que garantizan que no se deteriore en el tiempo.

En el sector vehicular se utiliza principalmente en motores pequeños (cilindrades entre 1000 cc y 2000 cc) aunque hay vehículos de carga ligera como la Mercedes Benz Sprinter 316 GLP que viene disponible para su uso exclusivo de GLP. En menor escala se encuentran vehículos de carga mediana como el autobús híbrido CastroSua que tiene tracción y alimentación 100% eléctrica pero lleva un motor accionado por GLP que alimenta las baterías durante su funcionamiento, adicionalmente trae espacio para ser enchufado para una carga completa de las baterías. El mercado de este autobús aún es limitado debido a que su lanzamiento fue en el 2013 y España, el país productor del vehículo no cuenta con una red de estaciones de suministro de GLP considerable, en contraposición a esto, Repsol, empresa impulsora del bus CastroSua, se comprometió a instalar estaciones de servicio de GLP para clientes que deseen adquirir los vehículos.

Compañías especializadas desarrollan y venden kits de conversión, sin embargo, ha aumentado la oferta de vehículos manufacturados con sistemas de GLP de fábrica, desarrollado por empresas manufactureras como Ford, GM, Daimler Chrysler, Toyota, Nissan, Kia, Mitsubishi, Daihatsu, Vauxhall, Volvo, Proton, Renault, Peugeot, entre otras.

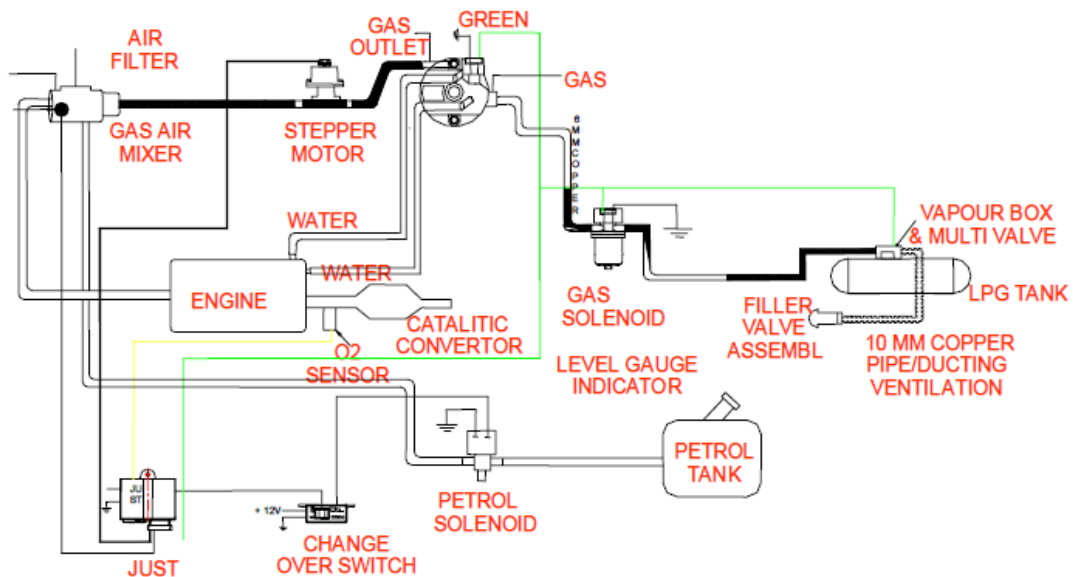


Las limitantes encontradas a través de los años en el GLP estaban asociadas a temas de seguridad en el manejo del combustible en el vehículo, ya que es extremadamente peligroso al haber fugas en el sistema por su inflamabilidad y por su densidad, porque es más denso que el aire. Estas limitantes se han disminuido a partir de diseños seguros por parte de los fabricantes de vehículos, pero se debe tener una red de suministro de GLP similar a la de GNC para llevarse a cabo un correcto suministro a los vehículos.

Adicionalmente, a las limitantes enunciadas anteriormente se suman las encontradas en vehículos de GNC como son la baja autonomía y el aumento del peso del vehículo a causa de los cilindros de almacenamiento.

A continuación, en la Figura 3 se muestran los principales componentes de un kit de conversión de un motor de gasolina a Dual Gasolina-GLP:

Figura 3. Diagrama esquemático de componentes de un sistema de conversión a GLP



Fuente: Indian Auto LPG. 2008. Booklet On Safe Practices/Check list. Pg 20. LPG Installation – schematic diagram

Consta de un tanque de alta calidad que alimenta una línea en cobre hasta llegar a un vaporizador, que es una válvula de estrangulamiento donde se disminuye la presión del combustible, el suministro de combustible es controlado a partir de un solenoide para GLP y uno para Gasolina, adicionalmente emuladores de la combustión son utilizados en vehículos de inyección a partir de un dispositivo llamado unidad de control Lambda.



1.6.5 Combustibles líquidos realizados a partir de Gas Natural (GAL)

El Gas A Líquido o GAL es un proceso donde se transforma un gas natural en un combustible líquido ultra limpio (es decir, con un porcentaje mínimo de impurezas o de elementos no deseados como el azufre), esto se logra a partir de la separación de las moléculas de gas y su posterior unión, actualmente este proceso se utiliza principalmente para la obtención de GTL diésel pero también se puede obtener otros combustibles como nafta, queroseno, parafinas, dimetileter y metanol.

El GAL es un proceso de obtención de un combustible sintético líquido producido a partir de gas natural usando el proceso de Fischer Tropsch. Éste involucra procesos catalíticos para separar las moléculas de gas natural para formar una mezcla gaseosa de hidrógeno y monóxido de carbono, denominado gas de síntesis, y posteriormente un proceso de unión de moléculas dando lugar a moléculas más largas. A partir del proceso de GAL se puede obtener dos tipos de productos:

1. Hidrocarburos líquidos: Como diésel, gasolina, queroseno, jet-fuel, parafinas.
2. Hidrocarburos oxigenados: DiMetil Eter y Metanol.

El proceso GAL puede lograr una alta calidad en el combustible final, por ejemplo en el caso de obtención de GAL diésel, su composición está dada exclusivamente de parafinas con contenido de hidrocarburos no aromáticos y olefinas. Adicionalmente el combustible obtenido puede estar libre de Azufre y de Nitrógeno.

El índice de cetano del GAL diésel es más alto que el del diésel convencional, típicamente en el rango de 70 y 75, también se caracteriza por su bajo poder lubricante, y para que tenga propiedades de lubricidad debe ser tratado con un aditivo lubricante. Adicionalmente, tiene bajas propiedades en condiciones de congelación, limitando su uso en climas fríos. El GAL diésel es compatible con motores diseñados para diésel convencional, también puede ser mezclado con diésel convencional. Típicamente, GAL diésel puede provocar un menor nivel de emisiones de hidrocarburos sin quemar, monóxido de Carbono, óxidos de Nitrógeno, y de material particulado en comparación al diésel convencional, sin embargo en emisiones de CO₂ no ofrece ventajas.



2. INVENTARIO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES EN EL MERCADO PARA EL USO DE GAS COMBUSTIBLE AUTOMOTOR

Las tecnologías disponibles a nivel mundial para el uso de gas combustible en vehículos de trabajo liviano, mediano y pesado se enuncian a continuación:

2.1 VEHÍCULOS DEDICADOS

Son vehículos con motores fabricados para ser alimentados por un solo tipo de combustible. Los diferentes sistemas de este tipo de motores vienen diseñados para el funcionamiento en el combustible de alimentación, estos motores se denominan motores OEM o motores con equipamiento original por parte del proveedor.

La alimentación de los motores OEM puede ser

1. Gas Natural Seco: almacenado de forma comprimida, como Gas Natural Comprimido (GNC) o almacenado de forma líquida, Gas Natural Licuado (GNL). Se encuentra disponible en toda la gama de vehículos: automóviles ligeros (con almacenamiento GNC), vehículos de carga ligera (principalmente GNC), vehículos de carga mediana (principalmente GNC) y vehículos de carga pesada (principalmente GNL debido a su mayor autonomía, aunque también se encuentra disponible almacenamiento en GNC). El rango de volúmenes de desplazamiento de estos motores va desde los 1000 cc hasta los 12000 cc.
2. Gas Licuado de Petróleo: principalmente disponible en automóviles ligeros, vehículos de carga ligera y de carga media, los motores van de volúmenes de desplazamiento de 1000 cc hasta 8000 cc.
3. Diésel: cubre todo el rango de usos, aunque su uso principal es en vehículos de carga ligera, carga mediana y carga pesada. Las motorizaciones van desde los 1200 cc.
4. Gasolina: Principalmente viene en automóviles, vehículos de carga ligera y vehículos de carga mediana.



En la Tabla 9 se muestran los principales componentes de los sistemas que hacen parte de un motor OEM y la presencia de cada componente según la tecnología:

Tabla 9. Principales componentes de un motor dedicado a diésel, a gasolina, a GNC, a GNL y a GLP

Componentes		Tecnología				
		Diésel	Gasolina	GNC	GNL	GLP
Mecánicos	Bloque	X	X	X	X	X
	Culata	X	X	X	X	X
	Tapa Válvulas	X	X	X	X	X
	Árbol de Levas	X	X	X	X	X
	Válvulas	X	X	X	X	X
	Pistones	X	X	X	X	X
	Bielas	X	X	X	X	X
	Cigüeñal	X	X	X	X	X
	Filtro	X	X	X	X	X
Admisión	Turbo	X				
	Interenfriador	X				
	Múltiple de Admisión	X	X	X	X	X
	Sensor MAP		X	X	X	X
	Sensor Temperatura		X	X	X	X
	Sensor TPS		X	X	X	X
	Sensor IAC		X	X	X	X
	Sonda Lambda		X	X	X	X
Inyección de Combustible	Deposito Combustible	X	X		X	
	Tanque presurizado			X		X
	Filtro	X	X	X	X	X
	Bomba de inyección	X				
	Bomba en el depósito		X			
	Rieles	X	X			
	Inyectores	X	X	X	X	X
	Reductor de Presión			X		X
	Sensor Nivel			X	X	X



	Manómetro			X			X
				X		X	X
	Kit de Venteo			X		X	
	Electroválvula						X
	Multiválvulas						X
	Emulador de Combustión			X		X	X
	Mezclador			X			X
	Registro Manual			X			X
	Relés			X		X	X
	Variador Avance Chispa			X		X	
	Evaporador					X	
	Válvula de alivio			X		X	X
Eléctrico	Unidad de Control Electrónica	X	X	X	X	X	X
	Timer		X	X	X	X	X
	Bobinas		X	X	X	X	X
	Cableado		X	X	X	X	X
	Bujías		X	X	X	X	X

Fuente. Elaboración propia

Se puede ver la semejanza entre motores dedicados, los motores dedicados a gasolina tienen una mayor semejanza a los motores dedicados a GNC, GNL y GLP, con diferencias principalmente en el sistema de suministro, almacenamiento y control del combustible.

2.2 VEHÍCULOS DUALES

Un vehículo dual está conformado por un motor que trabaja con dos combustibles de forma simultánea. Se utiliza para hacer combustión de Gas Natural o Gas Licuado de Petróleo en motores encendidos por compresión. Funciona a partir del ingreso de gas y diésel a la cámara de combustión, el diésel actúa como iniciador de la mezcla entre diésel gas (ya que no existe una bujía ni un sistema de encendido externo de la mezcla).

Un vehículo dual puede operar de dos formas, con el suministro simultáneo de diésel y gas o con el suministro de solo diésel, para ello existe un sistema de conmutación.



Existen los siguientes kits disponibles en el mercado para la conversión de motores diésel a motores duales diésel – gas

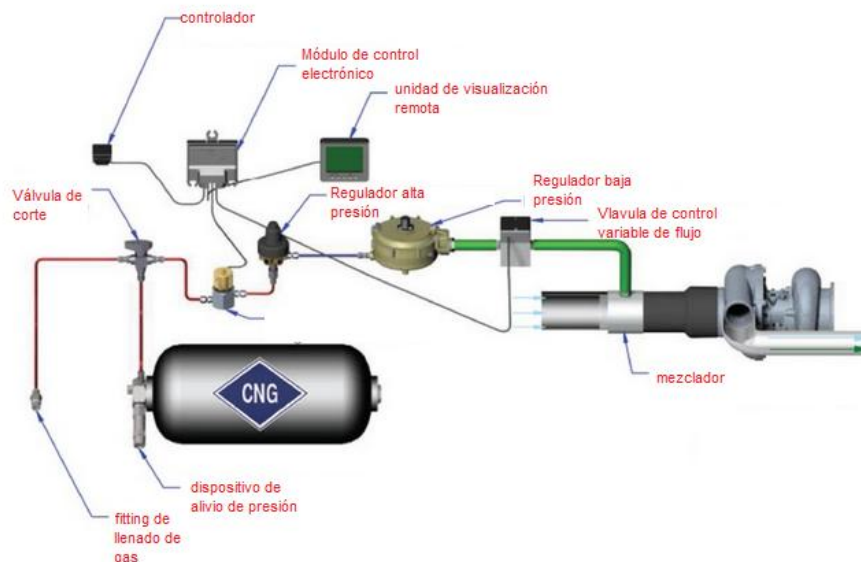
2.2.1 Conversión de diésel a dual diésel – Gas Natural (GNC o GNL) con un mezclador a la entrada del turbo – También llamado sistema de lazo abierto

Este tipo de sistema de conversión no modifica las partes mecánicas del motor, solamente interfiere en el tubo de admisión que es donde va ubicado el mezclador de gas y de aire. En el sistema de control si se regula la entrega de diésel por parte de la bomba de forma inversamente proporcional a la entrega de gas natural. Puede operar para Gas natural Comprimido o para Gas Natural Licuado según sea el sistema de almacenamiento de combustible.

Modificación mecánica a realizar en el motor para implementar el kit:

- Acople del mezclador de gas en el ducto de admisión

Figura 4. Componentes de un kit de conversión dual diésel-GNC o diésel-GNL con mezclador en la entrada del turbo



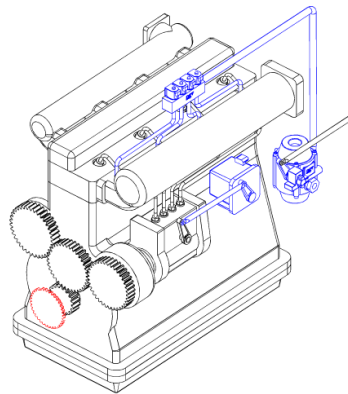
Fuente. American Power Group INC. <http://americanpowergroupinc.com/about-dual-fuel/how-apg-works-for-you> .
Consultada el 07 de julio de 2014



2.2.2 Conversión de diésel a dual diésel – Gas Natural (GNC o GNL)/GLP con un riel de inyectores en el múltiple de admisión – También llamado de lazo cerrado

En la Figura 5 se muestra un esquema de las modificaciones que se realizan a un motor diésel para la instalación de un kit de conversión dual diésel-GNC, diésel GNL o diésel-GLP, aplica para cualquiera de las tecnologías, debido a que lo que cambia entre ellas son los sistemas de almacenamiento, de suministro y de control, además del tipo de inyector.

Figura 5. Kit de conversión dual diésel-Gas con riel de inyectores



Fuente. NGV MOTORI, USA. http://www.ngvus.com/flash-movies/1_presentation.swf. revisada el lunes 7 de Julio de 2014

Por ejemplo, en la Figura 4 se especifican los componentes para un KIT completo de conversión dual diésel-GNC. Para otro tipo de almacenamiento cambia el tipo de inyector, el tanque de almacenamiento entre otros componentes necesarios para operación.

2.3 VEHÍCULOS TRANSFORMADOS

Un vehículo transformado es aquel donde se modifica el motor para cambiar su funcionamiento de un combustible a otro, sin poder operar nuevamente con el combustible que tenía inicialmente. Las conversiones que se encuentran en el mercado son de transformaciones de motores diésel a Gas Natural (En cualquiera de sus dos formas de almacenamiento, Comprimido GNC o licuado GNL), para transformaciones de motores diésel a Gas Licuado de Petróleo no hay disponibles sistemas de conversión en el mercado, aunque técnica y teóricamente es posible la transformación, ya que los componentes son muy similares a los de motores a gas natural.



Hay dos kits de transformaciones en motores encontradas en el mercado.

1. Transformación de un motor diésel a gas natural suprimiendo el turbo: Al suprimir el turbo se simplifica el control de la mezcla y la cantidad de modificaciones mecánicas a realizar en el motor, aunque la potencia baja debido a que la eficiencia volumétrica disminuye en comparación al vehículo diésel con turbo.
2. Transformación de un motor diésel a gas natural conservando el turbo: Tiene las modificaciones realizadas a la transformación sin turbo, tiene componentes adicionales como válvulas de control de flujo de aire a la salida del turbo y sensores de control de flujo que realimentan la unidad de control electrónica.

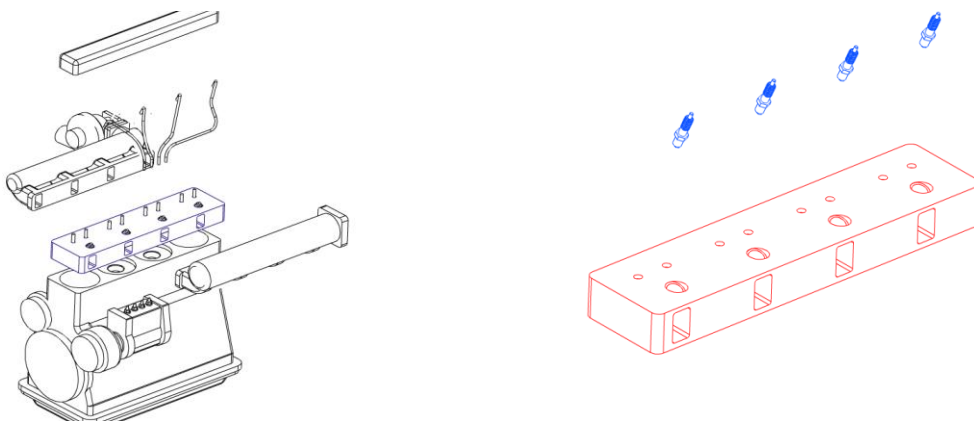
2.3.1 Transformación de un motor diésel a gas conservando el turbo

Esta transformación cambia los componentes de la inyección de diésel por unos componentes de inyección de gas, además cambia el tipo de ignición y el principio de funcionamiento del motor de un ciclo diésel (encendido por compresión) a un ciclo Otto (encendido por chispa). Por último cambia el sistema de control de la combustión, incluyendo sensores y demás componentes de control relacionados a motores de inyección dedicados a Ciclo Otto. A continuación se muestran las modificaciones que se debe realizar para cada uno de los sistemas que componen el motor a ser modificado:

1. Modificación de la culata

Se retira todo el sistema de inyección de diésel del motor. En la culata se retiran los inyectores y se maquina cada agujero para incluir una bujía para cada cilindro, ver Figura 6:

Figura 6. Modificación de la culata

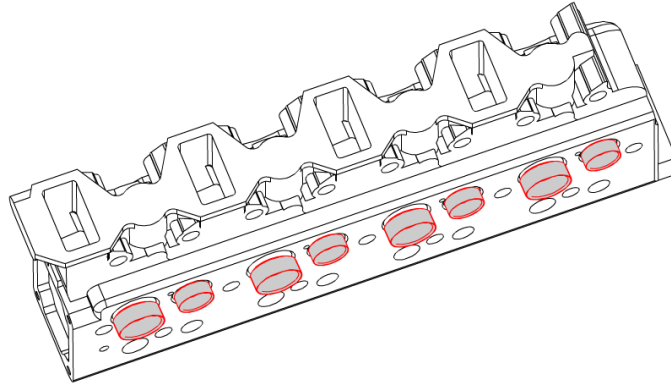


Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/1.swf> página revisada el 07 de julio de 2014



2. Cambio de los sellos de las válvulas, ver Figura 7.

Figura 7. Cambio de los sellos de las válvulas

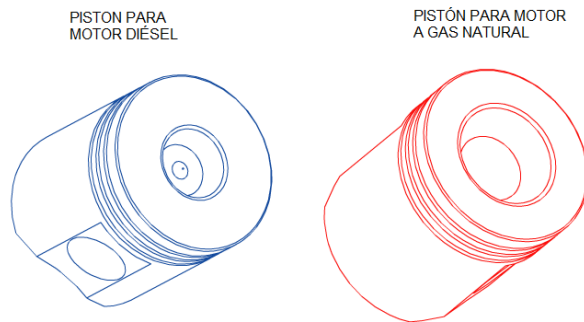


Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/2.swf> página revisada el 07 de julio de 2014

3. Modificación de los pistones

Se retiran los pistones y se maquinan o se cambian para disminuir la relación de compresión del motor y evitar así fenómenos como autodedonación (knock), ver Figura 8:

Figura 8. Modificación de los pistones



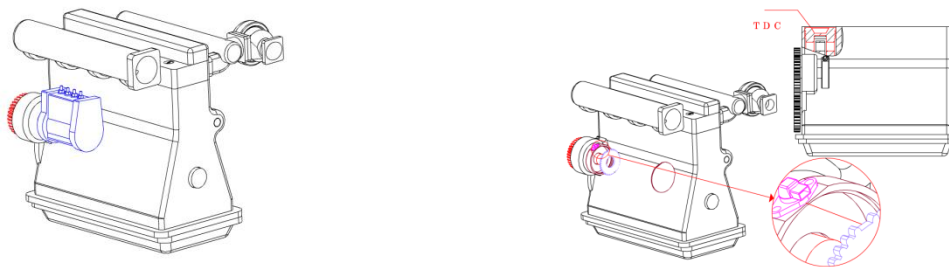
Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/2.swf> página revisada el 07 de julio de 2014



4. Instalación de rueda dentada

Al retirar la bomba de inyección de diésel se instala una rueda dentada con el fin de ubicar el sensor de posición del cigüeñal (Sensor TDC o de punto muerto superior), con el fin de determinar el punto muerto superior de cada cilindro y programar el inicio de la chispa por cada una de las bujías, ver Figura 9:

Figura 9. Instalación de rueda dentada



Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/4.swf> página revisada el 07 de julio de 2014

5. Instalación del cuerpo de aceleración

En el múltiple de admisión, se instala el cuerpo de aceleración compuesto por la válvula de control manual de flujo de aire, controlada desde el pedal de aceleración (también llamada mariposa), adicionalmente tiene dos sensores, uno es el sensor de posición de aceleración (Sensor TPS) y el otro el sensor de marcha mínima (Sensor IAC), ver Figura 10:

Figura 10. Instalación del cuerpo de aceleración



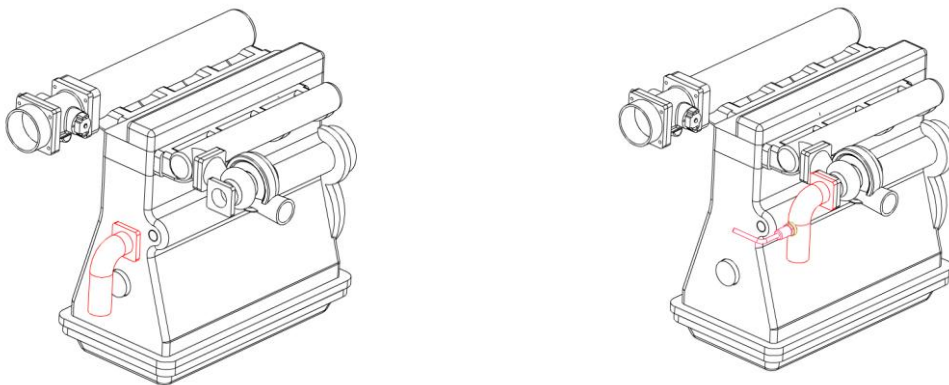
Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/5.swf> página revisada el 07 de julio de 2014



6. Instalación del sensor Lambda

Se modifica el tubo de salida de la turbina caliente para la instalación del sensor Lambda, o también llamado sensor de oxígeno, es el que regula el paso de combustible a partir de la determinación de una mezcla rica o pobre como producto de la combustión, ver Figura 11.

Figura 11. Instalación del sensor Lambda

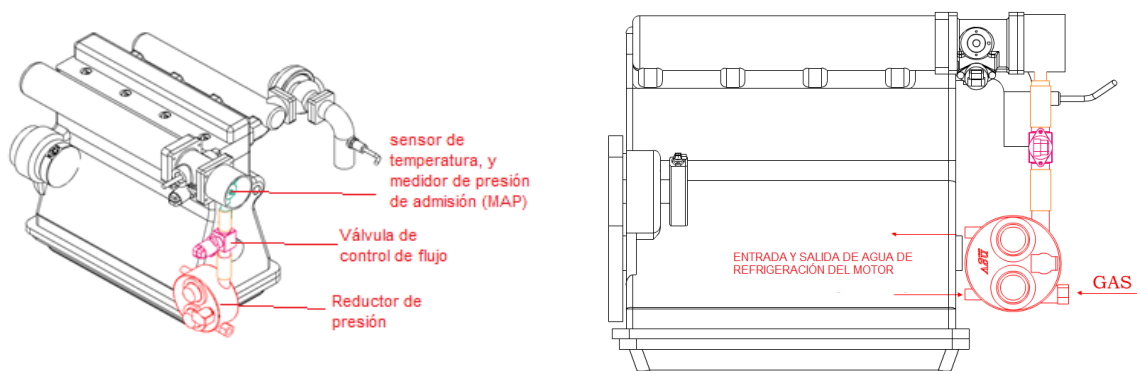


Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/6.swf> página revisada el 07 de julio de 2014

7. Instalación del sistema de suministro de gas parte 1

Se instala el reductor de presión, la válvula de control de flujo y el mezclador de gas-aire, adicionalmente se instala la línea de refrigeración del reductor de presión, el cual se refrigera con el agua proveniente del sistema de refrigeración del motor, ver Figura 12:

Figura 12. Instalación del sistema de suministro de gas parte 1



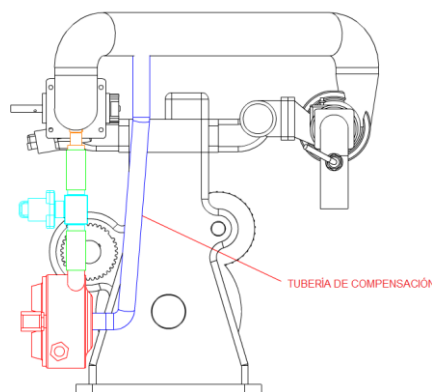
Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/7.swf> página revisada el 07 de julio de 2014



8. Sistema de suministro de gas

Se instala una línea tubular que va desde el regulador de presión hasta la tubería de admisión de aire, adicionalmente se adecúa la tubería de entrada de aire al cuerpo de aceleración, ver Figura 13.

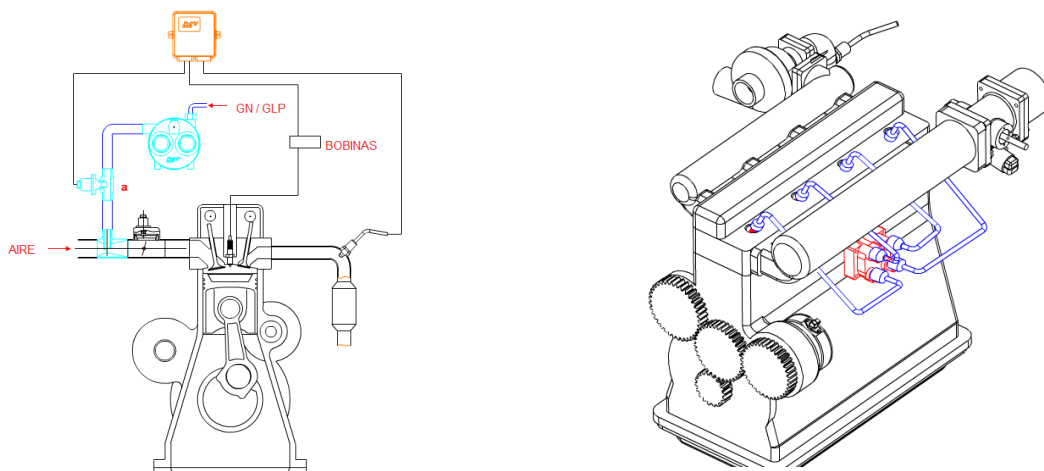
Figura 13. Sistema de suministro de gas



Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/1.swf> página revisada el 07 de julio de 2014

9. Instalación eléctrica de la válvula de control de flujo, del sensor lambda, bujías, instalación de alta y bobinas, todo hacia la ECU, ver Figura 14.

Figura 14. Instalación eléctrica de la válvula de control de flujo, del sensor lambda, bujías, instalación de alta y bobinas, todo hacia la ECU



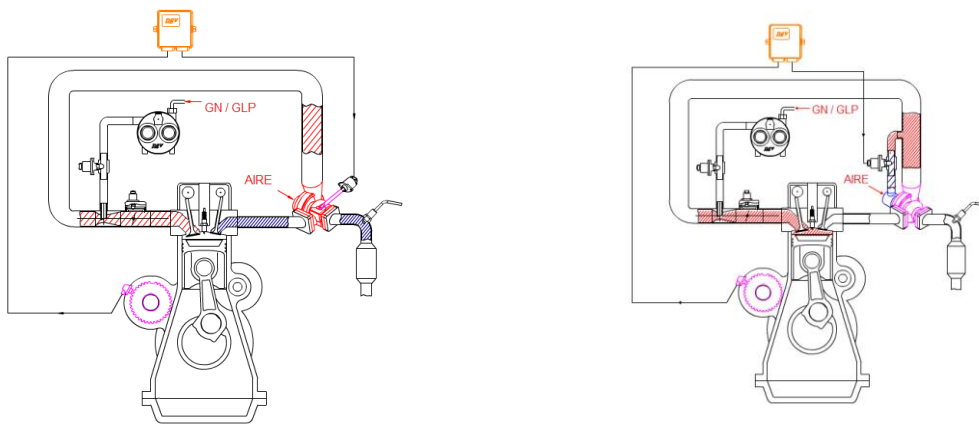
Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/1.swf> página revisada el 07 de julio de 2014



10. Instalación de válvulas de control del flujo de aire de entrada del turbo

A partir de dichas válvulas se controla la apertura según la diferencia de presión en cada una de las líneas (admisión antes de la hélice y después de la hélice, escape antes y después de la hélice, ver Figura 15.

Figura 15. Instalación de válvulas de control del flujo de aire de entrada del turbo

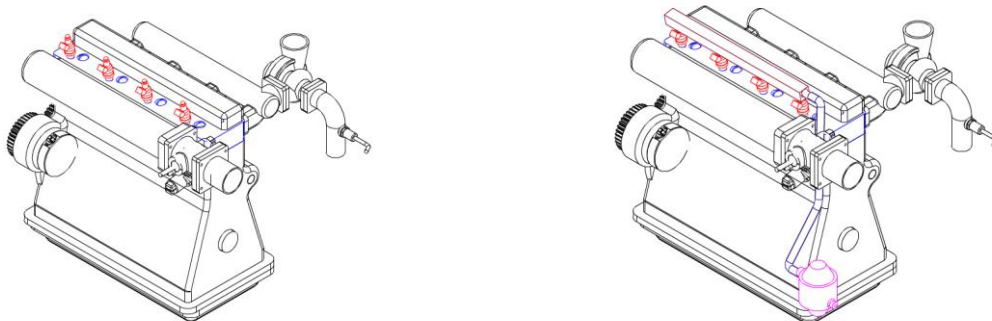


Fuente. NGV MOTORI, USA. <http://www.ngvus.com/flash-movies/8.1.swf> - <http://www.ngvus.com/flash-movies/8.2.swf> página revisada el 07 de julio de 2014

11. Instalación de inyectores de gas

Para la instalación de inyectores de gas, se debe maquinar la culata del motor a la medida de los inyectores, adicionalmente los inyectores van conectados a un riel común, ver Figura 16:

Figura 16. Instalación de inyectores de gas



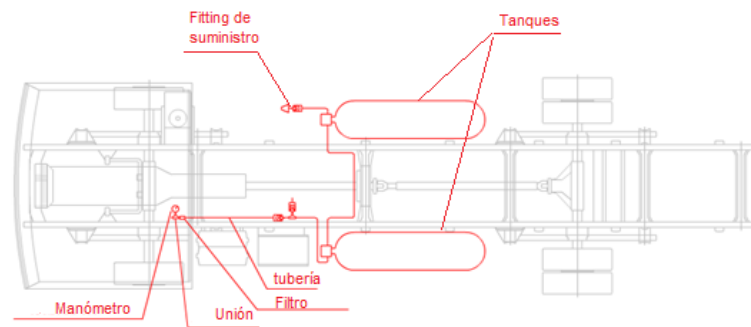
Fuente. NGV MOTORI, USA. http://www.ngvus.com/flash-movies/12_1.swf página revisada el 07 de julio de 2014



12. Instalación del sistema de suministro de gas

En la Figura 17 se muestra la instalación de suministro de Gas Natural Comprimido, también puede realizarse la instalación para Gas Natural Licuado cambiando el tanque de almacenamiento e incluyendo un evaporador:

Figura 17. Instalación del sistema de suministro de gas



Fuente. NGV MOTORI, USA. http://www.ngvus.com/flash-movies/13_1.swf página revisada el 07 de julio de 2014

2.3.2 Transformación de un motor diésel a Gas Natural GNC/GNL suprimiendo el turbo

Al igual que en el caso anterior, este sistema modifica el principio de funcionamiento del motor pasándolo de un ciclo de encendido por compresión (ciclo diésel) a un ciclo de encendido por chispa (ciclo de Otto)

Para ello se realizan los pasos anteriores:

- Se suprime el sistema de suministro de combustible, cambiando el tanque, las líneas de suministro la bomba de inyección y los inyectores diésel
- Se implementa un nuevo sistema de suministro de gas, puede ser Gas Natural Comprimido, Gas Natural Licuado o Gas Licuado de Petróleo
- Se hacen modificaciones mecánicas para incluir sensores y actuadores (Modificaciones en la culata para incluir las bujías e inyectores, maquinado de los pistones, para disminuir la relación de compresión)
- Se implementa la parte eléctrica (inyectores, bujías, bobina)
- Se cambia todo el sistema de control del suministro de combustible (Unidad de Control Electrónica, implementación de sensores, cuerpo de aceleración)



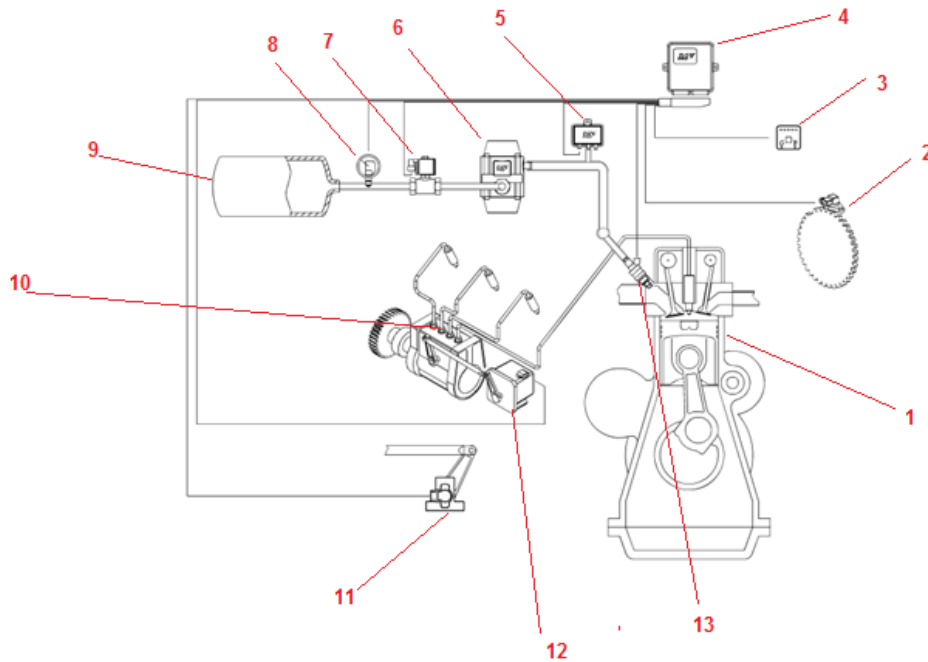
- La diferencia radica en que se suprime el turbo y el control de la inyección se hace a partir de un sensor medidor de presión en la admisión (llamado sensor MAP).

Las partes que componen el kit se enuncian a continuación:

- Sistema de manejo de encendido: Maneja el suministro de gas y el tiempo de encendido del motor. Ofrece auto diagnóstico OBD y comunicación CAN
- Unidad de control del avance del encendido: Tiene el control del knock, y ,manejo de mezcla pobre o estequiométrica
- Inyector electrónico de gas natural: Hay de flujo medio y de alto flujo
- Módulo de inyección de gas: Es donde van ubicados los inyectores y suministra el gas a cada uno de ellos. Hay en configuraciones de riel, cilíndrica, entre otras
- Regulador de presión del Gas natural: El suministro a la salida está entre 3 y 5 bar de presión, para vehículos de carga pesada los reguladores son de alto flujo.
- Cuerpo de aceleración: Compuesto por la válvula reguladora de aire (mariposa) sensor de posición de aceleración y sensor de control de marcha mínima. Hay dos versiones, uno electrónico, el cuál mueve la mariposa con un servomotor, otro mecánico que mueve la mariposa con una guaya
- Pedal de medición electrónica de aceleración: Mide la posición del pedal y a partir de la señal controla la mariposa en el cuerpo de aceleración electrónico, además limita la velocidad angular del motor.
- Mezclador para gas natural y GLP
- Motor de suministro de gas “paso a paso”, puede tener regulación manual o electrónica.
- Solenoide de corte de suministro de gas
- Sistema de control de lazo cerrado para GNC y GLP.
- Bobina de alimentación: Da energía a las bujías para el inicio de la chispa
- Bujías para aplicaciones en gas natural: Comúnmente utilizadas bujías de tres electrodos.
- Filtro de gas.



Figura 18. Componentes de un kit de conversión Dual Diésel-GNC con riel de inyectores en el múltiple de admisión



1. Motor encendido por compresión de inyección directa
2. Sensor de rpm, sensor de knock (posición de punto muerto superior)
3. Sensor de nivel de gas e interruptor dual
4. Unidad Central Electrónica
5. Sensores de temperatura del aire, de temperatura del gas y de temperatura del agua de refrigeración.
6. Reductor de presión
7. Válvula de seguridad
8. Manómetro
9. Cilindro de gas natural comprimido
10. Bomba de inyección de diésel
11. Sistema de posición del acelerador
12. Actuador electromecánico de la bomba de inyección
13. Inyectores de gas

Fuente. NGV MOTORI. Dual Components. http://www.ngvus.com/flash-movies/2_1_components.swf. revisada el lunes 7 de Julio de 2014



Modificaciones mecánicas a realizar en el motor para implementar el kit:

- Maquinado del múltiple de admisión para ubicación de los inyectores
- Cambio en el sistema de refrigeración para incluir el reductor de presión en el sistema (El reductor de presión va refrigerado por agua.
- Adición de rueda dentada a la parte frontal del motor para instalar el sensor de rpm y de knock.
- Modificación en el pedal del acelerador para incluir el sistema de medición de posición de aceleración.
- Instalación en la bomba de inyección de diésel un actuador electromecánico para el control del flujo.

2.4 VEHÍCULOS BICOMBUSTIBLES

Un vehículo bicomcombustible es aquel en el que se instala un sistema de suministro de combustible adicional al existente y el motor puede trabajar con cualquiera de los dos sistemas de forma independiente. En el mercado se encuentran únicamente sistemas de conversión de motores dedicados a gasolina a motores bicomcombustibles gasolina-gas natural o gasolina-GLP, para vehículos con motores diésel no se encuentran sistemas de conversión bicomcombustible diésel-gas, debido a que el principio de operación entre ellos es completamente diferente y no puede ser conmutado de forma completa.

Los sistemas de conversión bicomcombustible dependen del tipo de sistema de inyección de combustible con que cuenta el vehículo en su forma dedicada. A continuación se enuncian los componentes de los kits de conversión bicomcombustible según el sistema de inyección. Con respecto al sistema de suministro del segundo combustible, está dado principalmente por Gas Natural Comprimido y Gas Licuado de Petróleo (implementado en vehículos de carga mediana y carga ligera, hasta 8000 cc). La implementación de sistema de almacenamiento de Gas Natural Licuado para vehículos bicomcombustible técnicamente es posible pero en el mercado predominan los kits de conversión bicomcombustible gasolina-GNC y gasolina-GLP.



En la Tabla 10 se presentan los principales componentes de los sistemas de conversión bicomcombustible de acuerdo al sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GNC:

Tabla 10. Sistema de conversión bicomcombustible según el sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GNC

Para aplicaciones en sistemas GNC	
1. Sistema GNC secuencial	
-	Reductor de presión
-	Sensor de nivel
-	Tubería
-	Unidad de Control electrónica
-	Válvula de carga
-	Kit de venteo
-	Solenoides
-	Variador del avance de la chispa
-	Sensor Sonda Lambda
2. Sistema GNC inyección	
-	Reductor de presión
-	Sensor de nivel
-	Manómetro
-	Tubería
-	Unidad de Control electrónica
-	Válvula de carga
-	Kit de venteo
-	Solenoides
-	Emulador de la combustión
-	Mezclador
-	Registro manual
-	Relés
-	Variador del avance de la chispa
3. Sistema GNC Carburador	
-	Reductor de presión
-	Indicador de nivel
-	Manómetro
-	Tubería
-	Válvula de carga
-	Kit de venteo
-	Electroválvula de control de flujo de gasolina
-	Mezclador
-	Solenoides
-	Registro manual
-	Variador del avance de la chispa
4. Sistema GNC Catalizado	



Para aplicaciones en sistemas GNC
- Reductor de presión
- Manómetro
- Tubería
- Válvula de carga
- Kit de venteo
- Unidad de Control electrónica
- Mezclador
- Solenoides
- Sensor sonda Lambda
- Emulador OBD
- Variador del avance de la chispa

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 11 se presentan los principales componentes de los sistemas de conversión bicomcombustible de acuerdo al sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GLP:

Tabla 11. Sistemas de conversión bicomcombustible según el sistema de inyección del vehículo para aplicaciones en sistemas GLP

Para aplicaciones en sistemas GLP
1. Sistema GLP Catalizado
- Reductor de presión
- Manómetro
- Tubería
- Válvula de carga
- Kit de venteo
- Unidad de Control electrónica
- Mezclador
- Electroválvula de GLP
- Sensor sonda Lambda
- Multiválvula
- Emulador OBD
2. Sistema GLP Carburador



Para aplicaciones en sistemas GLP

- Reductor de presión
- Indicador de nivel
- Manómetro
- Tubería
- Válvula de carga
- Electroválvula gasolina
- Kits de venteo
- Mezclador
- Electroválvula GLP
- Registro manual
- Multiválvula

3. Sistema GLP inyección

- Reductor de presión
- Indicador de nivel
- Manómetro
- Tubería
- Unidad de Control electrónica
- Válvula de carga
- Kit de venteo
- Electroválvula GLP
- Multiválvula
- Emulador de la combustión
- Mezclador
- Registro manual
- Relés

4. Sistema LGP secuencial

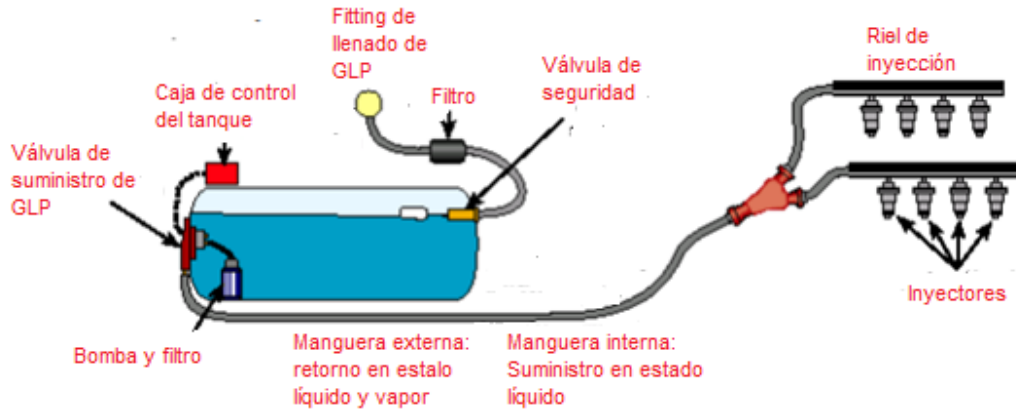
- Reductor de presión
- Manómetro
- Tubería
- Válvula de carga
- Kit de venteo
- Unidad de Control Electrónico
- Electroválvula GLP
- Sensor sonda lambda
- Multiválvula

Fuente. Elaboración propia



En la Figura 19 se muestra el sistema de almacenamiento del Gas Licuado de Petróleo:

Figura 19. Sistema de almacenamiento de GLP



Fuente. BIPHASE TECHNOLOGIES. Liquid propane fuel injection – General Diagnostic Manual. 2014: Pg 12.



3. COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE COMBUSTIBLES

En la Tabla 12 se muestra una comparación en las propiedades fisicoquímicas generales de cuatro combustibles (GNC, GLP, gasolina y diésel N°2), se toma como referencia combustibles puros es decir compuestos únicamente por hidrocarburos. Los valores de las propiedades para los combustibles en Colombia pueden cambiar según el yacimiento y la cantidad de impurezas que contengan. En el capítulo 5.4 se especifican la composición y las propiedades del gas natural para Colombia y en el capítulo 5.5 se especifican la composición y las propiedades del gas licuado de petróleo.

Tabla 12. Propiedades físico-químicas de los combustibles

Propiedades físico-químicas de los combustibles					
Propiedad	Unidades (Sistema inglés - Sistema internacional)	GNC CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas) CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas)	GLP C3 (liquido)	Gasolina C4-C12 (liquido)	Diésel N°2 C8-C25 (liquido)
Punto de Fusión	°F	-296	-305.8	-40	-40 a -30
	°C ^a	-182	-188	-40	-40 a -35
Punto de Ebullición	°F	-259	-44	80 – 437	356–644
	°C ^a	-162	-42	27 - 225	174 - 340
Gravedad Específica Densidad		0.424	0.508	0.72 - 0.78	0.85
	lb/gal @60°F	1.07	4.22	6 -6.5	6.7 – 7.4
	gr/cm3 @15,5°C ^b	0.128	0.506	0.719 - 0.779	0.8 - 0.886
Viscosidad din. @ -4°F (-20°C)	cP	–	–	0.6 - 0.77	9.7 - 17.6
Viscosidad cinem @ -4°F (-20°C)	cSt	–	–	0.8 - 1.0	9 - 24
Viscosidad din. @ 68°F (20°C)	cP	–	–	0.37 – 0.44	2.6 - 4.1
Viscosidad cinem @ 68°F (20°C)	cSt	–	–	0.5 – 0.6	5
Viscosidad din. @ 104°F (40°C)	cP	–	–	–	–
Viscosidad cinem @ 104°F (40°C)	cSt	–	–	–	1.3 - 4.1
Calor Específico	Btu/lb °F	0.39 - 0.45	4.2	0.48	0.43
	kJ/(kg °C) ^c	1.632 - 1.883	17.573	2.008	1.799
Conductividad Térmica	Btu/hr ft °F	0.17	0.075	0.087	0.081 - 0.087
	W/(m K) ^d	0.294	0.130	0.151	0.14 - 0.151
Calor Latente de Vaporización	Btu/gal @ 60°F (15.6°C)	785 ^d	775	900	710



Propiedades físico-químicas de los combustibles					
Propiedad	Unidades (Sistema inglés - Sistema internacional)	GNC	GLP	Gasolina	Diésel N°2
		CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas) CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas)	C3 (liquido)	C4-C12 (liquido)	C8-C25 (liquido)
Poder Calórico Inferior	kJ/litro @60 °F (15.6°C) ^e	218.8	216.0	250.9	197.9
	Btu/lb @ 60°F (15.6°C)	219	193.1	150	100
	kJ/kg @60 °F (15.6°C) ^k	509.394	449.1506	348.9	232.6
Poder Calórico Inferior	Btu/gal @60 °F (15.6°C)	74720	84950	116090	128450
	kJ/litro @60 °F (15.6°C) ^e	5649.6	23679.5	32359.7	35805.0
	Btu/lb @60 °F (15.6°C)	20268.0	19900.0	18676.0	18394.0
Calor de Combustión	kJ/kg @60 °F (15.6°C) ^f	47131.738	46287.4	43440.376	42784.444
	Btu/lb	23000	21500	20000	20700
	kJ/kg ^g	53498	50009	46520	48148.2
Punto de Inflamación	°F	-300	-156	-45	140 - 176
	°C ^a	-184	-104	-43	60-80
Temperatura de Autoencendido	°F	900 – 1170	842	495	600
	°C ^a	482 - 632	450	257	315.56
Límite inferior de inflamabilidad	(v/v %)	5.3	2.2	1.4	1
Límite superior de inflamabilidad	(v/v %)	15	9.5	7.6	6
Rango de inflamabilidad	(v/v %)	9.7	7.3	6.2	5
Relación Aire-Combustible	(w/w)	17.2	15.7	14.7	14.7
Velocidad de propagación de Llama	(ft/s)	1.48	1.48	1.12	–
	(m/s)	0.451104	0.451104	0.341376	–
Energía mínima de Inflamación	mJ	0.3	0.26	0.29	0.23
Temperatura de Llama Adiabática	°F	3542	3610	3525	–
	°C ^a	1950	1988	1941	–
Temperatura de Llama	°F	3542	3497	3686	–
	°C ^a	1950	1925	2030	–
Número de cetano		-	-	-	45
Número de octano		120	105	84 – 93	–
Galones de diésel equivalente (GDE) ^g	Gal diésel/ gal combustible	0.157789023	0.661346 828	0.90377578 8	1



Propiedades físico-químicas de los combustibles					
Propiedad	Unidades (Sistema inglés - Sistema internacional)	GNC	GLP	Gasolina	Diésel N°2
		CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas)	C3 (liquido)	C4-C12 (liquido)	C8-C25 (liquido)
		CH4 83-99%; C2H6 1-13% (gas)			
1 galón diésel equivale a ^h		6.337576 gal/gnc	1.512065 921 gal/glp	1.10646911 9	1

^a Conversión de °F a °C a partir de la relación $^{\circ}C = (^{\circ}F - 32) * 5/9$
^b Factor de conversión de densidad utilizado para pasar de lb/gal a gr/cm³: 1 gr/cm³ = 0.119826427 lb/gal
^c Factor de conversión utilizado para pasar de Btu/lb °F a kJ/(kg °C): 1 Btu/lb °F = 4.184 kJ/(kg °C)
^d Factor de conversión utilizado para pasar de Btu/hr ft °F a W/(m K): 1 Btu/hr ft °F = 1.730734666371 W/(m K)
^e Factor de conversión utilizado para pasar de Btu/gal a kJ/litro: 1 Btu/gal = 0.27874659 kJ/litro
^f Factor de conversión utilizado para pasar de Btu/lb a kJ/kg: 1 Btu/lb = 2.326 kJ/kg
^g Galón de diésel equivalente hallado a partir del poder calorífico inferior
^h Equivalencia dada por la relación 1 galón diésel = 1/GDE

Fuente. [http://www.methanol.org/Health-And-Safety/Technical-Bulletins/Technical-Bulletins/UsingPhysicalandChemicalPropertiestoManageFlam-\(1\).aspx](http://www.methanol.org/Health-And-Safety/Technical-Bulletins/Technical-Bulletins/UsingPhysicalandChemicalPropertiestoManageFlam-(1).aspx). Revisado el 03 de Julio de 2014
 Fuente. http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html Revisado el 03 de Julio de 2014
 Fuente. http://www.patioheat.com/lp_gas.htm Revisado el 03 de Julio de 2014
 Fuente. <http://www.aspenyacp.org/files/gas.pdf> Revisado el 03 de Julio de 2014
 Fuente. http://www.afdc.energy.gov/fuels/fuel_comparison_chart.pdf Revisado el 03 de Julio de 2014
 Fuente. <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=129&conID=36290&pagID=127465> revisado el 13 de julio de 2014

3.1 DENSIDAD

La densidad del gas natural es menor a la densidad del aire haciendo que a condiciones ambiente, el gas natural suba a la atmósfera y se disperse rápidamente, haciendo que sea un combustible seguro.

3.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Los cuatro combustibles tienen una gravedad específica inferior a 1, por tanto para los combustibles líquidos, la densidad del combustible es menor a la del agua, y para combustible gaseoso la densidad es menor que la del aire. En el caso de los combustibles líquidos los valores de gravedad específica hacen que el agua quede debajo de los tanques facilitando la purga en el sistema.



3.3 INFLAMABILIDAD

El rango de inflamabilidad del gas natural está entre 5% y 15%, es decir que a una concentración menor de 5% de gas natural en aire o a una concentración mayor de 15% en aire, no es inflamable. Para el diésel el rango de inflamabilidad es de 1% a 6%. A partir de este parámetro se calcula la mezcla de gas en los sistemas de conversión de combustible, adicionalmente, es un parámetro que da los límites en los cuales el combustible es seguro al ser almacenado.

3.4 OCTANAJE Y NÚMERO DE CETANO

El gas tiene un octanaje mayor que al de la gasolina, por tanto, un motor se puede llevar a una relación de compresión mayor sin que ocurra knock en los cilindros, la relación puede aumentarse a 1:13. En motores diésel, la relación de compresión es mayor a la requerida por vehículos a gas, por tanto al realizar una conversión de 100% diésel a 100% gas se debe disminuir la relación de compresión a un valor igual o inferior al permisible para gas natural, en vehículos con conversión dual no es necesario bajar la relación de compresión. Para el diésel se mide su poder de autoignición a partir del índice de cetano, un bajo número de cetano del diésel implica que el retardo de la ignición del diésel aumenta, es decir que el tiempo entre el comienzo de la inyección y el comienzo de la combustión se incrementa. Para Colombia, el índice de cetano del diésel tiene un valor mínimo de 45, los motores están diseñados para trabajar con diésel de número de cetano entre 40 y 55 (o mayores), por tanto Colombia cumple el valor mínimo aunque está por debajo de países como Estados Unidos, México y Japón que tienen diésel con índices de cetano de 48, 53 y 53 respectivamente.

3.5 PUNTO DE EBULLICIÓN

El punto de ebullición del gas natural es de -162°C , por tanto representa una desventaja en comparación a los demás combustibles cuando se almacena de forma líquida como gas natural licuado GNL, ya que se necesita una cadena criogénica para su suministro y almacenamiento en los vehículos.



3.6 PUNTO DE INFLAMACIÓN

El punto de inflamación del diésel está entre 60 y 80°C, en los otros combustibles están a temperaturas bajo cero, esto hace que el diésel no se encienda a temperatura ambiente cuando hay una fuente de ignición como una chispa, caso contrario de los demás, en los que pueden encenderse con chispa u otra fuente a temperatura ambiente y presión atmosférica

3.7 RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

La relación aire combustible estequiométrica para el gas natural es 17.2:1 (puede variar dependiendo de la cantidad de cada uno de los alcanos), mientras que para la gasolina y para el diésel es de 14.7:1, esto significa que se necesita más aire para quemar 1kg de gas natural que para quemar uno de gasolina o diésel, al momento de una conversión a gas natural, el volumen del motor permanece constante, para ese volumen constante se necesita menos gas en comparación al requerimiento en gasolina o diésel, causando una disminución en potencia debido a que la eficiencia volumétrica baja.

Para controlar la disminución en potencia debido a la relación aire combustible alta, se puede mantener la eficiencia volumétrica a partir de un sistema de admisión turbocargado o comprimido. Para el caso de conversión de motores diésel a motores dual o a motores 100% gas se recomienda el kit que conserva el turbocargador en el sistema. Cuando el gas natural tiene hidrocarburos pesados como propano o butano el control sobre la relación aire/combustible se hace más difícil, además su resistencia al knock disminuye.

3.8 TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO

Para el gas natural y el gas propano, la temperatura de auto encendido es mucho mayor a la del diésel y la gasolina, esto causa que para conversiones a 100% gas o a combustible dual, la temperatura del motor aumente, requiriendo en muchos casos el aumento de la capacidad del sistema de refrigeración del motor.



3.9 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA

La velocidad de propagación de llama para el gas natural es cercana a 0.45 m/s, es más lenta que la velocidad de propagación de la gasolina, 0.85 m/s, esto significa que el gas natural se quema más lento que la gasolina. Para controlar esto se adelanta la chispa, al no adelantarse la chispa ocurren dos fenómenos, el primero es que aumentan los componentes de una combustión incompleta como son hidrocarburos sin quemar y CO, el segundo es que la potencia disminuye considerablemente porque el pico de combustión se realiza a un punto más lejano del punto muerto superior de los pistones.

3.10 VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad que sirve en el diseño de las tuberías y de los ductos por donde pasa el combustible, por ejemplo los inyectores, a partir de esto se evidencia diferencias entre los inyectores de cada tipo de combustible.

En todos los casos el diésel tiene una mejor capacidad de almacenamiento, el que tiene mayor desventaja es el gas natural, causando un aumento en requerimientos de espacio de 6 veces el volumen requerido por el diésel, disminuyendo la capacidad de carga de un vehículo o su autonomía.



4. COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE TECNOLOGÍAS

La comparación técnica entre tecnologías se realiza a partir de la recopilación de información referente a estudios realizados a cada una de las tecnologías de motores a gas aplicado en el sector transporte, la comparación se subdivide en tres características:

1. Consumo de combustible o consumo energético para vehículos híbridos y vehículos eléctricos
2. Emisiones de gases
 - Monóxido de Carbono (CO)
 - Dióxido de carbono (CO₂)
 - Óxidos de nitrógeno (Denotados como NO_x): conformados principalmente por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂)
 - Material particulado (MP)
3. Rendimiento
 - Potencia
 - Torque
 - Peso vehicular
 - Autonomía.
 - Eficiencia térmica



4.1 COMPARACIÓN DE CONSUMOS DE COMBUSTIBLE

4.1.1 Comparación de consumo de combustible entre bus dedicado a gas natural EURO VI¹, y buses diésel Euro V y diésel Euro IV en Colombia²

En un estudio realizado en Bogotá por el Grupo de Investigación de Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente (GICAEPMA), se halló el consumo de gas para un vehículo dedicado a Gas Natural Comprimido, en la Tabla 13 se comparan los valores obtenidos en dicho estudio con los valores de consumo obtenidos en un estudio anterior a vehículos diésel en la ciudad de Bogotá.

Tabla 13. Consumo de combustible para buses diésel en comparación a un bus dedicado a gas natural comprimido

Vehículo (Referencia usada en el estudio – tecnología)	Consumo (gal/100 km)	Peso real (kg)	Consumo específico (gal/ton)
ECH-D-SCR-1 – DIÉSEL	10.32	16780	0.615
EC-D-SCR-1 – DIÉSEL	16.99	17310	0.982
EC-D-SCR-2 – DIÉSEL	14.49	16620	0.872
EC-D-EGR-1 – DIESEL	14.52	16020	0.906
<i>K340 – GAS NATURAL</i>	16.65*	21720	0.767

*En Galones de diésel equivalentes

Fuente. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GICAEPMA, 2014. Secretaría Distrital de Ambiente – Universidad Nacional de Colombia. 2013

Para comparar los consumos a partir de capacidades de carga diferentes entre vehículos, se utiliza un concepto llamado consumo específico, que es el consumo que tiene el vehículo para mover una tonelada de su propio peso. A partir de esto se evidencia un valor de consumo

¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente. Pruebas de validación, eficiencia energética y emisiones contaminantes sobre vehículo dedicado a combustible gas natural euro 6 SCANIA. Realizado para Scania Colombia/ Gas Natural Fenosa SA ESP. 2014.

² CONVENIO 013 DE 2013. Secretaría Distrital de Ambiente y Universidad Nacional de Colombia, 2013



específico por parte del vehículo dedicado a gas inferior a la media de consumos de los vehículos a diésel (valor medio de consumo de diésel = 0.843 gal/ton)

4.1.2 Comparación de consumo entre vehículo dedicado diésel y vehículo dedicado GNC OEM

En un estudio de medición de combustible en autobuses de la ciudad de Nueva York se tomó un vehículo con motor Detroit diésel Corp. DDC Serie 50 y uno DDC serie 50G, dedicado a diésel y dedicado a gas natural comprimido respectivamente, y se midió el consumo de combustible durante un año de operación. El consumo del bus dedicado a gas natural fue 37% mayor que el consumo del bus en diésel en condiciones similares de trabajo (R. Barnit, 2008), vale la pena resaltar que el consumo de combustible aumenta cuando el vehículo recorre una menor distancia por cada galón consumido. Los consumos fueron de 1.7 millas/galón de diésel equivalente para el dedicado a gas y 2.33 millas/galón para el dedicado a diésel. El bus a gas era modelo 2000 y el bus a diésel era modelo 1999.

Tabla 14. Consumo vehículo dedicado a gas y dedicado a diésel de características similares

Marca	Tipo	Descripción del vehículo y pruebas	Características técnicas	Consumo de combustible
Marca – Línea – Año y referencia de motor utilizado	Diésel - Dual OEM - Dual convertido - GN dedicado - GN transformado - híbrido - eléctrico	Sistema de control de emisiones, tipo de prueba realizada, ciudad, etc.	Potencia, torque, Volumen de desplazamiento, Peso, Capacidad del tanque	En millas por galón en dedicado a diésel y en millas por galón de diésel equivalente en dedicado a gas.
Bus GNC 260 ORION VII de piso bajo - 2002 – Motor DDC serie 50G ^a	GNC OEM	Los buses sin kit opcional de control de emisiones (catalizador). Prueba de consumo tomada a partir de los tanqueos y recorridos realizados durante un año	275 bhp@2100 rpm 890 lb ft@1200 rpm 8.5 L 31400 lb en vacío 100 gal de capacidad	1.70 millas/galón de diésel equivalente evaluado en un año
Bus diésel ORION V de piso alto – 1999 - Motor DDC serie 50 ^a	Diésel	Instalación de Filtros de partículas post venta. Prueba de consumo realizada a partir de los tanqueos y recorridos realizados durante un año	275 bhp@2100 rpm 900 lb ft@1200 rpm 8.5 L 31400 lb en vacío 100 galones de capacidad	2.33 millas/galón evaluado en un año

Fuente. NREL. 2008 Elaboración propia



4.1.3 Comparación de consumo en un motor operado en diésel y en dual diésel – gas natural

En un estudio de comparación en rendimiento y emisiones de un motor en banco de pruebas operado a 100% diésel y de forma dual diésel – GNL (Cheekachorn, 2013), se realizaron pruebas de consumo de combustible, de emisiones de gases y de rendimiento como son torque, potencia, eficiencia térmica y eficiencia volumétrica. Las pruebas realizadas fueron a carga máxima para todo el régimen de operación del motor (desde 1000 rpm hasta 2100 rpm).

En el estudio no enuncia las características del kit instalado (por ejemplo no dice si el gas natural se mezcla antes del turbo o se mezcla a partir de inyectores en el múltiple de admisión), así como tampoco especifica cómo se realizaron las mediciones de consumo de diésel y gas. Se especifican las condiciones de almacenamiento e inyección del gas el motor, la composición de los combustibles utilizados, las características del motor utilizado y las características de los equipos de medición de emisiones y de frenado del motor

Las especificaciones del motor se muestran a continuación:

Tabla 15. Especificaciones motor Hyundai D6CA

Característica	Valor
Modelo motor	Hyundai D6CA
Desplazamiento (cc)	12920
Diámetro x carrera (mm)	133 x 155
Potencia máxima (PS/rpm)	440/1800
Torque máximo (Kg m/rpm)	197/1400
Tipo de enfriamiento	Enfriado por agua
Sistema de alimentación	Inyección directa
Cilindros	6 en línea
Relación de compresión	17:1
Aspiración	Turbo cargador con interenfriador

Fuente: K. Cheenkachorn, 2013



Las especificaciones de los combustibles utilizados en las pruebas se muestran a continuación:

Tabla 16. Propiedades de GNL y de diésel utilizado en las pruebas al motor Hyundai D6CA

Combustible	Propiedades	Valor
Gas natural licuado	Composición:	
	- CH ₄	- 99.80%
	- C ₂ H ₆	- 0.10%
	- N ₂	- 0.10%
	Densidad (g/L)	415
	Temperatura del tanque (°C)	-162
	Presión del tanque (bar)	8-6
Diésel	Regulación y presión de inyección (bar)	6
	Poder calorífico inferior (kJ/kg)	49244
	Densidad a 15 °C (kg/L)	0.8504
	Poder calorífico inferior (kJ/kg)	43400

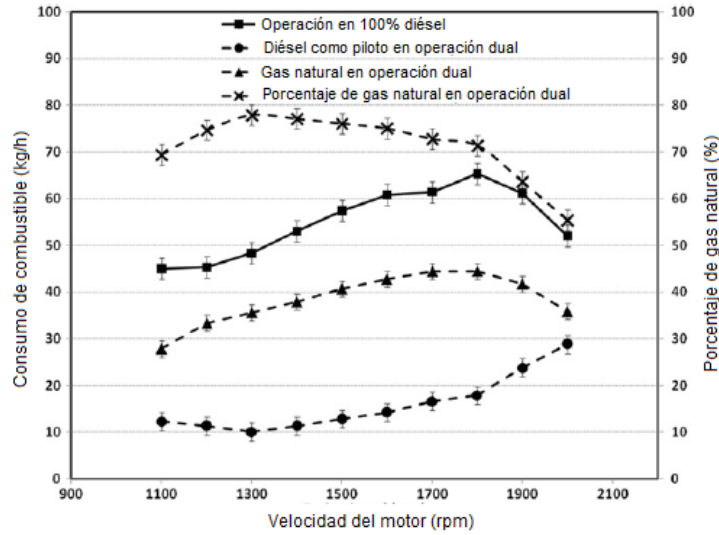
Fuente: K. Cheenkachorn, 2013

El consumo de combustible para el motor en operación dual es mayor que en operación dedicada a diésel (sumando los consumos de diésel y gas en operación dual), aunque la potencia y el torque son similares para todo el rango de velocidades. En la figura 20 se muestra el consumo de cada combustible para las dos formas de inyección del motor, no se muestra la suma de los consumos de combustibles en operación dual diésel – gas natural aunque se muestra que si se suma las dos líneas correspondientes a consumo de gas natural en operación dual y consumo de diésel en operación dual hay un mayor consumo en comparación a consumo en operación 100% diésel en especial a velocidades superiores a 1700 rpm.

El consumo específico de combustible es menor para el motor dual en el rango de 1100 rpm y 1800 rpm, después de 1800 rpm sube de forma exponencial y proporcional a la disminución del porcentaje de gas para prevenir detonación no controlada en el motor. En la Figura 21 se muestra el consumo específico de combustible (BSFC) para las dos formas de operación del motor, adicionalmente se muestra la eficiencia térmica que es inversa al consumo específico de combustible e incluyendo el poder calorífico inferior en su cálculo.

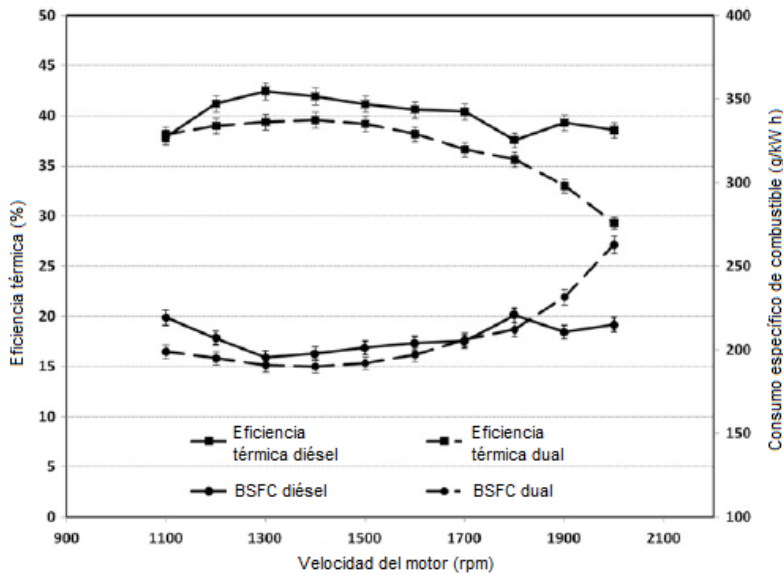


Figura 20. Consumo de combustible para motor Hyundai D6CA en operación diésel y dual diésel-GNL.



Fuente: K. Cheenkachorn, 2013

Figura 21. Eficiencia térmica y consumo específico de combustible para motor Hyundai D6CA en operación diésel y dual diésel-GNL.



Fuente: K. Cheenkachorn, 2013



4.1.4 Comparación de consumo en un motor de 6 L encendido por compresión operado a diésel y a dual diésel-GLP

En un estudio realizado en Australia en el año 2013 (Surawski, 2014), tomaron un motor encendido por compresión con normatividad de emisiones EURO III, el cuál fue convertido para operar de forma dual con gas licuado de petróleo, el sistema consta de un inyector de GLP ubicado antes del turbocargador, para variar la cantidad de suministro de GLP, se modifica el tiempo de duración en el que el inyector se encuentra abierto, como también la frecuencia en que lo hace. El motor se acopló el motor a un dinamómetro para cargarlo. Para el flujo del diésel se usó un flujómetro y para el flujo de GLP se calculó a partir de la diferencia de peso del cilindro de gas antes y después de cada prueba.

En la Tabla 17 se muestran las especificaciones técnicas del motor en prueba.

Tabla 17. Especificaciones motor Cummins ISBe 220 31

Característica	Valor
Modelo motor	Cummins ISBe 220 31
Desplazamiento (cc)	5900
Diámetro x carrera (mm)	102 x 120
Potencia máxima (kW/rpm)	162/2500
Torque máximo (Kg m/rpm)	820/1500
Cilindros	6 en línea
Relación de compresión	17.3 : 1
Normatividad de emisiones	Euro III
Aspiración	Turbocargado con interenfriador

Fuente: K. Surawski, 2014

En la Tabla 18 se muestra las propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas.

Tabla 18. Propiedades de los combustibles utilizados en el estudio con el motor Cummins ISBe 220 31

Propiedad	Diésel con bajo contenido de azufre	Gas Licuado de Petróleo
Densidad (kg/L)	0.838	0.51
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	42.8	46.4
Poder calorífico superior (MJ/kg)	45.5	50.4
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	230	426
Contenido aromáticos (% volumen)	24.4	0
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	2.9	0



Propiedad	Diésel con bajo contenido de azufre	Gas Licuado de Petróleo
(% volumen)		
Relación aire combustible estequiométrica	14.5	15.7
Relación Hidrógeno - Carbono (-)	1.7	2.67
Ethano (% volumen)	–	1.6
Propano (% volume)	–	97.1
Butano (% volume)	–	1.3
Flash point (°C)	74.8	-104
Número de cetano	55.8	5
Contenido azufre (mg/kg)	6.1	<1

Fuente: K. Surawski, 2014

Se examinaron tres casos: solo diésel, baja concentración de GLP y alta concentración de GLP. Adicionalmente se hicieron pruebas en 5 casos, a una velocidad del motor de 1500 rpm y un porcentaje de carga de 25%, 50% y 100%, y a una velocidad del motor de 2500 rpm y un porcentaje de carga de 50% y 100%.

En la Tabla 19 se muestran los consumos de diésel y de diésel-GLP para cada uno de los tres casos a las velocidades y cargas enunciadas, se encuentra que al aumentar el porcentaje de concentración de GLP, aumenta el consumo total de combustible, adicionalmente, en la misma tabla se muestra la eficiencia térmica, que es inversamente proporcional al consumo específico de combustible, es decir que un mayor valor de eficiencia térmica significa un menor consumo de combustible para alcanzar la misma potencia, en el estudio, la eficiencia térmica disminuye al aumentar la concentración de GLP en el motor, es decir que el consumo específico de combustible aumenta

Tabla 19. Consumo de combustible en sistema diésel y dual diésel-GLP en motor Cummins encendido por compresión para distintas condiciones de carga y de concentración de GLP

Velocidad del motor (rpm)	Carga (%)	Concentración GLP (%)	Consumo diésel (kg/h)	Consumo GLP (kg/h)	Eficiencia térmica
1500	25	0	8.0	0	32.2
1500	25	22.1	6.4	1.7	29.5
1500	25	29.2	6.0	2.3	28.9
1500	50	0	13.8	0	35.4
1500	50	17.7	11.9	2.4	33.9
1500	50	27.0	10.4	3.6	33.0
1500	100	0	27.5	0	35.8
1500	100	14.1	23.5	3.6	35.7
1500	100	23.7	20.6	6.0	35.6



Velocidad del motor (rpm)	Carga (%)	Concentración GLP (%)	Consumo diésel (kg/h)	Consumo GLP (kg/h)	Eficiencia térmica
2500	100	0	33.7	0	37.4
2500	100	14.0	29.4	4.4	37.4
2500	100	16.7	26.7	4.9	39.2
2500	50	0	18.3	0	34.5
2500	50	23.4	15.6	4.4	31.6
2500	50	26.1	14.5	5.0	32.6

Fuente: K. Surawski, 2014

4.2 COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GASES

4.2.1 Comparación de emisiones entre bus dedicado a gas natural EURO VI, y buses diésel Euro V y diésel Euro IV en Colombia

En un estudio realizado en Bogotá por el Grupo de Investigación de Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente (GICAEPMA), se hallaron factores de emisión a un vehículo dedicado a Gas Natural Comprimido, en la Tabla 20 se comparan los valores obtenidos en dicho estudio con los valores de factores de emisión obtenidos en un estudio anterior a vehículos diésel en la ciudad de Bogotá.

Tabla 20. Comparación factores de emisión entre bus dedicado a Gas Natural Comprimido GNC EURO 6 y Buses diésel EURO 5 y EURO 4 en Colombia

Vehículo (Marca – Normatividad EURO)	Hidrocarburos sin quemar totales (THC)	Monóxido de Carbono (CO)	Óxidos de Nitrógeno (NOx)	Material Particulado (MP)
	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
VOLVO B12M – EURO 4	0.187	16.9	16.4	0.0467
VOLVO B12M – EURO 4	0.134	28.6	28.3	0.0942
SCANIA – EURO 4	0.136	22.8	15.1	0.173
VOLVO B12M – EURO 5	0.112	7.3	16.6	0.016
VOLVO B12M – EURO 5	0.011	7.5	14.6	0.025
MERCEDES BENZ - EURO 5	0.049	15.3	17.3	0.0336
SCANIA GNC – EURO 6	0.067	1.78	4.6 E-5	3.15 E-8

Fuentes. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GICAEPMA, 2014. Secretaría Distrital de Ambiente – Universidad Nacional de Colombia. 2013 Elaboración propia



Se muestra que para el vehículo dedicado a gas que cumple normatividad Euro 6 las emisiones de material particulado y de óxidos de nitrógeno tienen un orden de magnitud inferior de 7 y de 6 respectivamente, es decir que la contaminación por parte de estos dos compuestos contaminantes son despreciables. En referencia a Hidrocarburos sin quemar totales el vehículo a gas natural tuvo valores superiores cercanos a los vehículos Euro 5 y está por debajo de las emisiones de los vehículos Euro 6. En referencia al monóxido de carbono los valores son inferiores a cualquiera de los buses operado por diésel.

Las emisiones del vehículo dedicado a gas natural en comparación a la Normatividad EURO 6, tiene un valor de monóxido de carbono (CO) por encima de lo permitido por la norma (valor máximo permisible 0.5 g/km), en los factores de emisión restantes cumple.

4.2.2 Comparación de emisiones entre vehículo dedicado diésel y vehículo convertido a dual diésel-GLP³

Un estudio realizado en un banco de pruebas, (Andrew C. Polk, 2014) se compararon emisiones con un motor de carga pesada 12.9 L en modo 100% diésel y posteriormente en sistema dual de diésel-Gas Licuado de Petróleo (GLP) con inyección en la admisión del turbo. El motor se cargó a partir de un dinamómetro a diferentes porcentajes de carga y encada una se midió emisiones. Sin modificaciones en los parámetros de inyección en el motor y al aumentar el porcentaje de energía sustituida de GLP, es decir aumento del suministro de GLP y disminución del diésel se encontró:

- Aumento en las eficiencias de conversión a altas cargas
- Disminución en las eficiencias de conversión a bajas cargas
- Disminución de óxidos de nitrógeno (NOx) y emisiones de hollín
- Aumento de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC)
- A bajas cargas el material particulado baja
- A altas cargas el material particulado aumenta progresivamente

³ Andrew C. Polk, Chad D. Carpenter, Kalyan Kumar Srinivasan, Sundar Rajan Krishnan. An investigation of diesel-ignited propane dual fuel combustion in a heavy-duty diesel engine. ELSEVIER. 2014



En la Tabla 21 se explica el comportamiento de cada una de las emisiones en función de la carga del motor y en función del porcentaje de sustitución de diésel por gas licuado de petróleo:

Tabla 21. Variación de las emisiones entre un motor 100% diésel y uno dual diésel-GLP ve en función de la carga y en función del porcentaje de diésel sustituido por Gas propano

A bajas cargas en el motor	A altas cargas en el motor
Emisiones de hollín	
Las emisiones de hollín suben cuando el porcentaje de diésel sustituido por GLP es del 30%. Bajan de un valor de 2 a 0.2 FSN (Número de filtro de opacidad) en un porcentaje de diésel sustituido cerca del 80%	El hollín baja sus emisiones, presenta las emisiones cercanas a cero después de un porcentaje de diésel sustituido de 40% en adelante
Emisiones de óxidos de Nitrógeno	
Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) bajan en un 10% y 20% para porcentajes de diésel sustituido de 40% y 80% respectivamente.	Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) bajan en un 50% para porcentaje de diésel sustituido por GLP de 30%
Emisiones de monóxido de Carbono	
Las emisiones de monóxido de carbono (CO) aumentan, entre un porcentaje de diésel sustituido por GLP de 40% a 60% disminuye su concentración pero nunca llega a la concentración de cuando se opera 100% diésel	Las emisiones de monóxido de carbono (CO) aumentan en menor proporción a cuando está operado a bajas cargas
Emisiones de hidrocarburos sin quemar	
Las emisiones de hidrocarburos (HC) aumentan considerablemente al aumentar el porcentaje de diésel sustituido por GLP (pasando de 1 g/kWh @ 100% diésel a un valor de 20 g/kWh @ 80% de diésel sustituido por GLP), en ningún momento disminuye.	Las emisiones de hidrocarburos (HC) aumentan, aunque en menor proporción que a bajas cargas.
Emisiones de partículas	
Las emisiones de partículas disminuyen considerablemente al aumentar el porcentaje de diésel sustituido por GLP (pasando de una concentración cercana a $2.5E+8$ partículas/cm ³ @ 100% diésel, a una concentración de $1E+7$ partículas @ 80% de diésel sustituido por GLP)	Las emisiones de partículas aumentan al aumentar el porcentaje de diésel sustituido por GLP (pasando de una concentración cercana a $8E+6$ partículas/cm ³ @ 100% diésel, a una concentración de $1.2E+7$ partículas @ 33% de diésel sustituido por GLP)

Fuente. Andrew C. Polk 2014. Elaboración propia



4.2.3 Comparación de emisiones en un motor con alimentación diésel y dual diésel – gas natural.

En el estudio de comparación en rendimiento y emisiones de un motor en banco de pruebas operado a 100% diésel y de forma dual diésel –GNL (Cheekachorn, 2013), para cada prueba se tomaron las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), Hidrocarburos sin quemar Totales (THC), monóxido de Carbono (CO) y dióxido de Carbono (CO_2). El estudio no considera medición de emisiones de material particulado. Los resultados obtenidos muestran mayores emisiones de monóxido de carbono (CO) y de Hidrocarburos sin quemar totales (THC) para el motor en operación dual, en operación diésel se muestra un mayor contenido de emisiones de óxidos de Nitrógeno (NO_x) y de dióxido de Carbono (CO_2).

En el caso del motor en operación dual se muestra valores menores de CO_2 , pero así mismo mayores de CO y HC, a partir de esto se puede considerar que el motor tiene una quema rica de combustible, es decir, hay combustión incompleta con falta de aire o exceso de combustible. Las emisiones de CO_2 puede malinterpretarse si no se tienen en cuenta todos los componentes resultantes de la combustión que incluyen carbono.

4.2.4 Comparación de emisiones de gases y de material particulado en motor de 6L operado en diésel y en dual diésel-GLP

En el estudio comparativo de emisiones y consumo para un motor operado a diésel y operado en dual diésel –GLP (N. C. Surawski 2014) se encuentra el análisis comparativo de emisiones de forma específica, es decir el valor de la emisión por unidad de energía producida en el motor (g/kWh), las emisiones medidas en el estudio se encuentra en la Figura 23. De la figura se puede concluir que:

- Material particulado $\text{PM}_{2.5}$, Las emisiones de material particulado dan muy similares, a excepción del modo 3 del ciclo ECE R49 donde se muestra una disminución del material particulado al aumentar la concentración de GLP
- monóxido de Nitrógeno (NO), El monóxido de Nitrógeno disminuye al aumentar la concentración de GLP, se ve en los modos del ciclo ECE R49 a excepción del modo 8.
- monóxido de Carbono (CO), Las emisiones aumentan entre 2 y 11 veces más para el motor en operación dual diésel GLP en comparación al motor en operación diésel
- Hidrocarburos sin quemar (HC), Los Hidrocarburos sin quemar aumentan dos órdenes de magnitud al operar el motor de forma dual, en comparación a su operación en diésel.



Es recomendable incluir un catalizador oxidativo para reducir las emisiones de CO y de HC en el modo de operación dual

4.2.5 Comparación de emisiones de gases y material particulado en autobuses alimentados con Gas Natural y con diésel bajo cuatro cargas en estado estable

En un estudio se tomaron 13 autobuses que operan con motores dedicados a Gas Natural Comprimido y 9 buses que operan con diésel de bajo contenido de azufre. Las mediciones a los autobuses se realizaron en un chasis dinamométrico a cargas de : 0%, 25%, 50% y 100% a una velocidad fija de 60 km/h.

Durante las pruebas se registraron los valores de número de partículas, material particulado, dióxido de Carbono y óxidos de Nitrógeno. En la Tabla 22 se muestra los vehículos utilizados en las pruebas. (E.R. Yayaratne. 2009)

Tabla 22. Vehículos utilizados en las pruebas

Autobús	Número de unidades	Edad	Cantidad buses examinados ronda 1 y 2	Odómetro (x10 ³ km)	Post tratamiento	Motor
CNG						
Scania	215	3–5	8 + 5	134–226	2-way catalyst	OSC9G (Euro 2,3)
MAN	51	< 1	5 + 0	2–20	3-way	E2876LUH01 (Euro 3)
Diésel						
B10	477	8–16	4 + 0	596–1045	Ninguno	THD101GC (Euro 0,1) D10HA (Euro 2)
MB OC500	40	2	1 + 5	165–217	Ninguno	OM457HLA (Euro 3)

Fuente: E.R. Yayaratne.2009



Los resultados comparativos entre los dos tipos de vehículos se muestran en la Tabla 23. Se encuentra que hay una gran diferencia en el material particulado entre la operación Diésel y CNG donde para emisiones de PM₁₀ es despreciable y sólo se registran valores cuando el motor a gas tiene cargas superiores al 75%. Las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con el consumo de combustible y por ende de la carga a la que se somete el motor, siendo las emisiones de CNG de un 20% a 30% menores que las del diésel. En cuanto al NO_x no se registraron mayores diferencias, y en conteo de partículas tampoco.

Tabla 23. Emisiones específicas de CO₂, NO_x, conteo de partículas y material particulado para buses dedicados a GNC y buses dedicados a diésel

Carga	Unidades	Diésel B10	Diésel OC500	CNG Scania	CNG MAN	Diésel Flota	CNG Flota
Conteo de partículas							
L0	/min	3.3E + 13	5.3E + 12	2.0E + 12	5.3E + 11	3.1E + 13	1.7E + 12
L25	/km	1.3E + 14	3.6E + 13	1.2E + 13	1.4E + 12	1.2E + 14	1.0E + 13
L50	/km	1.5E + 14	2.0E + 14	3.1E + 13	3.5E + 12	1.5E + 14	2.5E + 13
L100	/km	1.8E + 15	1.7E + 15	6.5E + 14	4.4E + 15	1.8E + 15	1.4E + 15
Material particulado PM ₁₀							
L0	mg/min	25.0	0.7	0.0	0.0	23.1	0.01
L25	mg/km	50.0	5.1	0.0	0.0	46.5	0.01
L50	mg/km	100.0	9.3	0.2	0.1	93.0	0.19
L100	mg/km	722.5	26.0	1.5	0.5	668.6	1.31
Emisiones de CO ₂							
L0	g/min	185	140	138	160	181	142
L25	g/km	625	558	457	580	620	481
L50	g/km	850	807	609	765	847	639
L100	g/km	1340	1145	1031	1360	1325	1094
Emisiones de NO _x							
L0	mg/min	1.8E+03	2.2E+03	1.6E+03	3.7E+02	1.8E+03	1.4E+03
L25	mg/km	6.9E+03	4.6E+03	6.4E+03	2.0E+03	6.7E+03	5.5E+03
L50	mg/km	1.1E+04	6.8E+03	1.3E+04	2.8E+03	1.0E+04	1.1E+04
L100	mg/km	1.9E+04	7.2E+03	3.8E+04	6.5E+03	1.8E+04	3.2E+04

Fuente: E.R. Yayaratne. 2009



4.3 COMPARACIÓN DE RENDIMIENTO

4.3.1 Rendimiento en un motor dedicado diésel y motor convertido a dual diésel-GLP

El estudio de comparación en rendimiento y emisiones en un motor operado 100% diésel y operado a distintas concentraciones de Gas Licuado de Petróleo (Andrew C. Polk ,2014), arrojó resultados en el rendimiento como que al aumentar el porcentaje de sustitución de diésel por GLP, aumenta el rechazo de calor a altas cargas del motor, haciendo que en condiciones de fábrica sea inoperante a altas cargas. Para que disminuya el rechazo de calor en el motor, se hizo un estudio de variación del tiempo de la inyección a partir de un variador de la apertura de inyección con una precisión de 1° yendo desde 8.6° antes del punto muerto superior del pistón a 2.6° antes del punto muerto superior.

A partir de esto se logró determinar que la máxima cantidad de propano sustituido en diésel es de 80 %, adicionalmente que el punto óptimo de emisiones esta dado a un tiempo de inyección de 6.6° antes del punto muerto superior.

4.3.2 Rendimiento en un motor de carga pesada alimentado con diésel y dual diésel – gas natural.

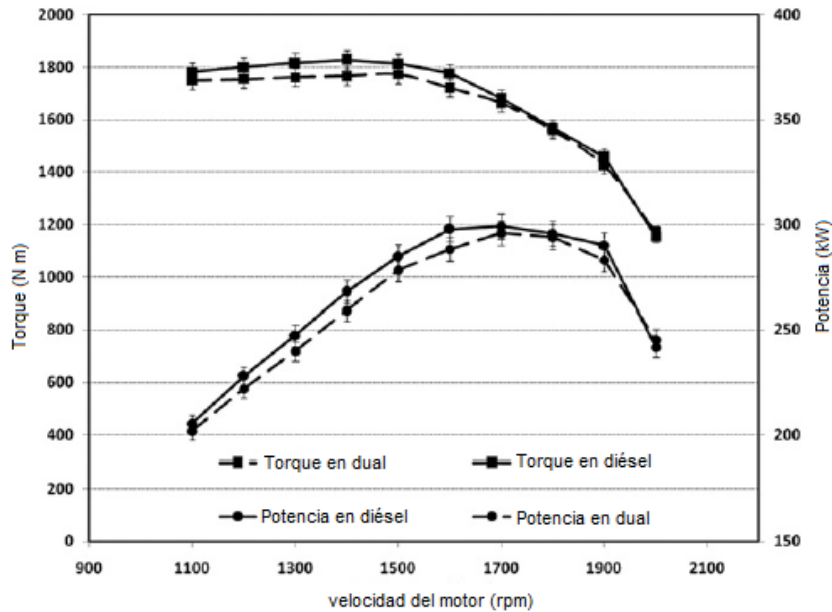
En el estudio de comparación en rendimiento y emisiones de un motor en banco de pruebas operado a 100% diésel y de forma dual diésel – GNL (Cheekachorn, 2013), se comparan valores de potencia, torque y eficiencia volumétrica a partir de pruebas al motor a carga máxima en el dinamómetro a un régimen de operación entre 1000 rpm y 2100 rpm.

Según el estudio, el motor tiene instalados sensores en las cámaras para detectar golpeteo por detonación no controlada del combustible, a partir de dicha señal, se muestra una disminución del suministro de gas a velocidades de giro del motor superior a 1700 rpm con el fin de evitar el golpeteo.



Las curvas de torque y de potencia se muestran en la Figura 22:

Figura 22. Curvas de torque y potencia para el motor Hyundai D6CA operado en diésel y en dual diésel-GNL



- El torque y la potencia del motor para todo el régimen de operación del motor (1100 rpm y 2000 rpm) es similar, con valor de 2.5% inferior para el motor en operación dual.
- La eficiencia volumétrica es inferior para el motor en operación dual, en funcionamiento dual la eficiencia volumétrica tiene valores cerca al 5% inferior en comparación a la operación en diésel.
- La proporción de gas natural disminuye al aumentar la velocidad del motor para efectos de prevención del golpeteo, su proporción máxima es de 77,9% a 1300 rpm.
- Se presenta un menor consumo específico de combustible en la operación dual respecto a la operación a diésel.
- La eficiencia térmica es inferior para la operación del motor en dual, y se incrementa la diferencia después de una velocidad del motor de 1900 rpm.



4.3.3 Presión máxima y cambio de presión en los cilindros de un motor operado en diésel y dual diésel-GLP

En el estudio comparativo de emisiones y consumo para un motor operado a diésel y operado en dual diésel – GLP (N. C. Surawski 2014) se encuentra una medición del rendimiento del motor a partir de la presión máxima encontrada en los cilindros, además del cambio máximo de la presión en los mismos, en la Tabla 24 se encuentran los valores de presión para cada condición de prueba, se muestra que la presión es mayor en todos los casos donde el motor opera de forma dual diésel-GLP con mayor concentración de GLP, es decir que la presión en el cilindro sube más rápido cambiando así los tiempos de inyección, además el aumento de la presión máxima es producto de la premezcla de GLP realizada antes de la admisión en el turbo.

Tabla 24. Máxima presión y máximo aumento de la presión en las cámaras de combustión en motor Cummins operado en diésel y en dual diésel-GLP

Velocidad del motor (rpm)	Carga (%)	Concentración GLP (%)	Máximo aumento de presión (MPa/°)	Máxima presión (MPa)
1500	25	0	0.118	6.6
1500	25	22.1	0.541	6.7
1500	25	29.2	0.521	6.6
1500	50	0	0.109	7.7
1500	50	17.7	0.352	8.4
1500	50	27.0	0.330	8.1
1500	100	0	0.365	12.9
1500	100	14.1	0.391	13.5
1500	100	23.7	0.919	15.2
2500	100	0	0.146	16.8
2500	100	14.0	0.145	20.1
2500	100	16.7	0.810	20.9
2500	50	0	0.658	12.5
2500	50	23.4	0.669	15.4
2500	50	26.1	0.674	15.6

Fuente: N. C. Surawski. 2014



4.3.4 Efectos de los parámetros del motor en el rendimiento de motores duales diésel-Gas Natural y diésel-GLP

En un resumen de artículos se realizaron conclusiones acerca de los efectos que tienen los parámetros de combustión en motores duales operados con diésel GNC o con diésel GLP (B. B. Sahoo. 2009). Las conclusiones del resumen se enuncian a continuación:

4.3.4.1 Efectos de la carga en el motor

El rendimiento en motores duales disminuye en parte por las condiciones de carga del motor, Hay una menor reducción en la potencia de salida y un mayor consumo específico de combustible para los motores.

La presión máxima de los cilindros es menor en motores duales, en comparación a motores dedicados diésel, hay un aumento de la tasa de aumento de presión en los cilindros al aumentar la carga, además es más alta siempre en comparación a motores dedicados a diésel.

La duración de la combustión es más larga en comparación a motores operados a diésel a baja carga.

Hay disminución en las emisiones de NO_x , y una reducción drástica en las emisiones de hollín con todos los combustibles gaseosos (GLP y GN). Pero a todas las condiciones de carga, las emisiones de monóxido de Carbono (CO) y de hidrocarburos sin quemar (HC) son considerablemente altas en comparación al caso de motores dedicados a diésel.

4.3.4.2 Efectos de la velocidad del motor

- Aumenta la eficiencia térmica al aumentar la velocidad del motor, hay valores ligeramente más altos en motores duales.
- Para velocidades de giro constantes, la presión máxima de combustión en motores duales es ligeramente más alta que en motores dedicados a diésel.
- La tasa de aumento de la presión en los cilindros disminuye en motores duales al aumentar la velocidad del motor y es más alta que para motores dedicados diésel.

4.3.4.3 Efectos del tiempo de inyección del combustible piloto (diésel)

- Hay una mejora en la eficiencia térmica al avanzar el tiempo de inyección en motores duales.
- Al avanzar el tiempo de inyección se produce una mejora en la presión máxima y en la tasa de aumento de presión en los cilindros para motores duales.



- El avance en la inyección a altas cargas provoca detonación no controlada en los cilindros.
- Al avanzar el tiempo de inyección, aumentan las emisiones de NO_x y disminuyen las emisiones de CO y de HC.

4.3.4.4 Efectos de la masa de combustible piloto inyectado

- Se presenta una mejora en la eficiencia térmica y en el torque de salida al aumentar la cantidad de diésel como combustible piloto en motores duales.
- Incremento de la masa de combustible piloto inyectado provoca valores de presión de combustión máximos más altos pero reduce la tasa de incremento de la presión.
- Se presenta detonación no controlada al aumentar la masa de combustible piloto inyectado a altas cargas.
- Aumentando el combustible piloto y reduciendo el combustible primario (GN o GLP) reduce el fenómeno de detonación no controlada.
- Aumentando la cantidad de combustible piloto, se aumentan las emisiones de NO_x y disminuyen las de CO y de HC.

4.3.4.5 Efectos de la relación de compresión

- Detonación no controlada empieza a menor régimen al tener altas relaciones de compresión en el motor.
- El aumento en la relación de compresión causa un aumento en el ruido de la combustión.

4.3.4.6 Efectos de condiciones en el múltiple de admisión

- Cuando hay exceso en la recirculación de gases de escape por parte de la válvula EGR (>50%), ocurre un deterioro en las características de la combustión.
- Válvula EGR reduce las emisiones de hidrocarburos sin quemar totales (THC) y de óxidos de Nitrógeno (NO_x), adicionalmente mejora la eficiencia térmica.



5. NORMATIVIDAD

5.1 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

5.1.1 Normatividad internacional referente a aplicaciones de Gas Natural Comprimido y Gas Natural Licuado en vehículos

En la Tabla 25 se presenta el listado de la normatividad que aplica a las tecnologías de gas natural vehicular a nivel internacional. Se presentan los comentarios relacionados con las normas de tres entidades como son: la Agencia Nacional de Protección de Incendios en Estados Unidos (NFPA), la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y el Instituto Nacional de Estándares Estadounidenses (ANSI).

Tabla 25. Normatividad aplicable a tecnologías de gas natural vehicular

Normatividad aplicable a tecnologías de gas natural vehicular			
Código	Documento	Aplicación	Comentarios
NFPA-52 (2010)	Código -sistema de combustibles gaseosos vehiculares	- GNC - GNL - Hidrógeno líquido - Hidrógeno gaseoso comprimido.	- Incluye requerimientos en componentes de los sistemas como válvulas, tanques, reguladores de presión, vaporizadores, equipamiento eléctrico, mantenimiento, suministro desde estaciones de servicio, protección para evitar incendios, entre otros. Los componentes son para sistemas de Gas Natural comprimido, gas natural licuado, adicionalmente para aplicaciones con Hidrógeno líquido y gaseoso. - Incluye aplicaciones vehiculares, residenciales, marinas, no incluye Gas Licuado de Petróleo
NFPA-57 (2002)	Código- sistema de gas natural licuado vehicular - GNL	- GNL	- Incluye requerimientos técnicos en los componentes para realizar instalaciones de Gas Natural Licuado en aplicaciones vehiculares tanto terrestres como en embarcaciones marinas.



NFPA 88B	Estándar para talleres de reparación	Todas las tecnologías	Presenta algunos requerimientos específicos para talleres que trabajan con gas natural vehicular, tales como: ventilación, requerimientos eléctricos (cableado por el techo), temperatura de componentes expuestos.
SAE J1616	Prácticas recomendadas para vehículos a GNC	GNC	Presenta recomendaciones con respecto a la composición del gas natural para aplicaciones vehiculares.
SAE J2343	Prácticas recomendadas para vehículos a GNL	GNC	Contiene recomendaciones en relación con la facilidad de mantenimiento de los sistemas y procedimientos para vehículos de carga pesada con GNC.
SAE J2406	Prácticas recomendadas para camiones GNC de carga media y de carga pesada	GNC	Publicado en 2002. Para vehículos con peso neto mayor a 14000 libras, carga media y pesada. Da parámetros de qué debe contener una regulación de sistemas de Gas Natural Comprimido para uso en vehículos de carga pesada.
SAE J2645	Sistemas de suministro de GNL	GNL	Publicado en 2009. Muestra los requerimientos y pruebas a realizar en los componentes para sistemas de gas Natural Licuado haciendo énfasis en la regulación de los tanques de almacenamiento, del evaporador y componentes asociados a la seguridad.
ANSI NGV1-2006	Dispositivos de conexión en vehículos CNG	GNC	No disponible
ANSI NGV2-2007	Requerimientos básicos para tanques contenedores de CNG	GNC	No disponible
ANSI NGV3.1-1995	Componentes para sistemas de GNC en vehículos	GNC	No disponible
ANSI NGV4.1/CSA 12.5 - 1999	Sistemas de suministro de GNC	GNC	No disponible
ANSI NGV4.2/CSA 12.52 - 1999	Mangueras para vehículos GNC y para estaciones de suministro	GNC	Adicionalmente hay normas referentes a dispositivos como son la ANSI NGV4.4/CSA 12.54 - 1999, la ANSI NGV4.6/CSA 12.56 - 1999, entre otras.

Fuente. www.ngvc.org.

Fuente. Elaboración propia



5.1.2 Normatividad Internacional referente a aplicaciones de GLP vehiculares.

En la Tabla 26 se presenta el listado de la normatividad que aplica a las tecnologías de gas licuado de petróleo en el sector vehicular a nivel internacional, la normatividad actual está completamente desarrollada para el control en infraestructura.

Tabla 26. Normatividad internacional en referencia a GLP

Normatividad aplicable a tecnologías de Gas Licuado de Petróleo			
Código	Documento	Aplicación	Comentarios
NFPA 58	Código del gas licuado de petróleo	GLP vehicular, residencial, y para embarcaciones marítimas.	Incluye requerimientos en los componentes de la instalación de sistemas de gas licuado de petróleo como son: tanques de almacenamiento, evaporadores, válvulas, protección de incendios, entre otros.
EPA 40 CFR part 60	Estándar de rendimiento y emisiones para motores encendidos por chispa estacionarios con alimentación de combustibles gaseosos	GLP vehicular GNC vehicular	Tiene límites de emisiones de NO _x , CO y compuestos volátiles dividida según la potencia de entrega del motor, adicionalmente incluye estándares de cumplimiento por parte de los fabricantes de motores con sistemas de GLP y por parte de los propietarios
US Standard ASTM D1835-97	Especificaciones para gases licuados de petróleo	- Propano comercial - butano comercial - mezclas de propano y butano - Propano de carga especial.	Establece los valores máximos permisibles en las propiedades de gases licuados de petróleo como propano, butano y la mezcla entre ellos, no especifica requerimientos especiales para aplicaciones vehiculares. La normatividad técnica colombiana en referencia a propiedades en GLP está basada en esta norma.
European Standard EN589	Requerimientos y métodos de ensayo para GLP vehicular	GLP	Establece los valores límites en las propiedades fisicoquímicas del gas licuado de petróleo para uso vehicular. Incluye: - Número de octano - Contenido de sulfuros - Contenido de residuos de evaporación - Contenido de agua - Odorización
Japan Industrial Standards	Ley concerniente a seguridad y optimización del	GLP	Divide el GLP según su composición en dos clases, cada una se subdivide en 3 y 4 calidades respectivamente. Para uso vehicular,



K2240-91	gas licuado de petróleo		los límites de componentes en el GLP están dados por la clase N° 2 para aplicaciones industriales y en automóviles, la clase N° 1 es para GLP en uso residencial y comercial.
BS EN 12806:2003	Componentes de sistemas de gas licuado de petróleo vehicular – Diferentes a contenedores	GLP	Muestra regulación sobre componentes a partir de parámetros de diseño y requerimientos a partir de ensayos. Contempla requerimientos a sistemas de
BS EN 12979:2002	Requerimientos de instalación en sistemas de gas licuado de petróleo vehicular	GLP	Presenta requisitos para la instalación de componentes de sistemas de GLP vehicular, guiados a garantizar la seguridad de la operación de los componentes incluyendo componentes mecánicos.

Fuente. Elaboración propia

5.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA

En Colombia se encuentra normatividad técnica y legislación correspondiente a Gas Natural Comprimido (GNC) en uso vehicular, la normatividad cubre parámetros como: disposiciones para estaciones de servicio, instalaciones de kits de conversión, entre otras aplicables a vehículos con motores encendidos por chispa. Adicionalmente existen exenciones arancelarias para vehículos a gas natural y para componentes de sistemas de conversión de GNC con el fin de incentivar su uso.

La normatividad Colombiana no incluye regulación sobre los sistemas de control electrónico que se incluyen en los kits de conversión a GNC, como tampoco normatividad sobre kits de conversión para vehículos con motores encendidos por compresión.

Para Gas Natural Licuado (GNL) en Colombia no existe normatividad técnica ni legislación alguna, ni a nivel industrial, ni a nivel vehicular.

Para procesos de GAL no existe normatividad alguna, sin embargo al desarrollarse algún proceso referente a generación de GAL diésel los parámetros y límites serían los mismos que los estipulados para el combustible diésel convencional.

Para Gas Licuado de Petróleo (GLP) en usos a escala vehicular en Colombia está restringido su uso por la Ley 142 de 1994 – Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones, en su modificación por la ley 689 de 2001 enunciando la prohibición del uso de GLP en aplicaciones vehiculares a excepción de consumo



interno en empresas dedicadas al reparto de gas: “Artículo 22. Utilización del GLP como carburante. Autorízase a las empresas distribuidoras la utilización de GLP para consumo interno operativo, como carburante de los vehículos destinados exclusivamente al reparto de gas.” Aunque en el proyecto de ley 007 de 2012 se considera la regulación y el uso masivo de GLP en motores de combustión interna derogando así la prohibición de su uso en vehículos no asociados a empresas de transporte de GLP, sin embargo hay normatividad sobre estaciones de suministro, sistemas bicomcombustible GLP-gasolina o dedicado GLP, aunque solo para vehículos con sistema de inyección carburado.

5.2.1 Comparación normativa de componentes de sistemas de conversión e infraestructura del GLP en uso vehicular.

En Colombia se encuentra normatividad técnica referente a conversión y mantenimiento de sistemas de conversión dual gasolina-GLP o dedicado GLP, cubriendo temas sobre qué debe incluir un centro de servicio técnico, un sistema de conversión de carburador a dual gasolina-GLP o dedicado GLP, aunque no se encuentra normatividad disponible para el caso de conversiones duales diésel-GLP ni tampoco conversiones en vehículos a gasolina con sistema de inyección electrónico. A nivel internacional se encuentra el código NFPA 58:2004 capítulo 11 y la norma UN/ECE R67-01, regulan el diseño de tanques para GLP vehicular, se regula los accesorios que acompañan los tanques como válvulas, tuberías y conectores, adicionalmente existe normatividad que regula el control sobre la inyección en los motores, la regulación se da a partir de las emisiones máximas permisibles.

Se controlan los siguientes componentes:

- Evaporador/regulador de presión
- Válvula de corte de combustible
- Tubería, mangueras y conectores
- Válvula de alivio de presión.
- Válvula de alivio hidrostática.

En la norma UN/ECE R67-01 se contempla adicionalmente los siguientes componentes:

- Dispositivos de inyección de gas
- Válvulas antirretorno
- Bomba de combustible.
- Unidad de control electrónico
- Riel de inyección
- Sensores de presión o temperatura



En la norma EN 12806 se establecen requerimientos de diseño, ubicación y ensayos de prueba para los siguientes componentes:

- Bomba de combustible
- Válvula antirretorno
- Inyectores y mezcladores
- Evaporador
- Válvula múltiple
- Válvula de corte
- Dosificador
- Mangueras flexibles
- Válvula de alivio hidrostático
- Filtros
- Sensores de temperatura y/o de presión
- Unidad de llenado

En relación a la instalación de componentes, en la norma NFPA 58:2004 se presentan recomendaciones para la instalación de tanques ya sean internos o externos junto a los accesorios mencionados anteriormente, guiados hacia la protección contra daños y confiabilidad en el sistema de alimentación de GLP, o en la norma EN 12979:2002 se presenta la instalación de cada uno de los dispositivos del sistema, incluyendo conexiones eléctricas, selectores de tipo de combustible, dispositivos de alivio de presión, válvulas, tanques, sensores, inyectores, Unidad de control electrónico, adicionalmente presenta requerimientos de manuales a los proveedores de kits de conversión especificando:

- Descripción del tipo de sistema de GLP a ser instalado
- Lista de componentes y elementos homologados
- Instrucciones de instalación para vehículos del mismo tipo
- Planos o fotografías detalladas de la ubicación de cada uno de los componentes del sistema de conversión a GLP.
- Planos o fotografías detalladas de la ubicación de los tanques al momento de su instalación.
- Instrucciones de ensamblaje de componentes
- Diagrama eléctrico presentado de forma detallada
- Instrucciones para el apropiado ajuste de los sistemas de GLP de acuerdo a los estándares de emisión del vehículo transformado debe cumplir.
- Instrucciones para el inicio de operaciones en el vehículo
- Instrucciones de mantenimiento para cada componente del sistema de GLP incluyendo intervalos de servicio y revisión.
- Unidad de control electrónico



Con respecto a infraestructura, se incluyen requerimientos relacionados a la operación y el mantenimiento de plantas. En Europa, están desarrollados los dispositivos mínimos para garantizar la seguridad en las estaciones de servicio, como la disposición de los tanques de almacenamiento de GLP, las líneas de suministro, los dispensadores de GLP y el transporte de GLP a la estación como se muestra en la norma NFPA 59A.

Las normas técnicas colombianas relacionadas se enuncian a continuación.

- *NTC 3768: Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP. Centro de servicio especializado para conversión y mantenimiento de sistemas de carburación en motores con funcionamiento dedicado gasolina por dedicado GLP o dual GLP/gasolina*

Existe un error conceptual en esta norma porque los vehículos convertidos de gasolina pueden convertirse a dedicado GLP o a bicomcombustible GLP/gasolina, en esta norma se presentan los requisitos de infraestructura que debe tener un taller de conversión de vehículos a GLP. A comparación con la normatividad internacional se no se contempla la instalación de sistemas de inyección de GLP, tampoco se contempla cómo se va a realizar la instalación de cada uno de los componentes, se recomienda involucrar a los fabricantes de sistemas de conversión así como se presenta en la norma internacional EN 12979.

- *NTC 3769: Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP. Estaciones de servicio para suministro de GLP.*

Al igual que la normatividad internacional, esta norma contempla el desarrollo de infraestructura para llevar a cabo el suministro de GLP a partir de estaciones de servicio de forma segura y confiable, contemplando parámetros sobre los tanques de almacenamiento, procedimientos de llenado, sistemas de seguridad, de control de incendios y planes de prevención y contingencia. En la norma NFPA 58 – Capítulo 6 se incluye control sobre ubicación de los contenedores, requerimientos de los mismos, sistemas de transporte, válvulas, sistemas de alivio de presión, válvulas de corte por emergencias, protección ante la corrosión, infraestructura física como techos, dispensadores de combustible a vehículos, protección contra incendios.

- *NTC 3770: Sistemas bicomcombustible GLP/gasolina o dedicados a GLP.*

Se encuentra normalizado los kits de conversión para vehículos con carburador, tiene parámetros de funcionamiento en el tanque de almacenamiento, válvulas, tuberías, mangueras, mezclador, sistema eléctrico y de control de la admisión, no incluye componentes específicos cuando hay sistema de inyección de gas en motores con inyección electrónica, ni enuncia tipos de suministro de GLP a las cámaras diferentes a un mezclador (recordar que hay inyección multipunto e inyección monopunto de GLP sobre el múltiple suprimiendo los sistemas con mezclador). En la norma NFPA 58 se encuentra



información similar disponible. Para información normativa sobre componentes de sistemas de GLP se encuentra la norma EN 12806:2003, donde se contempla requisitos para cada componente de los sistemas de carburación e inyección, adicionalmente tiene pruebas de control sobre componentes, además tiene requisitos sobre componentes asociados al control de la mezcla como son sensores y controladores (unidad de control electrónico). En la siguiente tabla se presenta la comparación normativa de componentes regulados según la normatividad técnica colombiana en comparación a la normatividad técnica internacional, las equis representan la presencia de regulación sobre el componente y los guiones representan la ausencia regulatoria en la normatividad evaluada.

Tabla 27. Comparación normativa de exigencias en componentes de sistemas de GLP

COMPONENTE	NFPA 58	UN/ECE R67-01	EN 12806	NTC 3770 -NTC 5281
Evaporador	x	x	x	x
Válvula de corte de combustible	x	x	x	x
Tubería, mangueras y conectores	x	x	x	x
Válvula de alivio de presión	x	x	x	x
Válvula de alivio hidrostático	x	x	x	x
Mezclador	-	x	x	x
dispositivos de inyección de gas	-	x	x	-
Bomba de combustible	-	x	x	-
Válvula múltiple	-	x	x	-
Dosificador	-	x	x	-
Filtros	-	x	x	x
Sensores de temperatura y/o presión	-	x	x	-
Unidad de llenado	-	x	x	x
Unidad de Control Electrónico	-	x	x	-
Riel de inyección	-	x	x	-
válvula antirretorno	-	x	x	-
Tanque	x	x	x	x



COMPONENTE	NFPA 58	UN/ECE R67-01	EN 12806	NTC 3770 -NTC 5281
Fuente: Elaboración propia				

- *NTC 3771: Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP. Conversión de motores de combustión interna con sistema de carburación dedicada gasolina por carburación bicomcombustible (GLP-gasolina) o dedicada GLP.*

Se encuentra la normalización correspondiente a ubicación de los accesorios del kit de conversión, adicionalmente da un paso a paso del procedimiento de conversión. En la norma NFPA 58 se encuentra información similar disponible.

En la unión europea, se tiene regulación en la instalación de kits de conversión a GLP y adicionalmente tiene regulación a vehículos que traen motores dedicados a GLP. Se regula la instalación en vehículos con sistemas de inyección, adicionalmente se controlan componentes electrónicos y de control de flujo y encendido de la mezcla según el tipo de combustible, la Tabla 28 muestra la comparación entre la normatividad europea, la normatividad estadounidense NFPA y la norma técnica colombiana vigente.

Tabla 28. Comparación normativa sobre requerimientos de instalación para sistemas de GLP

Instalación o revisión	NFPA 58 - CAP 11	BS EN 12979	NTC 3771
Revisión general del vehículo	-	-	x
Recipiente de almacenamiento	x	x	x
accesorios asociados al recipiente	x	x	x
Válvulas e indicadores de nivel	x	x	x
Líneas de conducción de combustible	x	x	x
Válvula de alivio hidrostático	x	x	x
Mezclador	-	x	x
Inyectores	-	x	-
Gasificador	x	x	x
Filtro de combustible	x	x	x
Sistema de ignición	-	x	x
Sincronización	-	x	x



Rotulado y elementos visuales de seguridad	x	x	x
Cambios estructurales del vehículo	-	x	-
Instalación eléctrica	-	x	-
Sistema de selección de combustible	-	x	-
Fuente: Elaboración propia			

- Transporte de gas licuado de petróleo.

NTC 4786-3 Transporte de mercancías peligrosas. Carro tanques para transporte terrestre. Parte 3: Gas licuado de petróleo GLP.

- Requisitos para los gases licuados de petróleo.

NTC 2303 Petróleo y sus derivados. Especificaciones para gases licuados del petróleo.

En esta norma se encuentran los límites máximos permisibles en las propiedades del GLP para usos vehiculares, relacionada al propano para usos especiales. La comparación se realiza de forma detallada en el capítulo 5.5 del presente documento.

NTC 5281: Recipientes para almacenamiento de GLP utilizado como combustible vehicular.

5.2.2 Comparación normativa de componentes de sistemas de conversión e infraestructura del GNC vehicular

5.2.2.1 Normas referentes a componentes del sistema de GNC vehicular

Las normas técnicas colombianas que regulan los componentes de los sistemas de gas natural vehicular están guiadas para conversiones de vehículos con motores dedicados a gasolina a motores bicomcombustible gasolina - gas natural, no se contemplan regulaciones en sensores y en el sistema de control de la combustión, para sistemas duales se deben incluir componentes por regular como son:

- Mezcladores de combustible diésel y gas natural o inyectores



- Controladores de inyección mecánica
- Controladores de inyección electrónica
- Válvula de control de flujo de gas natural
- Sensores asociados al control del flujo de gas

En la normatividad internacional (NFPA 52-4, SAE J2406) tampoco se contempla la regulación de componentes para conversiones en vehículos encendidos por compresión, y la regulación se plantea principalmente en temas de seguridad y confiabilidad de los componentes y del sistema.

- *NTC 4830. Componentes del sistema de combustible para vehículos que funcionan con gas natural comprimido.*

Esta norma está compuesta por 20 partes, basada en la normatividad ISO 15500, cada parte presenta especificaciones acerca de los componentes que tiene un sistema de alimentación de gas natural para vehículos con motores a gasolina.

A continuación se enuncia cada una de las partes:

- Parte 1: Definiciones y requisitos generales
- Parte 2: Desempeño y métodos generales de ensayo
- Parte 3: Válvula de cheque
- Parte 4: Válvula manual
- Parte 5: Válvula manual del cilindro
- Parte 6: Válvula automática
- Parte 7: Inyector de gas
- Parte 8: Indicador de presión
- Parte 9: Regulador de presión
- Parte 10: Ajustador del flujo de gas
- Parte 11: Mezclador gas/aire
- Parte 12: Válvula de alivio de presión – VAP
- Parte 13: Dispositivo de alivio de presión – DAP
- Parte 14: Válvula de exceso de flujo
- Parte 15: Cubierta hermética y manguera de ventilación
- Parte 16: Líneas rígidas de conducción
- Parte 17: Líneas flexibles de conducción
- Parte 18: Filtro
- Parte 19: Accesorios



- Parte 20: Líneas rígidas de conducción en material diferente a acero inoxidable.

5.2.2.2 Normas referentes a la instalación de sistemas de GNC vehicular.

En referencia a las normas sobre instalación de sistemas de GNC vehicular, la normatividad internacional al igual que la colombiana contempla requisitos espaciales del vehículo y de seguridad para llevar a cabo la instalación de los componentes, adicionalmente en la normatividad nacional se encuentra la evaluación del vehículo para llevar a cabo la instalación.

Solamente se presenta normatividad para vehículos a gasolina, por tanto no se considera la instalación de sistemas de inyección en vehículos con motores encendidos por compresión. En la instalación no se contempla la forma de calibración (sincronización) del suministro de gas natural junto a la mezcla de diésel.

- *NTC 4821: Instalación de componentes del equipo completo para vehículos con funcionamiento dedicado GNCV o Bicombustible Gasolina-GNCV.*
- *NTC 4822: Talleres de servicio para vehículos que utilizan gas natural comprimido*

5.2.2.3 Normas referentes a estaciones de servicio de GNC

- *NTC 4820: Estaciones de servicio para vehículos que utilizan gas natural comprimido como combustible.*
- *NTC 5897: Estaciones de carga y descarga de gas natural comprimido. Ministerio de minas y energía: Resolución 180928 de 2006 – Reglamento técnico de las estaciones de servicio de GNC*

5.2.2.4 Normas referentes a calidad del GNC para uso vehicular

A continuación se enuncian las normas que existen en Colombia que regulan la calidad del gas natural, la comparación se realiza en el punto 5.4 del presente documento.

- *NTC 4826: Calidad del gas natural comprimido para uso vehicular.*
- *CREG: Resolución 071 de diciembre de 1999*
- *CREG: Resolución 020 de marzo de 2007 – Numeral 6.3*
- *CREG: Resolución 054 de julio de 2007, modificación de la resolución 071 de dic de 1999*

En la Resolución CREG 071 de 1999 emitida por la CREG – Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de gas natural (RUT), en referencia a Gas Natural domiciliario se muestra la calidad del gas natural entregado al transportador, en el numeral 6.3 se



especifica la calidad del gas natural (modificada por la Resolución CREG 054 de 2007 – Por la cual se complementan las especificaciones de calidad de gas natural inyectado al sistema Nacional de Transporte, definidas en la Resolución CREG 071 de 1999), adicionalmente establece la medición por parte del receptor del gas de al menos las siguientes variables:

- Poder calorífico del gas
- Dióxido de Carbono
- Nitrógeno
- Oxígeno
- Gravedad específica
- Cantidad de vapor de agua
- Sulfuro de hidrógeno
- Azufre total

En la Tabla 29 se enuncian los límites permisibles por la norma en referencia a la calidad del gas natural:

Tabla 29. Especificaciones del Gas Natural al momento de entregarse a un proveedor

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV)(Nota 1)	42.8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)(Nota 1)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3%	3%
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.10%	0.10%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	45 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 pc
Nota 1. Todos los datos sobre metro cúbico o pie cúbico de gas están referidos a Condiciones Estándar.		
Nota 2. Los líquidos pueden ser: hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido.		
Nota 3. Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO ₂ , nitrógeno y oxígeno.		
Nota 4. El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones.		
Fuente. Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución 071 de 1999, modificada por Resolución 054 de		



Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
2007, numeral 6.3		

En referencia a normatividad técnica sobre límites de propiedades o contenidos en el gas natural para uso vehicular, se encuentra la norma técnica colombiana *NTC 4826: Calidad del gas natural comprimido para uso vehicular*. Donde se establecen límites máximos permisibles diferentes a los encontrados en la Resolución 071 de 1999. En la siguiente tabla se muestran los valores de control donde se regula principalmente los valores relacionados a la composición de elementos diferentes al metano pero no se especifica regulación sobre las propiedades como el índice de Wobbe.

Tabla 30. Especificaciones del gas natural según NTC 4826

Especificaciones	Valor
Agua	Libre
Hidrocarburos (propano y mayores)	< 13 ml/m ³
Azufre	120 mg/m ³
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	6 mg/m ³
Dióxido de Carbono (CO ₂)	< 2% en vol.
Oxígeno (O ₂)	< 0.5% en vol.
Metanol/Glicol	Libre
Mercurio	Libre
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.10%
Material particulado	Tamaño < 15 µm Contenido total < 1.6 mg/m ³
Odorante	Según ISO 13734
Contenido de aceite	< 200 ppm
Índice de Wobbe	No se especifica cual se utiliza para aplicaciones vehiculares aunque en el anexo B se muestran valores límite discriminados según el grupo Grupo L: de 37.8 a 46.8 MJ/m ³ Grupo H: de 46.1 a 56.5 MJ/m ³ Y según aplicaciones en Norteamérica los rangos van entre 48.5 MJ/m ³ y 52.2 MJ/m ³ , o también entre 44.7 MJ/m ³ y 46.6 MJ/m ³
Número de octano equivalente	De 115 a 135

Fuente. NTC 4826: Calidad del gas natural comprimido para uso vehicular.



5.2.2.5 Normas referentes al manejo del GNC

- *Ministerio de minas y energía: Resolución 80582 de 1996 – Almacenamiento, manejo y distribución de GNC para automotores. Conversión de vehículos y delegación de funciones.*
- *Ministerio de minas y energía: Resolución 181386 de 2005 – Modificación de la resolución 80582 de 1996.*

5.2.3 Normatividad arancelaria para vehículos dedicados a GNC, GNL, GLP o para kits de conversión.

En el Decreto 4341 de 2004 se encuentra especificado los aranceles de aduana para vehículos a gasolina y a diésel, el decreto fue modificado por el decreto 4570 de 2005 especificando los aranceles de aduana para vehículos con motores a gas.

Los códigos de los vehículos de motores de combustión interna para uso de gas natural se muestran en la Tabla 31:

Tabla 31. Arancel de aduanas para vehículos automotores en Colombia

Código	Designación de la mercancía	Grav. (%)
87.02	Vehículos automóviles para transporte de diez o más personas, incluido el conductor	
87.02 10	Con motor de émbolo (pistón), de encendido por compresión (diésel o semi-diésel):	
87.02 10.10.00	Para el transporte de un máximo de 16 personas, incluido el conductor	35
87.02 10.90.00	Los demás	15
87.02 90	Los demás	
87.02 90.10.00	Trolebuses	15
87.02 90.99.10*	Con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural	15
87.02 90.99.90*	Los demás	15
87.02 91.00	Para el transporte de un máximo de 16 personas, incluido el conductor	35
87.02 99.00	Los demás	15
87.03	Automóviles de turismo y demás vehículos automóviles concebidos principalmente para transporte de personas (excepto los de la partida 87.02), incluidos los del tipo familiar («break» o «station wagon») y los de carreras.	
87.03 10.00.00	Vehículos especialmente concebidos para desplazarse sobre nieve; vehículos especiales para transporte de personas en campos de golf y vehículos similares	20
	Los demás vehículos con motor de émbolo (pistón)	



Código	Designación de la mercancía	Grav. (%)
	alternativo, de encendido por chispa:	
87.03 21.00.00	De cilindrada inferior o igual a 1.000 cm ³	35
87.03 22	De cilindrada superior a 1.000 cm ³ pero inferior o igual a 1.500 cm ³	
87.03 22.00.10	Camperos	35
87.03 22.00.90	Los demás	35
87.03 23	De cilindrada superior a 1.500 cm ³ pero inferior o igual a 3.000 cm ³ :	
87.03 23.00.10	Camperos	35
87.03 23.00.90	Los demás	35
87.03 24	De cilindrada superior a 3000 cm ³	
87.03 24.00.10	Camperos	35
87.03 24.00.90	Los demás	35
	Los demás vehículos con motor de émbolo (pistón), de encendido por compresión (diésel o semi-diésel):	
87.03 31	De cilindrada inferior o igual a 1.500 cm ³ :	
87.03 31.00.10	Camperos	35
87.03 31.00.90	Los demás	35
87.03 32	De cilindrada superior a 1.500 cm ³ pero inferior o igual a 2500 cm ³ :	
87.03 32.00.10	Camperos	35
87.03 32.00.90	Los demás	35
87.03 33	De cilindrada superior a 2500 cm ³	
87.03 33.00.10	Camperos	35
87.03 33.00.90	Los demás	35
87.03 90.00.00	Los demás	35
87.04	Vehículos automóviles para transporte de mercancías.	
87.04 10.00.00	Volquetes a automotores concebidos para utilizarlos fuera de la red de carreteras	15
87.04 10.00.10*	Con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural	0
87.04 10.00.90*	Los demás	15
	Los demás, con motor de émbolo (pistón), de encendido por compresión (diésel o semi-diésel)	
87.04 21	De peso total con carga máxima inferior o igual a 5 t:	
87.04 21.00.10	De peso total con carga máxima inferior a 10.000 libras americanas	15
87.04 21.00.90	Los demás	15
87.04 22.00.00	De peso total con carga máxima superior a 5 t pero inferior o igual a 20 t	15
87.04 23.00.00	De peso total con carga máxima superior a 20 t	15
	Los demás, con motor de émbolo (pistón), de encendido por chispa:	
87.04 31	De peso total con carga máxima inferior o igual a 5 t:	
87.04 31.00.10	De peso total con carga máxima inferior a 10.000 libras americanas	35
87.04 31.00.11*	Con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural	35
87.04 31.00.19*	Los demás	35
87.04 31.00.90	Los demás	15
87.04 31.00.91*	Con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural	15
87.04 31.00.99*	Los demás	15



Código	Designación de la mercancía	Grav. (%)
87.04 32.00.00	De peso total con carga máxima superior a 5 t	15
87.04 32.00.10*	Con motor de funcionamiento exclusivo con gas natural	15
87.04 32.00.90*	Los demás	15
87.04 90	Los demás	
87.04 90.00.10	De peso total con carga máxima inferior a 10.000 libras americanas	35
87.04 90.00.90	Los demás	15
87.05	Vehículos automóviles para usos especiales, excepto los concebidos principalmente para transporte de personas o mercancías (por ejemplo: coches para reparaciones [auxilio mecánico], camiones grúa, camiones de bomberos, camiones hormigonera, coches barredera, coches esparcidores, coches taller, coches radiológicos).	
87.05 10.00.00	Camiones grúa	15
87.05 20.00.00	Camiones automóviles para sondeo o perforación	15
87.05 30.00.00	Camiones de bomberos	15
87.05 40.00.00	Camiones hormigonera	15
87.05 90	Los demás: coches barredera, regadores y análogos para la limpieza de vías públicas:	
87.05 90.11.00	Coches barredera	5
87.05 90.19.00	Las demás	15
87.05 90.20.00	Coches radiológicos	15
87.05 90.90.00	Los demás	15
87.06	Chasis de vehículos automóviles de las partidas 87.01 a 87.05, equipados con su motor.	
87.06 00.10.00	De vehículos de la partida 87.03	15
87.06 00.20.00	De vehículos de la partida 87.04.21 y 87.04.31	
87.06 00.20.10*	De las subpartidas 8704 31.00.11 y 8704 31.00.91	35
87.06 00.00.90*	Los demás	35
87.06 00.90.00	Los demás	35
*Modificaciones realizadas en el decreto 4570 de diciembre de 2005		
Fuente. Ministerio de comercio, industria y turismo. Decreto N° 4341 de 2004		

Se evidencia que ningún vehículo pequeño, mediano o de carga pesada con motor a gas tiene exenciones o disminuciones arancelarias en comparación a vehículos a gasolina o diésel, salvo el caso de vehículos volquetes para ser usados fuera de carretera (código 87.04 10.00.10), en ese caso el arancel de aduana cambia de un 15% a un 0%.

Para componentes de sistemas de gas natural, el decreto 4570 de 2005 muestra exenciones o disminuciones arancelarias para la importación de los siguientes componentes:

1. Recipientes para almacenamiento de Gas Natural (código 73.11 00.10.10): al contemplarse el uso para el almacenamiento de GNV el arancel de aduana pasa de un 15% a un 5%.



2. Motores dedicados a Gas Natural (código 84.07 90.00.10): tiene una disminución del arancel de aduana de 5%, pasando de un valor de 5% a un arancel de 0%.
3. Compresores para uso vehicular con potencia mayor a 40 hp (códigos 84.14 80.22.10 y 84.14 80.23.10) pasando de un arancel de aduana del 15% a uno del 0%.

5.3 DIFERENCIAS DE FORMA Y DE CONTENIDO ENTRE NORMATIVIDAD EXISTENTE PARA GAS NATURAL (GNC – GNL) Y GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) EN COLOMBIA

En esencia, la normatividad técnica para los sistemas de alimentación de Gas Natural Comprimido y Gas Licuado de Petróleo para uso vehicular es similar, debe regular los siguientes puntos:

1. Tanques de almacenamiento
2. Componentes del sistema de alimentación, ya sea de fábrica (motores dedicados) o de sistemas de conversión.
3. Estaciones de servicio
4. Requisitos de instalación, infraestructura y seguridad
5. Inspecciones y revisiones a los sistemas
6. Calidad del combustible

En el Anexo A se encuentran enunciadas las normas técnicas colombianas que regulan el Gas Natural Vehicular (GNV) y el Gas Licuado de Petróleo (GLP) en Colombia contextualizadas en el capítulo 5.1

En relación con el GNC la normatividad está desarrollada solamente para vehículos convertidos de gasolina a bicomcombustible gasolina-GNC, mientras que para conversiones en vehículos encendidos por compresión no se encuentra normatividad específica.

En el caso del GLP, la norma NTC 3768 tiene errores conceptuales en referencia al tipo de conversión en vehículos a gasolina, esta plantea que su aplicación es para motores con funcionamiento dual GLP/gasolina y según el marco de referencia de tecnologías no se encuentra dicha conversión, los mismos errores también se presentaron en la NTC 3770 y la NTC 3771, sin embargo estas normas tienen una primera actualización en la cual se incluyen



las correcciones conceptuales. Al igual que en el caso del GNC, en GLP no se consideran conversiones a vehículos duales diésel-GLP en la normatividad vigente.

Para sistemas de conversión a GNL no se encuentra normatividad Colombiana, aunque puede ser evaluada la posibilidad de aplicarse la normatividad vigente para GNC actual en los componentes del sistema de alimentación que van después del evaporador, se recomienda la generación normativa de GNL específicamente en los sistemas de almacenamiento (tanques), control, seguridad y regulación en componentes comprendidos entre los tanques y el evaporador.

En la Tabla 32 se incluyen los comentarios y las sugerencias para cada uno de los puntos descritos que deben ser regulados según la normatividad técnica encontrada a nivel nacional.

Tabla 32. Comparación entre normatividad técnica existente en Colombia para Gas Natural Vehicular (GNC y GNL) y Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Aplicación	Norma técnica existente para GNC – GNL* / Comentarios	Norma Técnica existente para GLP / Comentarios
Tanques de almacenamiento	NTC 3847 No se contempla normatividad referente a tanques de almacenamiento de GNL	NTC 5281
	NTC 4830 No se encuentra regulación sobre el sistema de control electrónico del suministro de combustible.	NTC 3770 – NTC 3771 No se encuentra información normativa sobre conversiones duales diésel-GLP, así como tampoco normatividad sobre conversiones bicombustible gasolina-GLP para vehículos con sistema de inyección electrónica.
Componentes del sistema de alimentación de combustible	Se especifica aplicación para vehículos dedicados, bicombustible y duales, aunque sobre vehículos duales no especifica aplicaciones en automotores con motores encendidos por compresión.	Caso contrario a la normatividad encontrada para gas natural en referencia a cada componente del sistema de combustible, para GLP no se encuentra una normatividad que regule los componentes del sistema de forma independiente, en la norma NTC 3770 se regulan todos los componentes y en la NTC 3771 se dan lineamientos para su instalación:
	Las pruebas a realizar sobre los componentes de los sistemas de conversión son de resistencia a la corrosión, aislamiento, fugas, vibración, sobrevoltaje, operación continua, exceso de torque, envejecimiento, sobrepresión, temperaturas, entre otras.	Asociados al almacenamiento y accesorios - Tanque de almacenamiento - Accesorios del tanque de almacenamiento - Tubería (rígida, semirígida y mangueras)



Aplicación	Norma técnica existente para GNC – GNL* / Comentarios	Norma Técnica existente para GLP / Comentarios
	<p>Se recomienda generar una norma que incluya regulación sobre los evaporadores, diferenciándolos para aplicaciones de GNC y de GNL, adicionalmente incluir el tipo de tecnología (dual, dedicada o transformada).</p> <p>Se recomienda relacionar las aplicaciones duales de los componentes con la normatividad referente a instalación de sistemas de GNC (NTC 4821), porque en la norma NTC 4821 no se incluyen instalaciones duales, solamente bicomcombustible.</p> <p>Para las aplicaciones de gas natural en motores duales se debe tener en cuenta regulación sobre los componentes de control de la inyección de diésel, en especial sobre sistemas de inyección con bomba mecánica, y también en sistemas de inyección electrónicos. Adicionalmente el control sobre la posición del acelerador para regular el flujo de gas entrante al mezclador.</p> <p>Se recomienda generar normatividad específica para gas natural licuado (GNL).</p> <p>Se recomienda asociar normatividad de control de emisiones a vehículos duales contemplando medición de material particulado y medición de hidrocarburos no metánicos independiente de hidrocarburos metánicos. Adicionalmente asociar normatividad de control de</p>	<p>discriminadas para uso en sistema de alta y baja presión</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adaptadores - Accesorios de unión de tubería - Válvula de alivio hidrostático <p>Asociados al sistema de carburación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gasificador-regulador - Mezclador - Filtros - Sistema de corte de combustible por presión - Sistema selector del tipo de combustible <p>En cada uno de ellos se enuncian requisitos particulares acompañados de límites permisibles, no incluye explicación de las pruebas de control en particulares a excepción de tres ensayos generales que son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo de rotura de fugas y de compatibilidad con GLP <p>No se encuentra normatividad para válvulas de cambio entre combustibles ni para el sistema de control de la inyección.</p> <p>En la norma NTC 3770, se recomienda complementar los límites máximos de las propiedades físicas de los componentes a partir de pruebas de fugas, estanqueidad, corrosión, resistencia a temperatura, operación continua, exceso de torque, entre otras que se consideren pertinentes según sea el componente a regular (en la sección de cada componente denominada “Requisitos particulares”).</p> <p>Se recomienda generar normatividad sobre elementos de conversión duales diésel-GLP y sistemas de conversión bicomcombustible gasolina-GLP en vehículos con sistemas de inyección</p>



Aplicación	Norma técnica existente para GNC – GNL* / Comentarios	Norma Técnica existente para GLP / Comentarios
	emisiones para sistemas encendidos por compresión de mezcla pobre.	electrónica. Se recomienda generar normatividad referente al control de componentes electrónicos, y sensores de control de la combustión (En el anexo B de la norma NTC 3771 se enuncian pero no se controla nada al respecto.), también a componentes no contemplados como válvulas de cambio de combustibles y sensor de posición del pedal en el caso de sistemas duales diésel/GLP
		NTC 3769 – NTC 3853 – NTC 4783-3 En la normatividad se estipulan requisitos mínimos que deben cumplir las estaciones de servicio guiado a seguridad y control de incendios. Se regulan los siguientes componentes asociados a las estaciones de servicio para suministro de GLP:
Estaciones de servicio, transporte del combustible	NTC 4820 – NTC 4823 – NTC 4824 – NTC 4825 – NTC 4827 – NTC 5897	<ul style="list-style-type: none"> - Tanques de almacenamiento - Bombas - Surtidores - Tuberías, mangueras y accesorios - Elementos de sistemas contra incendios - Requisitos de infraestructura - Instalaciones eléctricas Adicionalmente se encuentran: <ul style="list-style-type: none"> - Pruebas técnicas para control de los sistemas de llenado - Procedimiento para el suministro de GLP a vehículos - Planes de prevención y contingencia
		NTC 3768 – NTC 3771
Requisitos de instalación, infraestructura y seguridad	NTC 4821 – NTC 4822 – NTC 4828 – NTC 4829 En referencia a las instalaciones de sistemas de conversión a GNC se encuentra normatividad únicamente para conversiones a	La NTC 3778 tiene un error conceptual, porque dice que es para motores duales gasolina/GLP y según el marco conceptual de tecnologías los sistemas de gasolina /GLP son bicomcombustible, en los casos de la NTC 3770 y la NTC 3771



Aplicación	Norma técnica existente para GNC – GNL* / Comentarios	Norma Técnica existente para GLP / Comentarios
	<p>vehículos bicombustibles o a vehículos dedicados, es decir que la conversión dual diésel-gas no está contemplada en la normatividad técnica colombiana, pese a que los componentes se encuentran regulados y contemplados para conversiones duales.</p> <p>Se recomienda generar una norma similar a la NTC 4821 pero que sea aplicable a vehículos con suministro de gas natural dual diésel-GNC.</p> <p>Se recomienda incluir normatividad específica para gas natural licuado (GNL)</p>	<p>fueron actualizadas corrigiendo el mismo error conceptual y parte de su contenido.</p> <p>Se encuentran parámetros para la conversión de vehículos a gasolina con sistema de inyección por carburador, a conversión bicombustible Gasolina-GLP.</p> <p>Se recomienda incluir la forma de instalación en vehículos encendidos por compresión, con sistemas duales diésel-GLP.</p> <p>Se recomienda generar normatividad sobre transformación de motores dedicados a diésel hacia motores dedicados a GLP.</p>
Calidad del combustible	<p>NTC 4826</p> <p>Se encuentran límites en los componentes del gas natural para aplicaciones vehiculares incluyendo límites máximos en composición como metano, material particulado, hidrocarburos, componentes corrosivos como Azufre y en propiedades fisicoquímicas como el índice de Wobbe y el poder calorífico.</p>	<p>NTC 2303</p> <p>Para el GLP, se encuentra la norma que regula la composición y las propiedades del gas para uso automotor, sin embargo es el mismo GLP para uso residencial y comercial, adicionalmente, en la norma no se especifica cuál de los cuatro gases licuados de petróleo se debe utilizar para uso vehicular, ya que se enuncian los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Propano comercial - Butano comercial - Mezclas comerciales Propano Butano - Propano aplicaciones especiales <p>Solamente se encuentra una sección en la cual se establece que el propano para aplicaciones especiales es indicado para motores de combustión interna.</p> <p>Se recomienda generar una norma independiente sobre la regulación en composición y propiedades del GLP para uso en motores de combustión interna.</p>

* No hay normatividad técnica en el país sobre GNL. Aunque puede ser aplicable la normatividad referente a los componentes del sistema de alimentación de GNC que van después del evaporador.

Fuente. Elaboración propia



5.4 DIFERENCIAS EN REGULACIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE GAS NATURAL EN COLOMBIA Y A NIVEL INTERNACIONAL

5.4.1 Comparación entre normatividad internacional y nacional para composición del gas natural

En referencia a normatividad sobre composición del gas natural en Colombia se encuentran dos normas, la primera es la Resolución CREG 071 de 1999, modificada por la resolución 054 de 2007 donde se regula el gas natural transportado para uso domiciliario, adicionalmente se encuentra la norma técnica colombiana NTC 4826, basada en la norma ISO 15403-1:2006 donde se regula el contenido de componentes no deseados en el gas natural como son el azufre, el sulfuro de hidrógeno, el agua, el dióxido de Carbono, el oxígeno, hidrocarburos licuables como el propano y de cadenas de carbono mayores a 3 y el material particulado, en comparación a la normatividad internacional diferente a la ISO 15403-1:2006 la norma colombiana no regula el contenido de Metano.

En referencia a las propiedades del gas natural para uso vehicular, la NTC 4826 no regula el índice de Wobbe, el poder calorífico, la densidad, el número de metano ni la temperatura de rocío aunque se contextualizan las incidencias de cada una de estas propiedades para uso vehicular pero no se encuentran límites máximos asociados como tal. En comparación a la normatividad internacional, se recomienda fijar límites máximos permisibles para el índice de Wobbe, la densidad del gas y la temperatura de rocío.

Se recomienda regular la cantidad de hidrocarburos con tres carbonos y más en términos de volumen o especificar el método de medición de dicha variable.

Tabla 33. Tabla comparativa entre normatividad nacional e internacional sobre composición del Gas Natural

Propiedad o compuesto	Unidad	NFPA 52	DIN 51624	US EPA	CARB	ECE R83	Norma Ecuatoriana	SAE J1616	Norma Colombia CREG 071 de 1999	NTC 4826 ^e
					Referencia	G20 ^b G25 ^c				
Metano	% en vol	-	> 80	> 89	90.0 ± 1 > 88	> 99 84 - 88	> 80	-	-	-
H2S	mg/m3	< 23	< 5	-	-	<50 <50	< 6.1	< 22.89	< 6	6 máx. Azufre < 120
Agua	mg/m3	< 110	< 40	-	-	-	< 65	-	< 97	Libre



Propiedad o compuesto	Unidad	NFPA 52	DIN 51624	US EPA	CARB	ECE R83	Norma Ecuatoriana	SAE J1616	Norma Colombia CREG 071 de 1999	NTC 4826 ^e
CO ₂	% en vol	< 3	< 2	-	-	-	< 3.0	< 3	< 2	< 2
Nitrógeno	% en vol	-	< 15	-	-	12 a 16	< 5.0	-	< 3	-
Gases inertes ^a	% en vol	-	< 15	< 4	3.5 ± 0.5 < 1	-	< 5.0	-	< 3	-
Oxígeno	% en vol	< 0.5	< 3	< 0.6	0.5 < 1	-	< 0.2	-	< 0.10	< 0.5
Etano	% en vol	-	< 14	< 4.5	4.0 ± 0.5 < 6	-	-	-	-	-
Hidrocarburos de C3 o superiores	% en vol	-	C3:5 C4:2 C5:1 ≥C6:0.5	< 2.3	2.0 ± 0.3 1.5 a 4.5	-	< 0.0045	< 1	0	< 0.0013 (13 ml/m ³)
Polvos y material en suspensión	-	-	-	-	-	-	-	partículas < 5µm	1.6 mg/m ³ , partículas < 15µm	1.6 mg/m ³ , partículas < 15µm
Odorante	% en vol	Si	-	Si	-	-	-	1% aprox	si	Según ISO 13134
Poder calorífico superior	MJ/m ³	-	> 46	-	-	-	35.42 a 43.12 MJ/m ³	-	35.4 a 42.8 MJ/m ³	-
Índice de Wobbe	MJ/m ³	-	-	-	-	-	45.8 a 50.6	48.5 a 52.9	-	44.6 a 54
Densidad	Kg/m ³	-	0.72 a 0.91	-	-	-	-	-	-	-
Número de Metano		-	> 70	-	-	-	-	-	-	-
Temperatura de rocío	°C	-	-	-	-	-	-	5.6 ^d	< -2	-
Temperatura de entrega	°C	-	-	-	-	-	-	-	7.2 - 49	-

^a El Nitrógeno y el dióxido de Carbono se incluyen dentro de los gases inertes, en la normatividad colombiana también se incluye el oxígeno.

^b G20 - Gas de alto poder calorífico

^c G25 - Gas de bajo poder calorífico

^d 5.6°C por debajo de la temperatura de bulbo seco mensual más baja

^e Basada en la normatividad ISO 15403-1 : 2006

Fuente. Elaboración propia



5.4.2 Calidad del gas natural comercializado en Colombia

Los reportes enviados a Ecopetrol por las refinerías presentan valores de composición del Gas Natural y de tres propiedades según su procedencia: la gravedad específica, el poder calorífico y la densidad. Las propiedades pueden compararse solamente con la resolución 071 de 1999 para uso residencial y no con la normatividad técnica NTC 4826 porque esta última no establece límites sobre dichas propiedades.

El contenido mínimo de metano entregado está en el gas de Guepajé con un valor de 96.4% en volumen. Todos los gases cumplen la normatividad internacional en composición de metano.

El contenido de Nitrógeno del gas Guepajé y gas Ballena están encima de los límites internacionales de las normas DIN 51624 y la norma ecuatoriana, en la norma Colombiana no se encuentra un límite máximo permisible de composición de Nitrógeno.

El contenido de dióxido de carbono, etano, propano, hidrocarburos más pesados, agua azufre y oxígeno del gas natural colombiano cumple con todas las normatividades internacionales.

En referencia a los límites de las propiedades, el poder calorífico es menor al límite permitido por la norma DIN 51624. Para el caso del gas Cusiana, se encuentra que el contenido de metano es cerca de un 17% menor en comparación a los otros gases del país, aumentando su cantidad de etano y propano, incumpliendo las normatividades internacionales para aplicaciones vehiculares de gas natural, en especial en la regulación del contenido de etano y propano, ya que sale de los límites pudiendo causar daños por su condensación en los tanques de almacenamiento, en referencia al poder calorífico, no se tuvo en cuenta en el análisis porque no se especifican las unidades en las que está medido.

Tabla 34. Composición de gas natural según refinería

COMPONENTE	Fórmula	GAS ARIANA ^c	GAS GUEPAJE ^d	GAS BALLENA ^e	GAS LA CRECIENTE ^f	GAS CUSIANA ^g
Metano	CH ₄	98.8327	96.4189	98.0461	97.0474	82.74
Nitrógeno	N ₂	0.6184	26,342	15,099	2,295	0.5424
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.1142	0.1174	0.0787	0	1.8415
Etano	C ₂ H ₆	0.2903	0.6407	0.2581	0.3991	9.98
Propano	C ₃ H ₈	0.0532	0.0448	0.0604	0.1124	3.639
Agua	H ₂ O	0	0	0	0	-
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0	0	0	0	-
Hidrógeno	H ₂	0	0	0	0	-



COMPONENTE	Fórmula	GAS ARIANA ^c	GAS GUEPAJE ^d	GAS BALLENA ^e	GAS LA CRECIENTE ^f	GAS CUSIANA ^g
Monóxido de Carbono	CO	0	0	0	0	-
Oxígeno	O2	0	0	0	0	-
i-Butano	C4H10	0.0314	0.0652	0.0177	0.0856	0.53677
n-Butano	C4H10	0.0087	0.0341	0.0079	0.0224	0.54302
i-Pentano	C5H10	0.0112	0.0229	0.0061	0.015	0.08882
n-Pentano	C5H10	0.0027	0.0183	0.0013	0.005	0.08882
n-Hexano	C6H14	0.0372	0.0035	0.0138	0.0243	0.03044
n-Heptano	C7H16	0	0	0	0	-
n-Octano	C8H18	0	0	0	0	-
n-Nonano	C9H20	0	0	0	0	-
n-Decano	C10H22	0	0	0	0	-
Helio	He	0	0	0	0	-
Argón	Ar	0	0	0	0	-
	Total	100,000	100,000	100,000	100,000	
PROPIEDADES						
Gravedad Específica ^a		0.5698	0.5727	0.5727	0.5698	0.67850
Poder Calorífico ^b (BTU/pe ³ – MJ/m3)		994.3 37.04	990.2 36.89	996.9 37.142	994.3 37.04	“1.14788” (no se especifican unidades)
Densidad (kg/m3)		0.6947591	0	0.6882172	0.6947591	0.05180
^a La gravedad específica real de la mezcla, a condiciones estándar.						
^b El poder calorífico bruto real de la mezcla, (@Pb y Tb), a 14.65 psia y 60°F						
^c Estos parámetros aplicarán a partir del 1 de Agosto de 2014						
^d Estos parámetros aplicarán a partir del 1 de Febrero de 2012						
^e Estos parámetros aplicarán a partir del 1 de Agosto de 2014						
^f Estos parámetros aplicarán a partir del 1 de Agosto de 2014						
^g Valores promediados desde el 1 de enero de 2014 hasta el 30 de septiembre de 2014 según reporte de TGI –Cromatografías específicas para gas Cusiana Apiay.						
Fuente. Boletín Electrónico de Operaciones BEO PROMIGAS. 2014. Composición gas Ariana, gas Ballena, gas Guepajé, gas la Creciente. www.promigas.com						



5.5 DIFERENCIAS EN REGULACIÓN EN LA COMPOSICIÓN DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO

5.5.1 Comparación entre normatividad nacional e internacional para la composición de GLP

La composición del Gas Licuado de Petróleo para aplicaciones industriales o residenciales está dada principalmente por una mezcla de propano y butano, limitados en la mezcla de pentanos. Para aplicaciones vehiculares las restricciones se hacen desde los componentes asociados al butano.

La normatividad nacional NTC 2303 correspondiente a la composición y propiedades en GLP está basada en la norma ASTM D1835, en la cual no hay una especificación directa en relación con los límites en el octanaje del GLP, por tanto pueden haber valores muy bajos y no tener un rendimiento óptimo en motores de combustión interna, no hay especificación en el contenido de compuestos asociados a cadenas de 3 carbonos y 4 carbonos.

En comparación a los estándares japonés e inglés se encuentra que la normatividad nacional tiene límites más estrictos en el contenido permisible de propano y en la presión de vapor máxima permisible, además controla directamente la composición de butano e hidrocarburos mayores. En la Tabla 35 se muestra la comparación entre los valores de las propiedades y componentes en normatividad nacional e internacional

En la norma ASTM 2598 o en la EN 596 se encuentra el procedimiento para calcular el número de octano a partir de la composición de etano, propano, propileno, n- butano, iso-butano, butilenos y pentano.

Se recomienda incluir métodos de detección del contenido de hidrocarburos en el GLP, limitar la densidad del GLP, adicionalmente asociar un método de cálculo del número de octano y generar un límite mínimo permisible para aplicaciones vehiculares.

Tabla 35. Tabla comparativa entre normatividad nacional e internacional sobre composición en GLP

Propiedad o compuesto	unidades	NTC 2303 ^a - Propano para aplicaciones especiales	BS EN 589:2004	JIS K2240-91
Número de octano		-	> 89	-



Propiedad o compuesto	unidades	NTC 2303 ^a - Propano para aplicaciones especiales	BS EN 589:2004	JIS K2240-91
Contenido de propano + propileno	% molar	-	-	N° 1: > 90% N° 2: 50 a 90 N° 3: < 50% N° 4: < 10%
Contenido de butano + butileno	% molar	-	-	N° 1: < 10% N° 2: < 50% N° 3: 50 a 90 N° 4: > 90%
Contenido de butano y mayores	% en vol.	2.5	-	-
Temperatura de evaporado 95%	°C	< -38.3	-	-
Total de contenido de dienos (incluyendo 1.3 butadieno)	% molar	-	< 0.5	-
Contenido de propileno	% vol	< 5	-	-
H2S		Libre	libre	-
Contenido de azufre total	mg/kg	< 123	< 100	< 200
Corrosión de lámina de cobre		Clase 1	Clase 1	< 1 @ 40°C y 1h
Residuo de evaporación	mg/kg	0.05 ml/100 ml	< 100	-
Presión vapor @ 40°C	kPa	< 1430	< 1550	< 1550
Presión vapor mínima de 150 kPa a una temperatura de	°C	-	Grado A: -10 Grado B: -5 Grado C: 0 Grado D: 10	-
Contenido de agua		libre	libre	-
Contenido de metanol	mg/kg	libre	< 2000	-
Odorante		-	notorio al 20% del límite de inflamabilidad inferior	-
Densidad @ 15.6 °C	g/cm3	-	-	0.5 a 0.62

^a La NTC 2303 (primera actualización) es equivalente a la norma ASTM D1835, los valores tomados son los enunciados en la columna llamada propano para uso especial.

Fuente. NTC 2303 (Primera actualización)

Fuente. Clearing the air A Technical guide on Autogas. World LP Gas Association. 2002



5.5.2 Calidad del GLP comercializado en Colombia

De acuerdo a los datos obtenidos en relación a la composición y propiedades del Gas Licuado de Petróleo en las diferentes refinerías del país, se encuentra que no se realiza un análisis de compuestos específicos como por ejemplo en %C3 tener de forma independiente el propano y el propileno, por tanto no se puede analizar el contenido de hidrocarburos en comparación a las normas existentes, debido a que éstas regulan componentes como el propileno, el butileno, los butadienos e hidrocarburos de cadenas de carbono mayores.

En relación a los límites normativos de las propiedades, la densidad está dentro del rango permisible por la normatividad EN 589:2004. Se recomienda incluir este parámetro dentro de la normatividad nacional.

El poder calorífico no está limitado en la normatividad colombiana ni internacional. Se regula el octanaje equivalente según los hidrocarburos que componen el Gas Licuado de Petróleo.

Tabla 36. Calidad del GLP en Colombia

	Barrancabermeja		Apiay		Cusiana		Cartagena	
Año	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
%C1 y C2	1	0	1	0	3	2	0	0
%C3	22	14	55	54	49	52	61	60
%C4	76	85	44	45	48	45	39	40
%C5 y más	1	0	0	0	1	0	0	0
Densidad relativa	0.57	0.58	0.5378	0.5378	0.536	0.5343	0.53	0.53
Densidad (kg/gal - gr/cm3)	2.1687 0.559	2.1784 0.562	2.0334 0.524	2.0334 0.524	2.0266 0.522	2.0201 0.521	2.0169 0.520	2.0154 0.520
Poder calorífico (BTU/lb – MJ/kg)	20902 48.6	20984 48.8	21222 49.35	21285 49.5	21325 49.59	21334 49.61	21306 49.54	21307 49.55
Poder calorífico (BTU/kg)	46081	46261	46785	46924	47013	47032	4697	46974
Poder calorífico (BTU/gal)	99937	100773	9513	95414	95275	95011	94735	94671



Barrancabermeja	Apiay	Cusiana	Cartagena
-----------------	-------	---------	-----------

Fuente. UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. 2013.

5.6 ANÁLISIS DEL ALCANCE DE LA NORMATIVIDAD NACIONAL APLICADA A VEHÍCULOS A GAS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS TECNOLOGÍAS EVALUADAS

En general la normatividad está enfocada en los siguientes aspectos

1. Calidad del combustible
2. Emisiones de los vehículos
3. Instalación de los kits y especificaciones de los componentes.

Las calidades de los combustibles nacionales, bien sea de gas natural o gas licuado del petróleo, son satisfactorias y cumplen con las recomendaciones tanto de los fabricantes de motores o kits, así como de las asociaciones de comercialización de gases.

Los gases evaluados en los diferentes vehículos en este estudio cumplieron con las especificaciones mínimas de los proveedores de la tecnología. En cuanto al único motor dedicado a GNV evaluado, el fabricante exigía un porcentaje mínimo de metano del 72%, lo que se garantiza con los diferentes gases de Colombia.

En cuanto a los kits, los fabricantes no exigen un porcentaje mínimo de metano, ya que un vehículo diésel que opere en forma dual, siempre compensará un combustible con el otro. Allí, lo más importante es la electrónica del kit que garantice la operación confiable del motor, dentro de temperaturas normales y sin riesgos de detonación.

En referencia a los motores evaluados con gas licuado del petróleo, en general el GLP cumplió con las normas internacionales para la calidad de éste en el sector automotor. Los kits duales o las transformaciones a operación GLP de vehículos con motor a gasolina, fueron básicos, sin electrónica de respaldo que garantizará una operación óptima y eso se ve en los resultados de eficiencia y emisiones.

En este estudio fueron evaluados seis vehículos, tres con tecnologías a gas natural vehicular y tres con tecnologías a gas licuado del petróleo.

Los vehículos con gas natural, uno con motor dedicado original de fábrica, otro transformado por un proveedor local que originalmente operada en ciclo diésel y se convierte para gas



natural, y otro con un kit dual diésel-gas natural, mostraron resultados bien diferentes que deben ser incluidos en la normatividad nacional.

En cuanto al motor dedicado, cumplió con las expectativas, valores bajos de material particulado, monóxido de carbono, e hidrocarburos sin quemar, entre otros, mientras que mantuvo una buena eficiencia de combustión y su rendimiento muy similar o incluso superior a sus similares diésel.

El transformado y el convertido a dual, no arrojaron resultados positivos y las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar se aumentaron dramáticamente. Para el vehículo transformado, esto se puede subsanar con un catalizador, mientras que para el dual, el reto es más grande ya que los catalizadores para reducción de hidrocarburos y monóxido de carbono, no son fáciles de desarrollar en motores diésel. Pesa también la eficiencia de estas dos tecnologías, que no resulta competitiva.

En cuanto a los vehículos con tecnologías a GLP, se evaluaron dos vehículos transformados (originalmente vehículos a gasolina) y uno vehículo diésel en operación dual. Ninguno de estos vehículos logró tener resultados positivos en emisiones, o en desempeño, debido a la baja tecnología usada en las conversiones y al estado de mantenimiento de los vehículos.

La evaluación de los vehículos en Colombia con tecnologías a gas, mostró que no existe normatividad para la instalación de kits en motores diésel. La normatividad colombiana está enfocada hacia la conversión de motores a gasolina con kits de gas natural vehicular, sin embargo, para la operación de un vehículo en forma dual o incluso para la operación de un vehículo con GLP, se debe implementar normas y estándares para los kits, el personal que realice las instalaciones, los talleres donde se realicen dichas instalaciones, los niveles de emisiones que se deben exigir a los vehículos convertidos o adaptados con kits, y las inspecciones obligatorias a que deben ser sometidos estos vehículos periódicamente para garantizar su seguridad, entre otros.

Para motores dedicados bien sea a gas natural o gas licuado del petróleo, las normas y estándares son similares a las emitidas o existentes para motores a gasolina o diésel. En este caso, la homologación deberá hacerse de acuerdo a lo exigido por el Ministerio de Transporte y el Ministerio del Medio Ambiente y los niveles de emisiones que deben ser revisados periódicamente, serán los mismos que para los motores a gasolina, esto es, hidrocarburos y monóxido de carbono en ralentí y velocidad de crucero. Se sugiere adicionalmente, que se cambie la forma de medir los hidrocarburos, y éstos midan los hidrocarburos metánicos para garantizar que el control de emisiones se realice adecuadamente para el combustible que se usa.



5.7 ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA NORMATIVIDAD NACIONAL RELATIVA A LA CALIDAD DEL GAS NATURAL VEHICULAR Y EL GAS LICUADO DE PETRÓLEO

La calidad del gas natural y del gas licuado del petróleo colombiano cumplen con los estándares internacionales para ser usados como combustibles vehiculares. A partir de los resultados de las pruebas llevadas a cabo en seis vehículos de diversas tecnologías que utilizan GNV y GLP, como parte de este estudio, se concluye que el uso de vehículos con motores dedicados es la mejor alternativa.

Los motores dedicados que vienen originales de fábrica son dispositivos confiables, eficientes, seguros, y con alta tecnología. Son sistemas que se configuran adecuadamente para reducir las emisiones y mejorar el desempeño energético. Por lo tanto, intrínsecamente el uso de motores dedicados conlleva a un cumplimiento estricto de los estándares de emisiones y la normatividad debe garantizar que la calidad de los combustibles gaseosos esté acorde con los requerimientos de la tecnología para su óptimo funcionamiento.



6. RECOMENDACIONES

El estudio de la normatividad nacional e internacional permite hacer las siguientes recomendaciones:

1. Promover procesos de investigación y desarrollo de técnicas para lograr la transformación de motores diésel a motores de ciclo Otto para operación con GNV o GLP.
2. Promover la inclusión del contenido máximo de nitrógeno y el contenido mínimo de metano en las normas colombianas relativas a la calidad del GNV.
3. Generar un proceso de desarrollo de una Norma Técnica Colombiana para regular la calidad del GLP a ser utilizado como combustible vehicular con sistemas de inyección y en motores duales diésel-GLP. La norma debe incluir específicamente el valor mínimo de octanaje que debe tener el GLP – así como su método de cálculo – y su contenido de hidrocarburos de 3 y 4 carbonos. Se recomienda también incluir los métodos de detección del contenido de hidrocarburos en el GLP y limitar su densidad.
4. Adoptar la normatividad ASTM e ISO para definir la calidad del GLP para uso como combustible vehicular.
5. Reevaluar los consumos energéticos y emisiones las tecnologías de GLP, en tecnologías más modernas que las actualmente disponibles en Colombia, que ya son obsoletas.



GLOSARIO

CO: Monóxido de Carbono

NMHC: Hidrocarburos sin quemar sin incluir metano

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

PM o MP: Material particulado, cuando incluye subíndice, el número indica el tamaño de partícula en micrómetros.

CH₄: Metano

NP: Número de partículas

THC: Hidrocarburos sin quemar totales.

HHV: Higher Heating Value (Poder Calorífico Superior).

LHV: Lower Heating Value (Poder Calorífico Inferior).

GNC: Gas Natural Comprimido

GNL: Gas Natural Licuado

GLP: Gas Licuado de Petróleo

GAL: Gas a Líquido

MCI: Motor de Combustión Interna

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

PMS: Punto Muerto Superior



PMI: Punto Muerto Inferior

MAP: Manifold Absolute Pressure (Presión Absoluta en el Múltiple)

TPS: Throttle Position Sensor (Sensor de Posición de la Mariposa)

IAC: Idle Air Control (Control de Aire en Ralentí)

ECU: Engine Control Unit (Unidad de Control del Motor)

ESC: Ciclo estacionario Europeo

ETC: Ciclo Transciente Europeo

ELR: Ciclo de respuesta de carga Europea.

SFC: Consumo específico de combustible

OEM: Fabricante de equipamiento original.

GDE: Galones de diésel equivalentes

LHDDE: Motor diésel liviano para carga pesada

MHDDE: Motor diésel mediano para carga pesada

HHDE: Motor diésel pesado para carga pesada



BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Renewable Energy Laboratory. NREL. R. BARNIT, K. CHANDLER. In-use Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses at New York City Transit. 2008. Copyright © 2008 SAE International.
- [2] CONVENIO 013 DE 2013. Secretaría Distrital de Ambiente y Universidad Nacional de Colombia, 2013
- [3] Andrew C. Polk, Chad D. Carpenter, Kalyan Kumar Srinivasan, Sundar Rajan Krishnan. An investigation of diesel-ignited propane dual fuel combustion in a heavy-duty diesel engine. ELSEVIER. 2014
- [4] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente. Pruebas de validación, eficiencia energética y emisiones contaminantes sobre vehículo dedicado a combustible gas natural euro 6 SCANIA. Realizado para Scania Colombia/ Gas Natural Fenosa SA ESP. 2014.
- [5] SAE J1616. Recommended Practice for Compressed Natural Gas Vehicle Fuel. Issued Feb 1994.
- [6] S. Mokhtab, W. Poe, J. Speight. Handbook of Natural Gas transmission and Processing. Elsevier. 2006.
- [7] Julio Pérez, Manuel Cabarcas, Jesús Archila, Yamil Yubran. 2005. Potencial de la tecnología “Gas To Liquids –GTL” en Colombia. CIGP – Universidad Industrial de Santander, Ecopetrol S.A. Gerencia regional sur, Neiva – Huila.
- [8] José R. Freire. 2013. Usos del gas natural en el transporte. Gas Natural Fenosa (España)
- [9] BIPHASE TECHNOLOGIES. Liquid propane Electronic fuel injection LPEFI[®] – General Diagnostic Manual. 2014
- [10] Jorge Díaz. 2006. Gas Natural Licuado, Tecnología y mercado. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”. Trabajo de investigación.
- [11] Indian Auto LGP. 2008. Booklet OnSafe Practices/Check list. Pg 20. LPG Installation – schematic diagram.
- [12] ASOCIACIÓN EUROPEA DEL GPL. 2009. El Autogás en Europa, La alternativa sostenible
- [13] Landi Renzo. <http://www.landi.it/> Revisada el 7 de julio de 2014
- [14] Landi Renzo Diesel Metano <http://www.dieselmetano.it/it/index.php> Revisada el 7 de julio de 2014
- [15] Landi Renzo – Bay tech. <http://www.landiusa.com/baytech> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [16] American Power Group Inc. <http://americanpowergroupinc.com/about-dual-fuel/technology> Revisada el 7 de Julio de 2014



- [17] NGV Motori USA. <http://www.ngvus.com/index.php> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [18] Omnitek Engineering Corp. <http://www.omnitekcorp.com/dng.htm> Revisada el 7 de Julio de 2014.
- [19] Clean Fuel USA. <http://www.cleanfuelusa.com/> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [20] Roush Clean Technologies. <http://www.roushcleantech.com/content/fuel-system-overview>
- [21] PEMEX. <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>. Revisado el 13 de Julio de 2014
- [22] NATURGAS. http://www.naturgas.com.co/htms/contenido-colombia-sigue-en-el-top-10-de-transporte-a-gas-natural-vehicular_367.html Revisada el 7 de Julio de 2014
- [23] PERIÓDICO EL HERALDO. Abril 2014. <http://www.elheraldo.co/economia/promigas-construye-planta-de-gas-natural-licuado-149343> Revisado el 9 de julio de 2014
- [24] PERIÓDICO EL TIEMPO. Abril 2014. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13870216> Revisado el 9 de Julio de 2014
- [25] INDIAN AUTO LGP COALITION. http://www.iac.org.in/4-wheelers-conversion.php.fecha_de_consulta_02/07/14 Revisado el 9 de Julio de 2014
- [26] Azqueta D. y Ferreiro A. Análisis Económico y Gestión de Recursos Naturales. Alianza Editorial. Madrid, España, 1994.
- [27] García, L et al. Evidencia empírica de poder de mercado en industrias minoristas de Gas Natural Vehicular. Simposio de Microeconomía Aplicada, 2012.
- [28] IGU (International Gas Union). “Natural Gas for Vehicles (NGV)”, Report on Study Group 5.3, IGU, 2009.
- [29] IEA. Medium Term Oil and Gas Markets, 2010.
- [30] Michiel Nijboer. The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport. Working Paper, International Energy Agency, 2010.
- [31] Mokate K. Evaluación Financiera de Proyectos de inversión. Alfaomega. Bogotá. Colombia, 2005.
- [32] Natural Gas Vehicles for America. The Status and Future of the Natural Gas Vehicles Market. Alternative Fuel Vehicle Conference, 2012.
- [33] Saldarriaga, C. A. et al. Análisis Costo- Beneficio del Programa de Gas Natural Vehicular Aplicado en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Revista Gestión y Ambiente. Volumen 14 - No. 1, Mayo de 2011, Medellín ISSN 0124.177X, 2010. pp 143-150.
- [34] UPME. La Cadena del Gas Natural en Colombia, 2006.
- [35] UPME. Proyección de Demanda de Energía del Sector Transporte Terrestre, 2010a.
- [36] UPME. Proyección De Demanda De Gas Natural En Colombia, 2010b.



- [37] UPME. Proyecciones De Precios De Gas Natural y Combustibles Líquidos Para Generación Eléctrica, 2012.
- [38] World Energy Outlook, 2009.
- [39] K CHEENKACHORN. Performance and emissions of a heavy duty diesel engine fuelled with diesel and LNG. 2013. ELSEIVER.
- [40] N. C. SURAWSKI. Performance and gaseous and particle emissions from a liquefied petroleum gas (LPG) fumigated compression ignition engine. 2014. ELSEIVER.
- [41] E. R. YAYARATNE. Particle and gaseous emissions from compressed natural gas and ultralow sulphur diesel-fuelled buses at four steady engine loads. 2009. ELSEIVER
- [42] B. B. SAHOO. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual fuel gas diesel engines – A critical review. 2009. ELSEIVER.
- [43] Arroyo, A. La Argentina y el Estado Plurinacional de Bolivia, más que partícipes de una frontera común. Serie Recursos Naturales. CEPAL, Naciones Unidas, 2013.
- [44] Brown, S. & Yücel, M. What Drives Natural Gas Prices? Federal Reserve Bank Of Dallas, Research Department, Working Paper 0703, 2007.
- [45] Huntington, G. Industrial Natural Gas Consumption in the United States: An Empirical Model for Evaluating Future Trends. Energy Modeling Forum, Stanford University, Energy Economics, 2006.
- [46] Kozulj, R. Análisis de formación de precios y tarifas de gas natural en América del Sur. Documento de Proyecto. CEPAL, Naciones Unidas, 2012.
- [47] UPME. La Cadena del Gas Natural en Colombia, 2006.
- [48] UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo 2013, 2013.
- [49] UPME. Proyecciones de precios de gas natural y combustibles líquidos para generación eléctrica febrero de 2012, 2012.
- [50] Villar, J. & Joutz, F. The Relationship Between Crude Oil and Natural Gas Prices. EIA manuscript, 2006.
- [51] BEO PROMIGAS. 2014. Composición gas Ariana, gas Ballena, gas Guepaje, gas la Creciente. www.promigas.com
- [52] BEO Transportadora de Gas Internacional. 2013
- [53] WORLD LP GAS ASSOCIATION. 2002. Clearing the air, A Technical guide on Autogas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y
Protección del Medio Ambiente
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede
Bogotá D.C.
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:
gruicte_bog@unal.edu.co

ANEXOS

Anexo A. Listado de normas técnicas colombianas GNV-GLP