



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano

Mauricio Gabriel Chaparro Giglio Cobuzio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía
Medellín, Colombia

2015

Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano

Mauricio Gabriel Chaparro Giglio Cobuzio

Trabajo final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Maestría en ingeniería – Maestría en Ingeniería de Petróleos.

Director:

Ph.D., Pedro Nel Benjumea Hernández

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2015

A mis padres, Adalgiza y Nicolás, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi hermano Sergio, por sus enseñanzas y compañía.

A mi novia Paula, por todo su amor, comprensión y apoyo.

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: La voluntad

Albert Einstein

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA por su invaluable órgano docente; A mi compañero al ingeniero de petróleos Ricardo Andrés Pastrana Cruz, por sus importantes aportes y discusiones durante la realización de este trabajo.

A las compañías Ecopetrol.S.A y Equion Energy limited que fueron fuente de consulta, ánimo y excelente compañía. Por esos invaluable aportes en el desarrollo de éste trabajo. A mi novia y a todos mis amigos por el constante apoyo.

Finalmente, mis más sinceros agradecimientos, al director de la tesis PH. D. Pedro Nel Benjumea Hernández, quien ha sido uno de mis mejores profesores a lo largo de mi formación, y hacia el cual solo tengo palabras de afecto, agradecimiento y admiración.

Resumen

Es bien conocido que parte de la contaminación atmosférica global es debido al uso de combustibles derivados del petróleo en los vehículos automotores, que promueven principalmente emanaciones de óxidos de carbono, nitrógeno y otros compuestos volátiles perjudiciales al ambiente; sin embargo, en los últimos años ha crecido una gran expectativa en la implementación del gas licuado de petróleo como un combustible alternativo e incluso de transición hacia otras fuentes de energía automotriz más amigables (sin aportes de compuestos de carbono) al medio ambiente, siendo tema de debate en la literatura en forma experimental, modelamiento y simulación sobre el rendimiento y eficiencia del motor en su implementación. En el presente, no existe una reglamentación o normativa de la calidad del combustible producido en refinería, estándares de conversión de vehículos con gasolina hacia el uso del GLP ni estrategias o diseños de estaciones de servicio con capacidad de proveer el combustible en nuestro país. En este trabajo se propone el diseño y normativas para la conversión de vehículos automotores con gasolina hacia el uso del GLP, estaciones de servicio y establecimiento de un estándar de calidad del GLP para su uso en vehículos automotores colombianos. De lo anterior, se pretende evidenciar las variables de calidad y propiedades fisicoquímicas que garanticen un alto rendimiento de los vehículos en territorio colombiano, establecimiento de las especificaciones técnicas en vehículos y estaciones de servicio para la implementación del combustible y comparación de emisiones del uso del GLP con respecto a la gasolina.

Palabras clave: *GLP, automóviles, calidad, gas licuado de petróleo, estación de servicio, normativas*

Abstract

It is well known that part of the overall air pollution is due to use of fuels with a high content of aromatic and aliphatic compounds in motor vehicles, which promote mainly emissions of carbon oxides, nitrogen oxides and other volatile compounds harmful to the environment; however, in recent years it has grown a great expectation in the implementation of LPG as an alternative fuel and even transition to other sources of more friendly automotive power (without contributions of carbon compounds) into the environment, being subject of discussion in the literature on experimental, modeling and simulation on performance and engine efficiency in its implementation. At present, there is no regulation of fuel quality produced in refinery, conversion standard gasoline vehicles to use LPG or service stations designs capable of providing fuel in our country. This thesis proposes the overall design and policy automotive for converting gasoline vehicles to use LPG, design and safety regulations to implement the supply of LPG in current service stations and establish a quality standard LPG automotive for use in vehicles. From the foregoing, it is intended to demonstrate the quality variables and physicochemical properties that guarantee high performance vehicles in Colombia, establishment of technical specifications in vehicles and stations for the implementation of fuel and comparing emissions from the use of LPG with respect to gasoline.

Keywords: *GLP, cars, quality, liquefied petroleum gas, service station, regulations*

Contenido

	Pág.
1. Generalidades	21
1.1 Composición química.....	21
1.2 Obtención del GLP	22
1.2.1 Obtención del GLP mediante rompimiento catalítico del petróleo.....	22
1.2.2 Separación del GLP de los líquidos del gas natural	26
2. Esquema y funcionamiento de automóvil usando GLP	30
2.1 Características del motor de combustión de interna	31
2.1.1 Combustión y ciclo termodinámico	32
2.1.2 Combustible	34
2.1.3 Implementación del GLP en vehículos automotores	37
2.2 Comparación de los vehículos con GLP y gasolina.....	44
2.2.1 Medio Ambiente	44
2.2.2 Rendimiento y autonomía.....	48
2.2.3 Equivalencia energética o autonomía teórica entre combustibles	52
3. Especificaciones de calidad	58
3.1 Determinación de las variables de calidad del GLP	58
3.1.1 Efectos en la calidad del GLP a causa de contaminantes.....	64
3.2 Reglamentación de especificaciones de calidad del GLP para uso automotor ..	68
3.2.1 Normatividad Internacional	70
3.2.2 Normatividad Nacional.....	77
3.3 Reglamentación de equipos y accesorios con GLP en vehículos automotores..	80
3.3.1 Normatividad de vehículos con GLP internacional	80
3.3.2 Normatividad nacional de vehículos con GLP	84
4. Esquema y normativa de estaciones de servicio de GLP	87
4.1 Normativa internacional de estaciones de servicios de GLP para uso automotor	88
4.2 Normativa nacional de estaciones de servicios de GLP para uso automotor	95
4.3 Diseño y aprobación de estación de servicio de GLP	97
4.4 Ubicación de estación de servicio de GLP	98
4.5 Diseño de estación de servicio de GLP.....	101
4.6 Instalación de equipos de estación de servicio GLP	110
4.7 Pruebas y puesta en marcha de estación de servicio GLP	113
4.8 Operación de la estación de servicio de GLP.....	117

5. Estándar de especificaciones del GLP en caso colombiano	122
5.1 Contexto histórico nacional del GLP	122
5.2 Estándar de especificaciones de calidad del GLP para uso automotor en Colombia	127

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Demanda de energía global en toneladas de petróleo equivalente (International Energy Outlook. 2012).	17
Figura 1-1. Mayores constituyentes del GLP (Dennis., 2002).	21
Figura 1-2. Diagrama simplificado de proceso de una refinería (Totten et al., 2003).	24
Figura 1-3. Reactor catalítico para el rompimiento catalítico del petróleo (Totten et al., 2003).	25
Figura 1-4. Diagrama de procesos de obtención del GLP a partir de los productos del rompimiento catalítico del petróleo (Totten et al., 2003).	26
Figura 1-5. Diagrama de planta de procesos de separación del GLP a partir del gas natural (New Zealand Institute of chemistry. 2008).	30
Figura 2-1. Motor de combustión interna de encendido por chispa eléctrica (A) y principales componentes del proceso de combustión (B) (GoTek Energy. 2013).	31
Figura 2-2. Ciclo Otto. (Wu., 2007).	34
Figura 2-3. Diagrama de presión-volumen del Ciclo Otto. (Wu., 2007).	34
Figura 2-4. Pistón destruido por continuas detonaciones prematuras de gasolina en un motor de combustión interna de encendido por chispa eléctrica. (SAE International. 2004).	36
Figura 2-5. Diagrama de proceso de automóvil con suministro híbrido de GLP-Gasolina. (UNAL., 2014).	40
Figura 2-6. Depósito de GLP y accesorios (Indian Auto LPG Coalition. 2008).	42
Figura 2-7. Sistema de suministro de GLP vehicular. a) Regulador-vaporizador, b) Mezclador Venturi, c) Válvula de corte de combustible de cierre automático y d) Conmutador. (Indian Auto LPG Coalition. 2008).	43
Figura 2-8. Sistema de control de GLP vehicular. a) Emulador, b) Acelerador de motor y c) Sistema de control LAMBDA (ECU) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).	44
Figura 2-9. Gráfica de factor de emisiones de CO, NO y HC en taxis con respecto a la velocidad instantánea del vehículo (Ning, Z., & Chan, T. L. 2007).	46
Figura 2-10. Variaciones en las emisiones de CO, CO ₂ y HC en un motor de combustión interna de ignición con chispa (Ceviz & Yuksel., 2006).	48
Figura 2-11. Variación de la temperatura del vaporizador-regulador y del refrigerante del motor (Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. 2015).	48
Figura 2-12. Rendimiento del motor con respecto al incremento de la temperatura del vaporizador-regulador (Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. 2015).	49
Figura 2-13. Grafica de torque (línea sólida) y potencia máxima (línea punteada) utilizando gasolina (triángulos) y GLP (diamantes=Tmed, cuadrados=Thot y Círculos=Tcold) (Masi, M. 2012).	50

Figura 2-14. Consumo de combustible específico (Línea sólida) y consumo de combustible en operaciones del GLP a diferente carga del motor (Línea punteada) (Masi, M. 2012).....	51
Figura 2-15. Consumo de combustible específico a carga máxima (Línea sólida) y consumo de combustible en operaciones del GLP a diferente carga (Línea punteada) (Masi, M. 2012).....	52
Figura 3-1. Objetivos del control de calidad en combustibles gaseosos (García et al., 1997).	59
Figura 3-2. Curvas de presión de vapor con respecto a la temperatura para propano y butano comercial (Dennis., 2002).....	62
Figura 4-1. Estación de servicio de GLP (EMSD. 2007).....	101
Figura 4-2. Dispensador de GLP (EMSD. 2007).....	107
Figura 4-3. Dispensador de GLP (EMSD. 2007).....	113
Figura 5-1. Infraestructura de transporte del GLP (UPME., 2005).....	126
Figura 5-2. Cálculos del MOM a distintas mezclas de GLP utilizando norma europea EN 589 (Watson, H.C., Fowdie, R.R., 2000).....	129
Figura 5-3. Presiones de vapor a distintas mezclas de GLP (Watson, H.C., Fowdie, R.R., 2000).	131
Figura 5-4. Equipo típico para medir la presión de vapor del GLP (Pinzon, N., 2010). ...	142
Figura 5-5. Válvula para indicar contenido de humedad en el GLP (Pinzon, N., 2010). .	144
Figura 5-6. Cilindro de prueba y baño para la prueba de corrosión del cobre (Pinzon, N., 2010).	145
Figura 5-7. Cilindro presurizado para el hidrómetro (Pinzon, N., 2010).....	147
Figura 5-8. Equipo de pre enfriamiento y tubo de centrifuga en forma cónica (Pinzon, N., 2010).	149
Figura 5-9. Equipo de pre enfriamiento y tubo de evaporación (Pinzon, N., 2010).....	151
Figura 5-10. Aparato experimental para detectar H ₂ S en el GLP (Pinzon, N., 2010).	152

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Tipos de hidrocarburos encontrados en refinerías (Totten., 2003).....	22
Tabla 1-2. Cortes del crudo por destilación (Totten., 2003).	24
Tabla 1-3. Productos del reactor catalítico (Totten et al., 2003).....	26
Tabla 2-1. Emisiones de buses con combustibles alternativos en Santiago de Chile (Faiz., 1996).	45
Tabla 3-1. Valores típicos de poderes caloríficos (Dennis., 2002).....	63
Tabla 3-2. Especificaciones del GLP. Norma GPA 2140:1997 (Fondonorma., 1998).....	72
Tabla 3-3. Reglamentación del GLP ASTM D 1835-97 (American Society for Testing Methods., 1997 & ICONTEC., 1998).....	73
Tabla 3-4. Reglamentación europea EN 589:2000 para el GLP vehicular (NEN., 2000)..	74
Tabla 3-5. Factores de octanaje específico para calculo MOM de la norma EN 589:2000 (NEN., 2000).	75
Tabla 3-6. GLP referencia en Europa (ALPGA., 1998).....	75
Tabla 3-7. Reglamentación de la CARB del GLP vehicular (Brasil., 1998).	76
Tabla 3-8. Reglamentación Japonesa del GLP (Japan LP Gas Association. (1969).....	77
Tabla 3-9. Especificaciones de calidad del GLP según normas Icontec., (1996).....	78
Tabla 3-10. Comparación entre normativa nacional e internacional sobre composición del GLP vehicular.	79
Tabla 3-11. Normatividad internacional aplicable a tecnología vehicular del GLP (UNAL., 2014).	84
Tabla 3-12. Comparación normativa de exigencias en componentes de sistemas de GLP (UNAL., 2014).....	86
Tabla 3-13. Comparación normativa sobre requerimientos de instalación para sistemas de GLP (UNAL., 2014).	87
Tabla 4-1. Distancia de separación de estaciones de suministro del GLP (EMSD. 2007).	99
Tabla 4-2. Distancia de separación de estaciones de suministro del GLP y gasolina/diésel (EMSD. 2007).	100
Tabla 4-3. Espaciamento de soportes para tubería en superficie (EMSD. 2007).....	111
Tabla 4-4. Áreas de clasificación en las estaciones de servicio de GLP (EMSD. 2007). ..	112
Tabla 5-1. Producción de GLP por fuentes de suministro (Unidad de planeación minero energética. 2013).	123
Tabla 5-2. Cromatografía del GLP de campo Cusiana (Leal., 2014).....	124
Tabla 5-3. Cromatografía del GLP producido en Barrancabermeja (Guzmán., 2006).....	124
Tabla 5-4. Calidad del GLP en Colombia entre el año 2011-2012 (UNAL., 2014).....	125

Tabla 5-5. Parámetros críticos y no críticos para la definición de la calidad del GLP vehicular.	127
Tabla 5-6. Nueva reglamentación del gas licuado de petróleo vehicular para Colombia.	136

Introducción

La demanda de energía en el mundo ha estado incrementándose significativamente al paso de las últimas décadas. Con expectativas de incremento en porcentajes mayores al 30% para los siguientes 25 años teniendo en cuenta nuevas políticas de consumo de energía. Por otro lado, fuentes de energía como la nuclear, eólica, hidráulica y otras alternativas renovables, han sido usadas y continuamente estudiadas para atender las necesidades energéticas del futuro. Sin embargo, debido a la baja eficiencia de generación de energía y a la viabilidad económica de sus aplicaciones, estas fuentes solo alcanzarán a reemplazar parte de la demanda de hidrocarburos en las siguientes décadas, tal como lo muestra la **Figura 1-1** (International Energy Outlook. 2012).

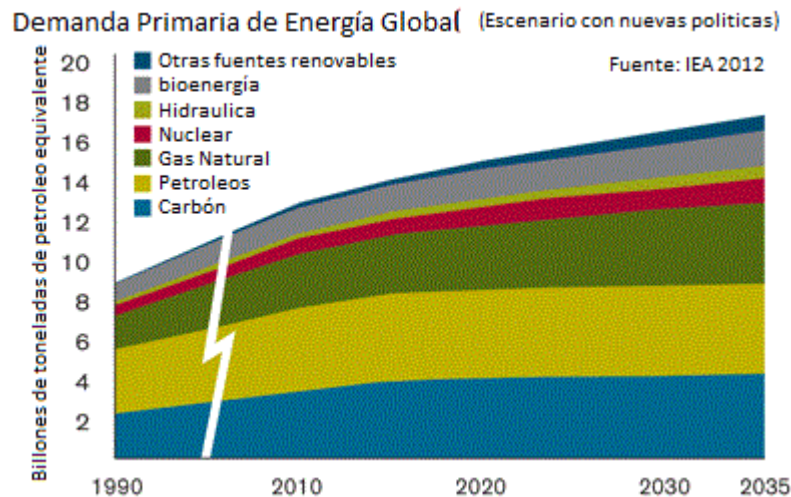


Figura 1-1. Demanda de energía global en toneladas de petróleo equivalente (International Energy Outlook. 2012).

Gran parte del consumo de energía a nivel mundial se debe a la necesidad de transportar productos y comunidades hacia zonas de alta demanda. Actualmente, cerca de un 60% del petróleo que se produce en el mundo se utiliza para producir el combustible de los sistemas de transporte. Lo anterior influye de manera negativa en el ambiente debido a la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera generados en la producción y combustión de dichos combustibles. Por tal motivo, el petróleo ha llegado a catalogarse como el segundo más grande emisor de gases de efecto invernadero en el mundo después del carbón (International Energy Agency., 2014). No obstante, estas fuentes de hidrocarburos empiezan a experimentar agotamiento en distintos países, y su disponibilidad en futuras décadas es incierta e inestable; incluso amenazando con la generación de monopolios en países asiáticos y americanos. Un ejemplo son los países que conforman la organización de países exportadores de petróleo (OPEP), en la cual se

prevé que a mediados de 2030 poseerán un 70% del petróleo disponible y un 45% total del mercado (Achnicht, Bühler, & Hermeling., 2012).

A partir de la expectativa de mercado y del medio ambiente se ha estado incrementado gradualmente la atención del público a través de los años en temas de cambio climático y el uso de energías alternativas de derivados de hidrocarburos más limpias en los vehículos de transporte masivo (Achnicht, Bühler, & Hermeling., 2012). Algunos países asiáticos como Corea del sur, Japón y China, en el orden de desarrollar sistemas de transporte amigables con el medio ambiente, poseen a la fecha buses de servicio público de pasajeros que trabajan con Gas Licuado de petróleo (GLP). Este tipo de combustible es especial, debido a que su composición parte de la mezcla de hidrocarburos livianos (C3-C4) y a que a temperatura ambiente es posible mantenerlo en forma líquida aplicando presiones moderadas, lo cual es beneficioso dado al aumento en la autonomía del vehículo con respecto al gas natural vehicular a las mismas condiciones ambientales. Además, dentro de sus características se destaca la reducción notable de concentraciones de compuestos aromáticos y azufrados de la gasolina comercial, que durante el proceso de combustión generan concentraciones altas de contaminantes que aumenten la carga química en la atmosfera terrestre significativamente. Por lo cual, el uso de este tipo de combustible puede ser vital para el proceso de transición en una menor dependencia de los combustibles poco amigables con el medio ambiente en los sistemas de transporte actuales.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el GLP como alternativa de combustible para automóviles en Colombia. Esto se hará teniendo en cuenta la definición de generalidades del GLP y calidad desde el punto de vista de sus propiedades fisicoquímicas a condiciones ambientales y de operación en los vehículos. Por otro lado, se explicará un breve contexto del proceso de producción, transporte y distribución (cadena de producción), efectos medio ambientales y diseño del vehículo automotor, de tal manera que el lector tenga una base de conocimiento con respecto al combustible y sus usos en el mundo. A continuación, se hará una breve comparación de las normativas nacionales e internacionales del combustible, y finalmente se buscará recomendar un estándar técnico de las propiedades que el GLP debe tener para su uso como combustible vehicular en Colombia.

Objetivos y alcances del trabajo final de maestría

Objetivo General

Recomendar especificaciones técnicas y normativas para la implementación del gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano.

Objetivos Específicos

- Especificar requerimientos del gas licuado de petróleo para su uso en los vehículos automotores en Colombia.
- Recomendar especificaciones técnicas para la implementación del gas licuado de petróleo en vehículos automotores en Colombia
- Recomendar normas de seguridad y suministro de Gas licuado de petróleo para vehículos en las estaciones de servicio.

Alcances del trabajo

En este trabajo se diseñarán las especificaciones técnicas del GLP que se debe usar en un vehículo automotor convencional en territorio colombiano. A su vez se pretende exponer las normativas de seguridad en el suministro del combustible y un diseño general de los equipos e instrumentación necesarios para la implementación del GLP en los vehículos. Los atributos, especificaciones y las normativas se tomarán de la literatura.

Metodología

Para el objetivo “Especificar requerimientos del gas licuado de petróleo para su uso en los vehículos automotores en Colombia”, se desarrollarán las siguientes actividades:

- Determinación de las variables y propiedades fisicoquímicas que garantizan la calidad del GLP para uso en vehículos automotores.
- Establecimiento de los métodos de producción, transporte y distribución del GLP a nivel nacional e internacional.
- Comparación de los efectos en el medio ambiental, rendimiento y consumo de combustible durante la combustión entre el GLP y la gasolina.
- Determinación del funcionamiento de un motor de automóvil suministrándole GLP (ciclo Otto).
- Diseño de un esquema de vehículo automotor convencional con suministro de GLP como combustible.
- Determinación de especificaciones técnicas y funcionamiento del motor utilizando GLP.

Para el objetivo “Recomendar especificaciones técnicas para la implementación del gas licuado de petróleo en vehículos automotores en Colombia.” se desarrollarán las siguientes actividades:

- Comparación de las normativas y especificaciones nacionales e internacionales del GLP de uso vehicular.
- Determinación de normativas nacionales e internacionales de los equipos y accesorios de vehículos automotores convertidos para su uso con GLP.
- Diseño de especificaciones técnicas del GLP para su uso automotor en Colombia.

Para el objetivo “Recomendar normas de seguridad y suministro de GLP para vehículos en las estaciones de servicio.” se desarrollarán las siguientes actividades:

- Realizar revisión de la normativa vigente a nivel internacional para ajuste de los requisitos técnicos relacionados con las estaciones de servicios que proveerán el GLP para uso automotor.
- Diseño de un plano general de una estación de servicio para el suministro de GLP en vehículos automotores.
- Generación de normas para el suministro del GLP en estaciones de servicio.

1. Generalidades

1.1 Composición química

Desde el punto de vista de la naturaleza química del GLP, es posible argumentar que son aquellos hidrocarburos condensables a temperatura ambiente, mediante la aplicación de presiones moderadas (menores o cercanas a 100 psi), razón que le permite ser fácilmente almacenable y transportado en forma líquida. El combustible como tal, se caracteriza por tener mezclas de hidrocarburos constituidos principalmente de propano (C_3H_8), iso-butano y butano (C_4H_{10}), y en proporciones menores de etano (C_2H_6), etilenos (C_2H_4), propenos (C_3H_6), butenos (C_4H_8) y pentano (C_5H_{12}) (ver **Figura 1-1**). Incluso, es posible encontrarse otros compuestos de naturaleza distinta a los hidrocarburos, tales como: sulfuros, agua y dióxido de carbono. Para dar un contexto de la composición del GLP producido mundialmente, se puede decir que este varía entre países con climas fríos y cálidos. Conteniendo en el primero, una alta proporción de propano y propenos en el orden de proveer una adecuada presión de vapor en invierno, mientras que, en países cálidos el GLP consiste en su mayoría de butano y butenos (Dennis., 2002).

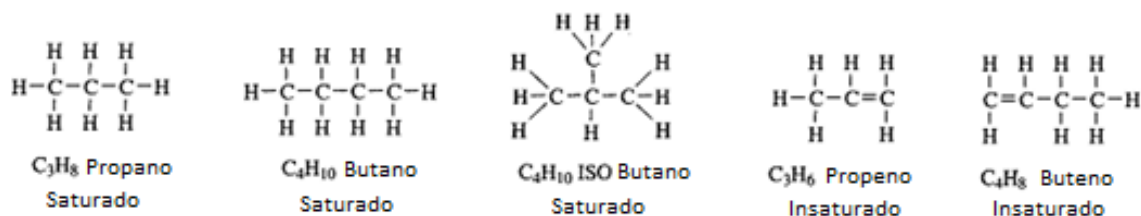


Figura 1-1. Mayores constituyentes del GLP (Dennis., 2002).

A pesar de la generalidad del concepto anterior, la composición química del GLP dependerá en gran medida de su fuente de obtención, ya sea del petróleo mediante rompimiento catalítico en una refinería, o de procesos de separación continua del gas natural. Incluso, verse afectada por la contaminación de componentes químicos externos durante el almacenamiento y transporte del combustible en condiciones de poca asepsia o mantenimiento de los equipos, afectando la calidad del mismo. Estos compuestos pueden ser residuos de hidrocarburos pesados, sulfuros, vapor de agua y amoniaco. (Dennis., 2002).

1.2 Obtención del GLP

Para un mejor entendimiento del origen del GLP para uso vehicular, en este tópico se pretende dar una descripción simplificada de la producción del combustible mediante rompimiento catalítico del petróleo y separación del GLP de los líquidos del gas natural. Con lo anterior, se pretende que el lector afiance los conocimientos básicos de los distintos procesos de manufactura en la industria colombiana y se motive a la búsqueda de otras formas de producir el combustible.

1.2.1 Obtención del GLP mediante rompimiento catalítico del petróleo

Las refinerías como tal tienen en cuenta cuatro tipos de estructuras químicas de los hidrocarburos (parafinas, olefinas, naftenicos y aromáticos), tal como se puede ver en la **Tabla 1-1**. Sus diferencias se basan en la relación de sus enlaces entre los átomos de carbono pudiendo incluso generarse cadenas lineales o moléculas con forma de anillo. De lo anterior, se puede argumentar que la gran mayoría de hidrocarburos encontrados en la refinería consisten principalmente de enlaces simples (Parafinas) y dobles enlaces (Olefinas) entre los átomos de carbono e hidrógenos a su alrededor (enlaces simples) y que esto se da con el propósito de garantizar un equilibrio molecular en el seno del fluido en que interactúan. Por otro lado, es necesario destacar que algunas moléculas del petróleo pueden incluso contener enlaces con elementos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales, así como trazas de otros elementos, que pueden afectar seriamente la calidad del proceso y los respectivos productos (Totten., 2003).

Nombre	Cadena/Anillo	Saturado/insaturado	Ejemplos
Parafinas	Cadena	Saturado	Propano/Butano
Olefinas	Cadena	Insaturado	Propenos/Butenos
Naftenicos	Anillo	Saturado	Ciclo hexano
Aromáticos	Anillo	Insaturado	Benceno

Tabla 1-1. Tipos de hidrocarburos encontrados en refinerías (Totten., 2003).

De forma general, la Figura 1-2 muestra un diagrama simplificado de procesos de una refinería, en la cual se puede evidenciar la gran mayoría de equipos y productos que generan las refinerías a diario a partir del petróleo. En las primeras etapas de la producción de GLP, el petróleo crudo se somete a un proceso de separación física por destilación atmosférica, para separar los productos del petróleo en distintas corrientes de acuerdo a su punto de ebullición a presión ambiente (ASTM., 1999). Generalmente, en este equipo de proceso se alcanzan temperaturas entre los -51 - 380°C, mediante el cual

se separan aproximadamente la mitad de los componentes del crudo (dependerá fundamentalmente del tipo de crudo) en el rango de los diferentes cortes por destilación, tal como lo especifica la **Tabla 1-2**, que van desde los gases de bajo punto de ebullición en la parte superior de la torre hasta los gasóleos y residuos más pesados con mayor punto de ebullición en la parte intermedia y base de la torre respectivamente. Una vez separados los componentes más livianos del petróleo, los componentes más pesados se procesan en una torre de separación a condiciones de presión bajas (vacío) y temperaturas entre los 375 – 600 °C, con el propósito de separar un 30% (aproximadamente) adicional de productos dependiendo del tipo de crudo procesado. De lo anterior, se puede argumentar que la selección como tal de los productos a obtener en esta última parte del proceso de refinamiento dependerá exclusivamente de la demanda de cada uno de ellos en el mercado, sus especificaciones técnicas, y, particularmente de los requisitos de remoción de compuestos de sulfuros, dado a que esta última etapa suele tener un mayor costo que otras áreas de la refinería. No obstante, después del refinamiento en la torre de separación al vacío, el crudo aún posee entre 15 – 20% de hidrocarburos pesados, en donde la unidad de “crackeo” catalítico se puede encargar de romper esas moléculas y producir finalmente una mayor cantidad de combustibles como la gasolina, el gas natural y el GLP, entre otros (Totten., 2003).

En este punto, es importante destacar que el crackeo catalítico provee una producción adicional de los principales hidrocarburos del GLP, por lo tanto, vale la pena argumentar de forma específica como influye este proceso en la calidad y especificaciones técnicas.

Nombre		Numero de Carbonos	Rango de ebullición aproximado, °C
Gases		C1-C4	-160 - 0
Hidrocarburos livianos de gasolina	Nafta liviana	C5-C6	25 - 90
	Gasolina liviana		
	Gas condensado		
Hidrocarburos pesados de nafta	Nafta pesada	C6-C10	85 - 190
	Nafta		
	Nafta reformada		
Keroseno	Combustible para Jet	C9-C15	160 - 275
Gasóleo liviano atmosférico	Crudo de horno	C13-C18	250 - 340
	Diésel		
Gasóleo pesado atmosférico	Gasóleo atmosférico	C16-C25	315 – 410
	Gasóleo		
Gasóleos livianos y pesados de vacío	Gasóleo liviano de vacío	C22-C45	370 - 575
	Gasóleo pesado de vacío		
Residuos de vacío	Residuos de vacío de fondo	C40+	500+ - 565+
	Residuos de cadena corta		

	Residuos de vacío del crudo	
	Asfalto	

Tabla 1-2. Cortes del crudo por destilación (Totten., 2003).

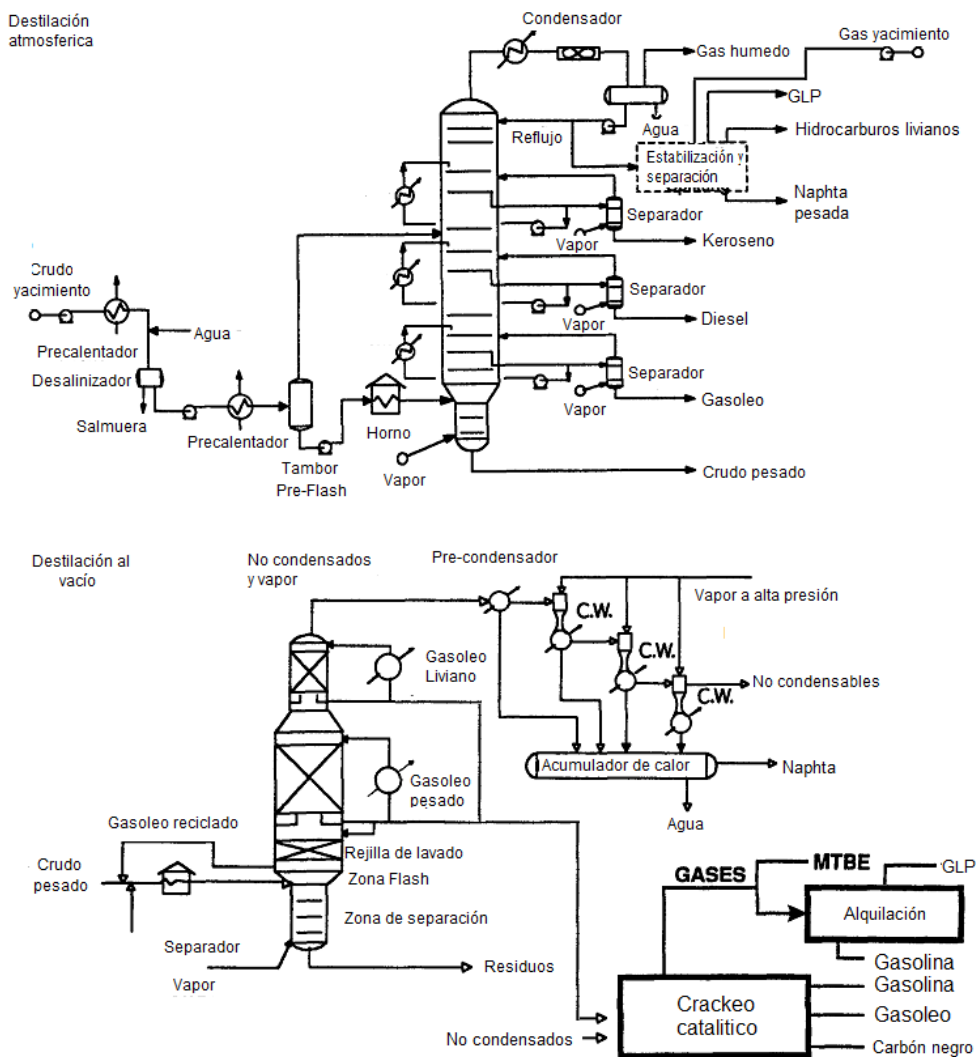


Figura 1-2. Diagrama simplificado de proceso de una refinera (Totten et al., 2003).

El rompimiento catalítico del petróleo es un proceso en el que los gasóleos de alto punto de ebullición y residuos se convierten en compuestos de menor punto de ebullición, que en su mayoría son gases, mezclas de componentes de la gasolina y gasóleos de bajo peso molecular. El lugar en la refinera de este proceso es importante ya que disminuye los costos de producción y operación a largo plazo comparado con otras alternativas para el procesamiento de estos componentes de alto peso molecular. El equipo como tal, es presentado en diferentes configuraciones y catalizadores, pero en esencia se basa en un reactor y recipientes regeneradores del catalizador, una unidad de fluidización en fase vapor del catalizador en cada regenerador, una unidad de interacción con el petróleo y

una unidad de remoción del coque sobre el catalizador, tal como se puede ver en la Figura 1-3 (Fahim., 2010).

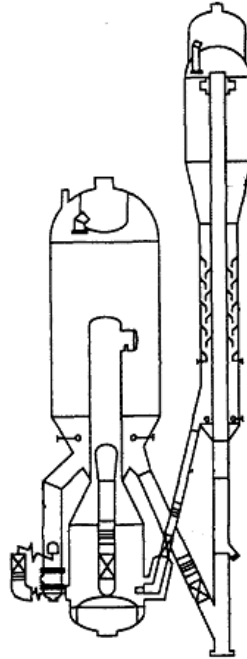


Figura 1-3. Reactor catalítico para el rompimiento catalítico del petróleo (Totten et al., 2003).

El reactor como tal, se alimenta especialmente de los productos más pesados del petróleo, en donde el fluido es vaporizado y sus cadenas de hidrocarburos son rotas a una temperatura de 525 – 550 °C de 1 a 3 segundos en presencia del catalizador, formando productos de hidrocarburos y coque rápidamente debido a la polimerización de las olefinas y compuestos aromáticos, de donde se obtienen productos como los que se muestran en la **Tabla 1-3**. De entre estos productos, se destaca la obtención de gases de alto valor como el GLP y líquidos como la gasolina, así como de un alto contenido de olefinas a partir de una materia prima con poco valor (crudo residual). Por otro lado, parte de las olefinas son procesadas mediante un proceso de reacción y purificación posterior llamado “alquilación. El proceso como tal, requiere de un catalizador comercial de ácido sulfúrico con un 98 – 99% en pureza o ácido fluorhídrico (HF), debido a que la química requiere de un ambiente fuertemente ácido para que en presencia de hidrogeno, las olefinas como los propenos y butenos se conviertan en propano y butano. Durante el proceso, el sistema debe ser presurizado para licuar los gases de hidrocarburos producidos en el reactor catalítico, luego, los hidrocarburos e hidrógenos deben ser mezclados en el medio ácido de otro reactor, para la formación de “alquilatos”, propano y n-butano mediante continuas separaciones en equipos de procesos de los gases, tal como se muestra en la Figura 1-4. Sin embargo, la formación de alquilatos aumentan significativamente la temperatura del reactor, teniendo la necesidad de suplir el mismo

con un exceso de iso-butano y bajas temperaturas en el mismo para prevenir la polimerización de las olefinas y se pierda un gran contenido de materia prima para la generación de mayor contenido de GLP en este producto (Totten et al., 2003 & Fahim et al., 2010).

Productos del reactor, %w	Gasolina	Gas	Destilado
C1-C2	3	6	2
C3s	6	22	4
C4s	11-12	20	8
Gasolina	46-52	27	38
Petróleo liviano	15-19	12	35
Petróleo pesado	7-8	5	9
Coque sobre catalizador	6	8	4

Tabla 1-3. Productos del reactor catalítico (Totten et al., 2003).

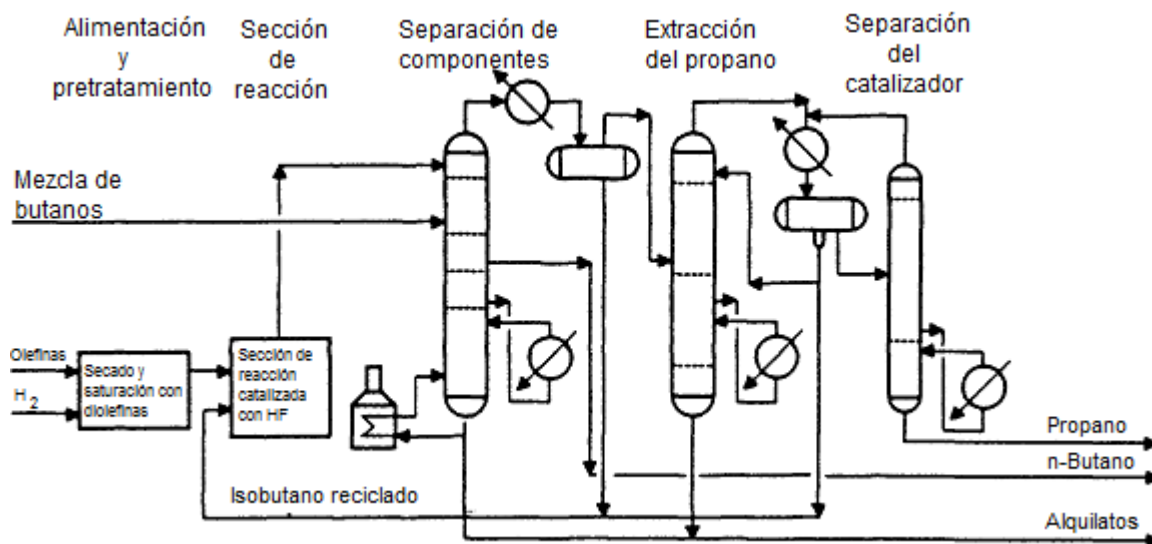


Figura 1-4. Diagrama de procesos de obtención del GLP a partir de los productos del rompimiento catalítico del petróleo (Totten et al., 2003).

1.2.2 Separación del GLP de los líquidos del gas natural

La composición del gas natural extraído de yacimientos de gas y/o petróleo, depende del área geológica, así como el tipo de depósito de roca, profundidad y localización del mismo. Luego, para que este gas pueda ser transportado en poliductos hacia los sitios de comercialización o procesamiento debe cumplir con ciertos estándares de calidad

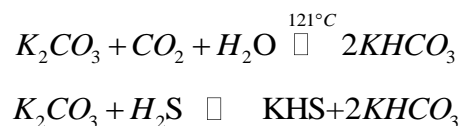
especificados en normativas y estándares de calidad internacionales, tal como lo especifica Wang & Economides., (2009):

- Deben cumplir con un rango específico de capacidad calórica. Por ejemplo, en estados unidos, estos deben ser cercanos a 1.035 ± 50 BTU/standard ft³.
- Estos deben ser entregados a un punto de rocío aceptable. La cual no produzcan la condensación de líquidos en el interior de la tubería, generando graves daños en su estructura.
- El gas no debería contener trazas de compuesto de sulfuro, dióxido de carbono, mercaptanos, nitrógeno, vapor de agua, oxígeno y material particulado.
- El agua debe ser removida en un punto tal que no ocasione corrosión y formación de hidratos de gas en las plantas de procesamiento o tubería.

Todo lo anterior sugiere que el gas natural producido de los pozos debe ser procesado y tratado antes de ser entregado en los poliductos. De tal manera, que el procesamiento del gas natural produce una corriente de gas que cumple con los requerimientos y especificaciones, incluyendo capacidades calóricas y cantidad máxima de recobro de líquidos como el GLP (Wang & Economides., 2009). De lo anterior, la producción del GLP a partir de gas natural, constituye uno de los pasos más importantes para seguir los propósitos de este trabajo. Por lo tanto, el procedimiento para su obtención se puede observar de forma resumida en el diagrama de procesos de la Figura 1-5 y se compone de cuatro etapas fundamentalmente:

1. Remoción del CO₂ y H₂S

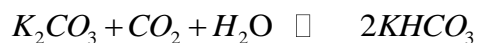
Los componentes no combustibles del gas natural como el CO₂ y H₂S deben ser separados antes de proveer el combustible para su uso doméstico y/o industrial. Este proceso es llevado a cabo mediante el uso de torres adsorbentes que operan a una presión de 43 barg y temperaturas cercanas a los 120 °C. De lo anterior, el gas natural con dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno ingresa en la torre y fluye rápidamente hacia la parte superior de la misma en contra de un flujo caliente de carbonato de potasio, la cual absorben los químicos para generar sales de bicarbonato, tal como lo muestra las siguientes reacciones (New Zealand Institute of chemistry. 2008):



El proceso como tal beneficia la producción de altas concentraciones de sales en el fondo de la torre debido a que el proceso es exotérmico y la presión parcial del CO₂ es lo suficientemente alta como para permitir que la absorción se lleve a cabo, y no se vea perjudicado por el equilibrio de la reacción química. En algunos casos algunas plantas de gas añaden Dietanolamina (C₄H₁₁NO₂) a la solución de carbonato de potasio para ayudar a la transferencia de CO₂ aumentando el rendimiento de la torre consecuentemente (New Zealand Institute of chemistry. 2008).

2. Regeneración del carbonato

La solución de carbonato de potasio es regenerada después de su uso en la torre de adsorción y los productos químicos como el CO₂ y H₂S son ventilados a otras secciones de tratamiento en la planta. Este proceso se lleva a cabo mediante el ingreso de la solución caliente de carbonato de potasio en una columna flash que produce una caída de presión de 8 barg que conduce a la separación inmediata de hidrocarburos gaseosos arrastrados del proceso anterior. Luego, este es alimentado en el tope de una torre regeneradora en donde ocurre nuevamente otra caída de presión, en la cual la solución de bicarbonato se pone en contacto con un flujo de vapor de agua en la parte inferior de la torre para, que arrastra el CO₂ y H₂S fuera de la torre regeneradora. Al final se obtiene la solución de carbonato de potasio regenerada que se recircula a la torre de adsorción nuevamente. La reacción química como tal se presenta de la siguiente manera (New Zealand Institute of chemistry. 2008):



3. Remoción de agua

Para remover el agua de la corriente de gas, primero esta debe ser enfriada y atravesar una columna separadora de gas, en la cual mucha de esta es adsorbida en la torre mediante el proceso de condensación que se lleva a cabo en este tipo de ambiente. Luego, el gas pasa a través de columnas de adsorción de glicoles, en donde el agua residual es extraída de la corriente de gas mediante la adsorción de la misma en una solución de trietilenglicol. Finalmente, la corriente de gas queda libre de residuos de humedad y la solución de glicol es regenerada por calentamiento (New Zealand Institute of chemistry. 2008).

4. Remoción de hidrocarburos pesados y fraccionamiento

Una vez que el agua y algunos gases nocivos sean removidos de la corriente principal del gas natural, se deben remover los componentes de hidrocarburos más pesados para producir el apreciado GLP. El gas como tal, se hace fluir hasta un sistema de calentamiento de intercambiadores de calor, buscando que esos componentes pesados (C3 y C4) se condensen y se recuperen en forma líquida. El líquido es introducido a una columna extractora de etano, donde este componente es extraído del líquido y retornado a la corriente principal de gas. Más adelante, el líquido es fraccionado en dos columnas de separación subsiguientes para producir el propano comercial, butano comercial y gasolina (C5 y C5+). Por último, las corrientes de propano y butano pueden ser mezcladas en relaciones molares apropiadas para su uso vehicular (New Zealand Institute of chemistry. 2008).

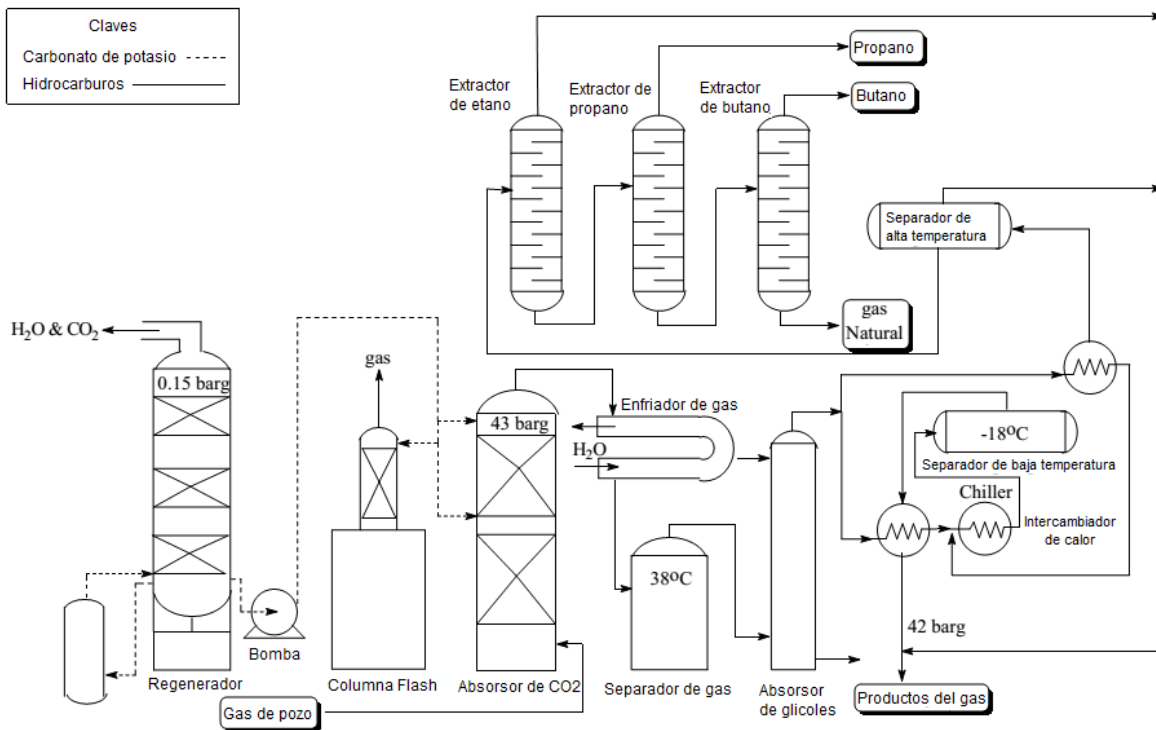


Figura 1-5. Diagrama de planta de procesos de separación del GLP a partir del gas natural (New Zealand Institute of chemistry. 2008).

2. Esquema y funcionamiento de automóvil usando GLP

Desde que se fabricó el primer prototipo de automóvil con motor de vapor en el año 1769, este transporte ha estado en constante evolución, se puede decir que lentamente, a lo largo de los años, han llegado a ser utilizados con combustibles como el Diésel y la gasolina, incluyendo en ambos casos, grandes avances en la reducción del tamaño del motor, mejoras en el rendimiento, potencia y economía para el usuario moderno.

Los motores de los automóviles actuales buscan convertir la energía química de un fluido combustible (gas o líquido) en energía mecánica que desplace un conjunto de pistones contenidos en cámaras cilíndricas (cámaras de combustión), y que a su vez se

encuentran acoplados a un eje (cigüeñal). La ocurrencia periódica de conversión energética en dichas cámaras da como resultado el movimiento axial del pistón y circular del eje, generando así un trabajo que es utilizado para el desplazamiento del vehículo. Este tipo de motor de combustión interna se denomina motor recíprocante y en la Figura 2-1 se muestra un ejemplo de un motor de cuatro cilindros de encendido por chispa eléctrica y sus principales componentes para el proceso de combustión (SAE International. 2004).

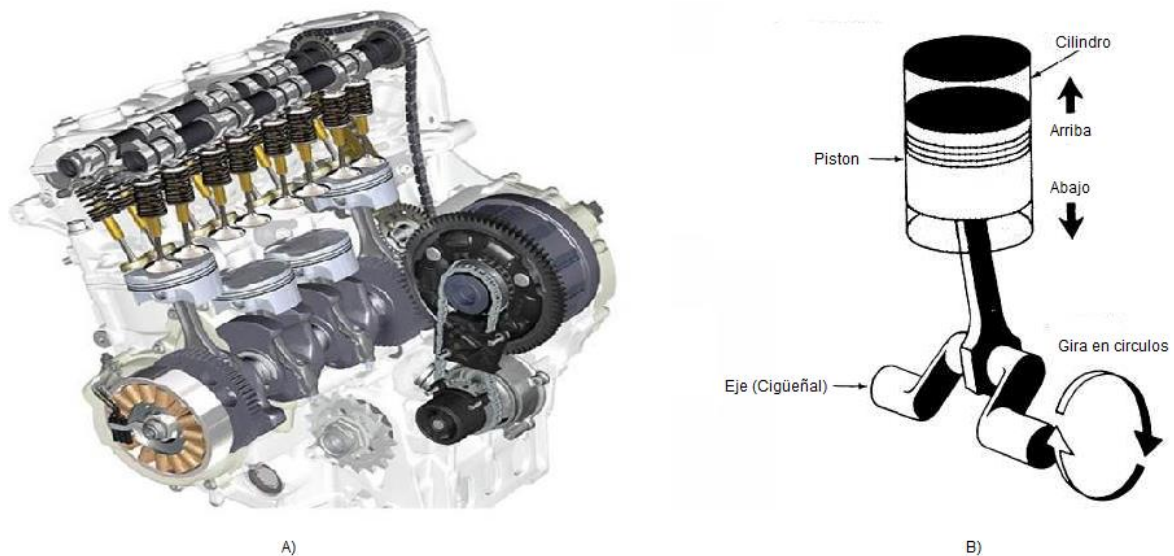


Figura 2-1. Motor de combustión interna de encendido por chispa eléctrica (A) y principales componentes del proceso de combustión (B) (GoTek Energy. 2013).

2.1 Características del motor de combustión de interna

Las características de un motor recíprocante de combustión interna usado en los vehículos de transporte pueden variar de diversas formas de acuerdo al SAE International. (2004):

- El proceso de combustión
- Combustible usado
- Ciclos termodinámicos o de trabajo
- Sistema de mezclado de combustible
- Sistemas de control de gas con el exterior.
- Diseño y configuración del motor

Incluso, pueden verse afectados por los distintos sistemas de ignición, enfriamiento, potencia y aplicaciones del vehículo. No obstante, en los capítulos 2.1.1 y 2.1.2 se comentan de forma breve algunas de estas características del motor de combustión interna.

2.1.1 Combustión y ciclo termodinámico

Entre las diferencias en los procesos de combustión en un motor vehicular, se da principalmente en el tipo de ciclo termodinámico. La mayoría de los automóviles actuales se componen de dos tipos de motores de combustión interna, Motores encendidos por chispa (ciclo Otto) y Motores encendidos por compresión (ciclo Diésel) respectivamente. No obstante, este último será omitido con el propósito de continuar la discusión de este trabajo con los motores de encendido por chispa eléctrica.

Los motores de combustión interna de encendido por chispa eléctrica de cuatro tiempos para automóviles fueron construidos por primera vez por el ingeniero alemán, Nicholas Otto en el año 1876. El sistema se basa en el movimiento de un cigüeñal en dos revoluciones por ciclo, y cuatro tiempos en el que los pistones transmiten la fuerza necesaria para mover el vehículo, tal como se muestra en la **Figura 2-2**. El procedimiento como tal consiste:

1. Tiempo de admisión

En el primer tiempo, una mezcla de gasolina y aire va a entrar en la cámara de combustión del cilindro. Para ello el pistón baja del punto superior del cilindro al inferior, mientras que la válvula (o válvulas) de admisión se abre y deja entrar esa mezcla de gasolina y aire al interior del cilindro, para cerrarse posteriormente (Wu., 2007). Este tiempo se observa en la etapa 1-2-3 del ciclo termodinámico en la **Figura 2-3**.

2. Tiempo de compresión

En el segundo tiempo, con el pistón en su posición más baja y la cámara de combustión llena de gasolina y aire, la válvula de admisión se cierra y deja la cámara cerrada herméticamente. La inercia del cigüeñal al que está unida la biela del pistón hará que el pistón vuelva a subir y comprima así la mezcla (Wu., 2007). Este tiempo se observa en la etapa 3-4 del ciclo termodinámico en la **Figura 2-3**.

La gasolina y el aire se comprimen dentro de una cámara hermética y, al reducirse de tal manera el espacio, las moléculas chocan entre sí aumentando la temperatura de la mezcla (Wu., 2007).

3. Tiempo de combustión

En el tercer tiempo, con el pistón en su posición más alta y comprimiendo la mezcla de gasolina y aire, es cuando entra en acción la bujía (Wu., 2007). Este tiempo se observa en la etapa 4-5 del ciclo termodinámico en la **Figura 2-3**.

Es en este preciso momento, con la mezcla comprimida y a una alta temperatura, cuando la bujía genera una chispa que hace explotar violentamente esa mezcla. La combustión hace empujar el pistón hacia abajo con fuerza y la biela y el cigüeñal se encargan de convertir ese movimiento lineal del pistón, de arriba a abajo, en un movimiento giratorio (Wu., 2007).

4. Tiempo de expulsión de gases

En el cuarto tiempo, el último de este proceso y que significará la cuarta carrera del pistón y la segunda vuelta del cigüeñal, el pistón se encuentra en su parte más baja de nuevo y con la cámara de combustión llena de gases quemados productos de la combustión de la gasolina y el aire (Wu., 2007). Este tiempo se observa en la etapa 5-6-1 del ciclo termodinámico en la **Figura 2-3**.

El pistón vuelve a subir en este cuarto tiempo y al hacerlo empuja esos gases hacia arriba para que salgan por la válvula de escape que se abre con el fin de dejarlos salir y volver a dejar la cámara del cilindro vacía. No como durante la compresión, que permanecía cerrada. Es ahora, con el pistón de nuevo en la parte superior cuando se inicia el ciclo de nuevo desde el principio (Wu., 2007).

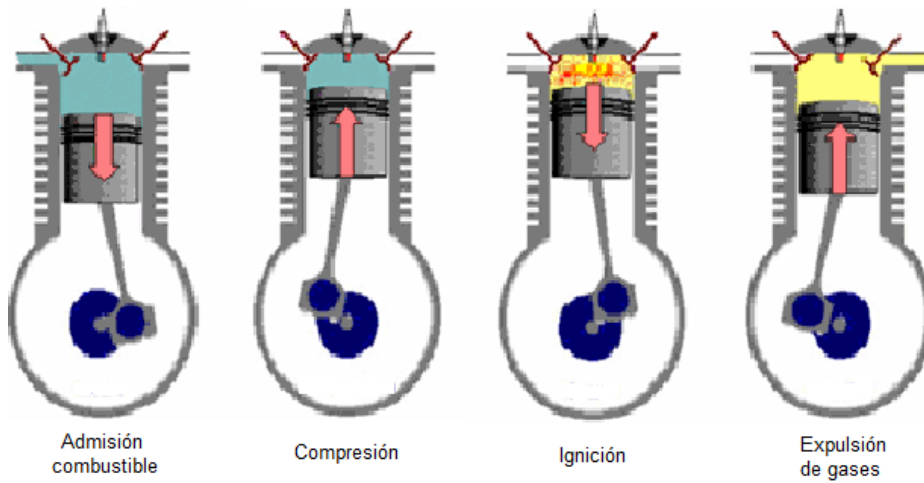


Figura 2-2. Ciclo Otto. (Wu., 2007).

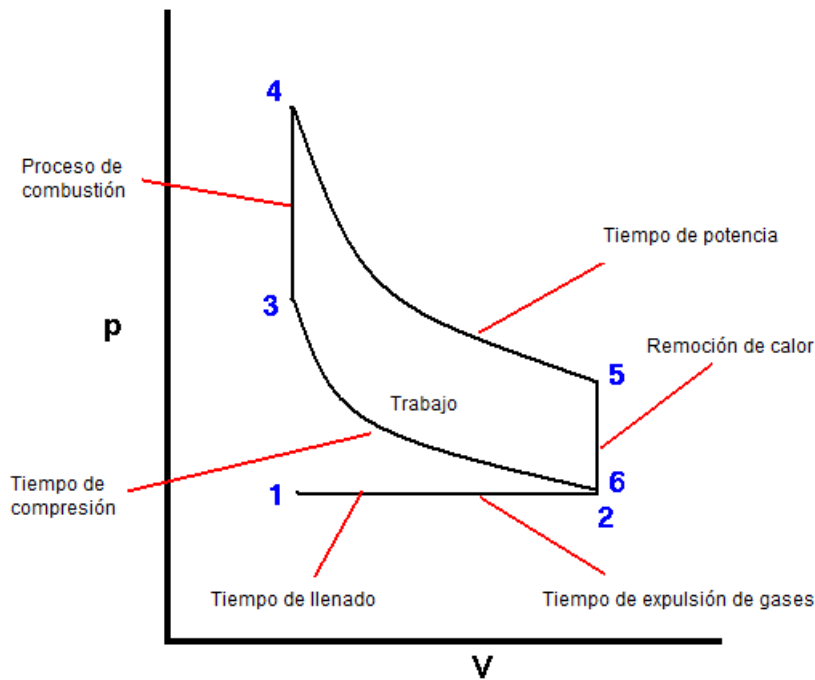


Figura 2-3. Diagrama de presión-volumen del Ciclo Otto. (Wu., 2007).

2.1.2 Combustible

Los motores de combustión interna pueden utilizar diversos combustibles que van desde gases livianos a líquidos pesados de hidrocarburos. Entre los combustibles líquidos se encuentran la gasolina, Diésel, keroseno, benceno, alcoholes, acetonas, éteres y el gas

licuado de petróleo (GLP), por otro lado, entre los combustibles gaseosos se encuentran el metano, propano (GLP), butano (GLP), hidrogeno, entre otros. Según la norma europea, DIN EN 228 los principales factores que se deben tener en cuenta para un buen combustible son la densidad, calidad antidetonante (número de octanaje), presión de vapor, contenido de benceno y de sulfuros. Lo anterior, es a causa de la conciencia medio ambiental que se está desarrollando en el mundo, tomando en cuenta los mínimos requerimientos y restricciones para disminuir la contaminación de la capa de ozono provocado en la atmosfera debido al uso de combustibles de hidrocarburos en los sistemas de transporte. Por lo tanto, el contenido de sulfuros y compuestos aromáticos de hidrocarburos en los combustibles es controlado para cumplir los estándares medio ambientales EURO IV, y así mismo forzar la optimización de los motores de combustión para disminuir la emisión de contaminantes a la atmosfera (SAE International. 2004).

- Densidad

Los rangos de densidad para los combustibles de hidrocarburos de uso vehicular se encuentran ajustados en europea en 720 – 775 kg/m³ a 15 °C. Argumentando SAE International. (2004), que a medida que se incrementa esta propiedad, el contenido de energía por unidad de volumen generalmente también se aumenta, lo cual, para el usuario sin conocimientos técnicos se traduce en una reducción del consumo de combustible en su vehículo. Basados en experimentos, el incremento en la densidad de 1% en la gasolina se iguala a una reducción de 0.6% del consumo del mismo durante el proceso de combustión en el motor (SAE International. 2004).

- Calidad antidetonante

La calidad antidetonante de un combustible es su habilidad para prevenir una combustión no deseada. En el caso de un motor de combustión interna de encendido por chispa, el combustible no debe realizar una combustión prematura y descontrolada en la cámara con los pistones, sino que debe hacerlo únicamente cuando se produzca una chispa eléctrica a partir de las bujías del vehículo (SAE International. 2004).

Dependiendo del diseño y composición del combustible, la flama provocada en un motor de combustión interna puede tener una velocidad de propagación superior a los 30 m/s. Sin embargo, en presencia de detonación prematura, la velocidad de combustión es aproximadamente diez veces más rápida, causando picos de presión, presencia de cavitación y un incremento sustancial de la temperatura en la cámara de combustión del motor. Lo anterior, puede generar un daño o destrucción de las bujías, sellos y válvulas de la cámara de combustión (SAE International. 2004).

El número de octanaje es una medida de la calidad antidetonante de la gasolina que se basa en una escala adimensional de 0 a 100, representado el cero como un combustible altamente susceptible a detonar y 100 a uno muy resistente a la reacción química. Por lo cual, la norma europea DIN EN 228 argumenta una distinción de un número de octanaje mínimo de operación (RON en sus siglas en inglés) de 91 y número de octanaje de motor (MON) de 82.5. En donde, estos números son hallados de manera experimental en motores mono cilíndricos especiales de detonación, en la cual este dispositivo permite el cambio de la relación de compresión y velocidad de ignición del combustible (SAE International. 2004).



Figura 2-4. Pistón destruido por continuas detonaciones prematuras de gasolina en un motor de combustión interna de encendido por chispa eléctrica. (SAE International. 2004).

- Presión de vapor

En un contenedor con un combustible de hidrocarburos la presión aumenta en función de la temperatura a medida que el mismo se va evaporando. Esta propiedad influye de manera especial en arranques en frío y en caliente, en las cuales se asocian principalmente a una composición alta de componentes livianos de hidrocarburos tales como el propano y el butano. Según la norma DIN EN 228 la presión de vapor para un combustible líquido como la gasolina no debe exceder 60 – 90 kPa a temperatura ambiente de 15°C (8.70 – 13.05 psig) (SAE International. 2004).

- Contenido de benceno

El benceno (C₆H₆) es un hidrocarburo que mejora la calidad antidetonante de la gasolina (RON y MON > 100). No obstante, en el año 1950 científicos alemanes notaron un alto

riesgo a la salud humana en procesos que tuvieron que ver con el manejo de este químico, en la cual repercutió en su desuso en los años posteriores como aditivo concentrado en la gasolina de uso vehicular. Por consiguiente, la norma estándar 228 de la unión europea restringió su composición a 5% v/v en las refinerías, incluso incentivando económicamente a las compañías que produjeran combustibles con una composición de benceno inferior a 1% v/v (SAE International. 2004).

A causa del alto riesgo a la salud humana, se propagó el uso de aditivos de la gasolina a base de olefinas aromáticas menos nocivos como el tolueno, etil benceno y xileno. En las cuales las normas europeas restringen de forma leve el contenido de estas en 0 – 37% v/v (SAE International. 2004).

- Contenido de sulfuros

El contenido de sulfuros en los productos derivados del petróleo se debe exclusivamente a la coexistencia de estos compuestos con el crudo bajo tierra que posee una composición de 0.01 – 7.0% v/v. Los compuestos de sulfuros usualmente encontrados en la gasolina son los mercaptanos y tioles que son indeseables por el riesgo de contaminación a la atmosfera después de su combustión. Por lo tanto, de acuerdo con la norma de calidad DIN EN 228, los combustibles de hidrocarburos líquidos no deben poseer más de 150 mg/kg de compuestos de sulfuros (SAE International. 2004).

2.1.3 Implementación del GLP en vehículos automotores

El GLP es un gas altamente inflamable a temperatura y presión ambiente cuando es mezclado con el aire atmosférico, siendo muy eficaz para el uso como combustible alternativo para los automóviles a gasolina actuales. El planteamiento anterior, se debe a que en las investigaciones realizadas en motores de combustión interna por Faiz., (1996), se obtuvieron números de octano en promedio de 112 con relaciones de compresión de 11-12:1, valores muy altos comparados con la gasolina en los motores usados (octanaje promedio de 89 y relación de compresión de 9:1). Debido a esto, se puede argumentar que la eficiencia térmica es mayor, mientras que las emisiones se reducen drásticamente a causa de la poca composición de componentes pesados en la mezcla, comparada con la gasolina y el Diésel (García et al., 1997).

En la actualidad, la gasolina producida tiene un poder calorífico aproximado de 33265.2 MJ/m³, siendo mayor comparado con el intervalo de 110.8 – 113.1 MJ/m³ del GLP. Por

consiguiente, los motores al trabajar con combustibles gaseosos pierden potencia a causa de la baja densidad de alimentación del fluido al motor con respecto a la gasolina en estado líquido ($\rho_{gasolina} = 760 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{GLP} = 2.261 \text{ kg/m}^3 @ 15^\circ\text{C}$). Investigaciones recientes han basado sus estudios en esta propiedad del GLP durante la inyección al motor, al compararlo con la relación estequiométrica aire-combustible podría generar un bajo consumo específico de este combustible por ciclo, en lo que se traduce en mayor distancia recorrida que otros combustibles. Además, el GLP al poseer un mayor octanaje obtiene un mayor índice de compresión, donde la eficiencia térmica y la potencia del motor podrían verse mejoradas, haciendo que la diferencias entre ambos combustibles no sea mayor a un 20% (Eslava, A. 2014). Para tomar en cuenta estas ventajas del GLP, es útil, definir el funcionamiento de un vehículo convertido para su uso con GLP:

Para definir el funcionamiento de un vehículo con GLP se debe tener en cuenta los diferentes tipos de sistemas de suministro del combustible e incluso que la composición del mismo y el sistema de suministro no son necesariamente independientes. Aunque, cabe destacar que la tecnología del mercado del GLP en las siguientes décadas pueda cambiar mucho de una manera similar como ocurrió con los sistemas de inyección de gasolina en los motores actuales, en la cual, se vio un incremento en el nivel de complejidad y costos, tal como fue el remplazo de carburadores por inyectores electrónicos directos del combustible hacia el motor, e inclusive algunos modelos de inyección que regulan dinámicamente la entrada de gasolina a cada cilindro independientemente. Por lo tanto, se espera que los sistemas del GLP puedan seguir de forma similar este camino en el sistema de suministro, incluyendo la opción adicional de suministrar el combustible como gas o líquido directamente al motor.

En el mercado emergente del GLP como combustible vehicular, existen sistemas de suministro, la cual, inyectan el GLP de forma líquida de una manera similar al de los sistemas actuales de gasolina, mientras, otros inyectan los vapores del combustible de una manera similar como los sistemas de inyección del GNC (gas natural comprimido). De lo anterior, con el propósito de presentar un breve resumen de las generaciones de los sistemas de inyección de GLP actuales, ALPGA., (1998), menciona cuatro tipos de generaciones de estos sistemas:

- Generación I: Es el primer sistema de GLP implementado en un vehículo, la cual no cuenta con un control de oxígeno mediante un sensor de señales en el tubo de escape del vehículo. Este sistema no garantiza la relación estequiométrica de la combustión del GLP en el motor, y por lo tanto, los vehículos poseen una menor autonomía y rendimiento que incluso los motores a gasolina.

- Generación II: Son aquellos sistemas de inyección, la cual convierten el GLP en gas mediante el uso de un vaporizador-regulador y poseen un control de retroalimentación electrónica, que permite controlar la presión del combustible en tiempo real. El sistema de suministro del combustible hacia el motor puede variar desde el uso de un mezclador Venturi o un carburador de gas.
- Generación III: Estos sistemas de inyección han sido populares en los últimos años, dado a que el GLP es suministrado mediante válvulas e inyectores específicos para este combustible. Estos sistemas utilizan múltiples puertos que permiten la inyección del GLP en estado gaseoso o líquido, obteniendo una rápida retroalimentación en los controles de inyección para obtener la proporción adecuada de combustible en todo momento.
- Generación IV: Estos sistemas modernos de inyección de GLP son la gran proeza en el futuro, debido a que el combustible se inyecta de forma líquida o gaseosa directamente en la cámara de combustión del motor. El sistema provee de una inyección secuencial completa que permite una alta personalización en los motores de inyección por chispa a distintas velocidades de rotación.

Para algunas de estas generaciones es deseable tener el fluido líquido en todo momento, la cual puede ser particularmente difícil de proveer de acuerdo a las altas temperaturas de algunas regiones del país. Especialmente, durante las caídas de presión en el flujo del combustible hacia el motor en la cual se pueda generar vaporización e incluso licuefacción en distintas áreas del equipo de inyección, a causa de puntos de calor localizados en el vehículo. Por lo tanto, para propósitos generales del GLP vehicular en nuestro país, se sugiere el uso de un sistema de inyección de generación II o III, tal como el que se muestra en la Figura 2-5. No obstante, el fabricante del sistema de suministro del GLP vehicular deberá ser el encargado de asegurar el funcionamiento del vehículo en cualquier tipo de clima y determinada carga operacional del motor (ALPGA., 1998).

El mecanismo de funcionamiento general del sistema de inyección del GLP, es muy similar que cuando se usa el suministro de gasolina en los vehículos. Si, se toma en cuenta un vehículo estándar con suministro de gasolina del mercado actual para su conversión al GLP (Generación II o III), es necesario tomar en consideración en adicionar un tanque de almacenamiento, un sistema de suministro y un controlador de flujo del GLP hacia el motor. Por lo tanto, el GLP se encuentra en estado líquido a una presión

relativamente baja en el tanque de suministro (cerca de unos 150 psig) (**Figura 2-6**). Luego, a través de una diferencia de presión en los conductos de cobre, el combustible se desplaza hacia un dispositivo de vaporización-regulador que disminuye la presión y aumenta la temperatura del GLP, provocando que este pase a una fase gaseosa para que se mezcle con el aire ambiente a una relación aire-combustible en un mezclador Venturi (**Figura 2-7**). Después, la mezcla de aire-combustible ingresa a la cámara de combustión del motor, siendo controlado el flujo y la presión del sistema mediante el centro de control que se compone de un dispositivo emulador, acelerador de motor y un sistema controlador LAMBDA (ECU), tal como los que se muestran en la **Figura 2-8**. Por último, el motor de cuatro tiempos sigue el funcionamiento explicado de la **Figura 2-2**, mientras los sistemas de control del GLP almacenan y procesan la información del rendimiento, consumo y emisiones del vehículo en tiempo real (Gasolinerías la Gaviota. 2011, Indian Auto LPG Coalition. 2008 & UNAL., 2014). Una breve descripción general de los equipos y accesorios del Kit de conversión se muestran a continuación:

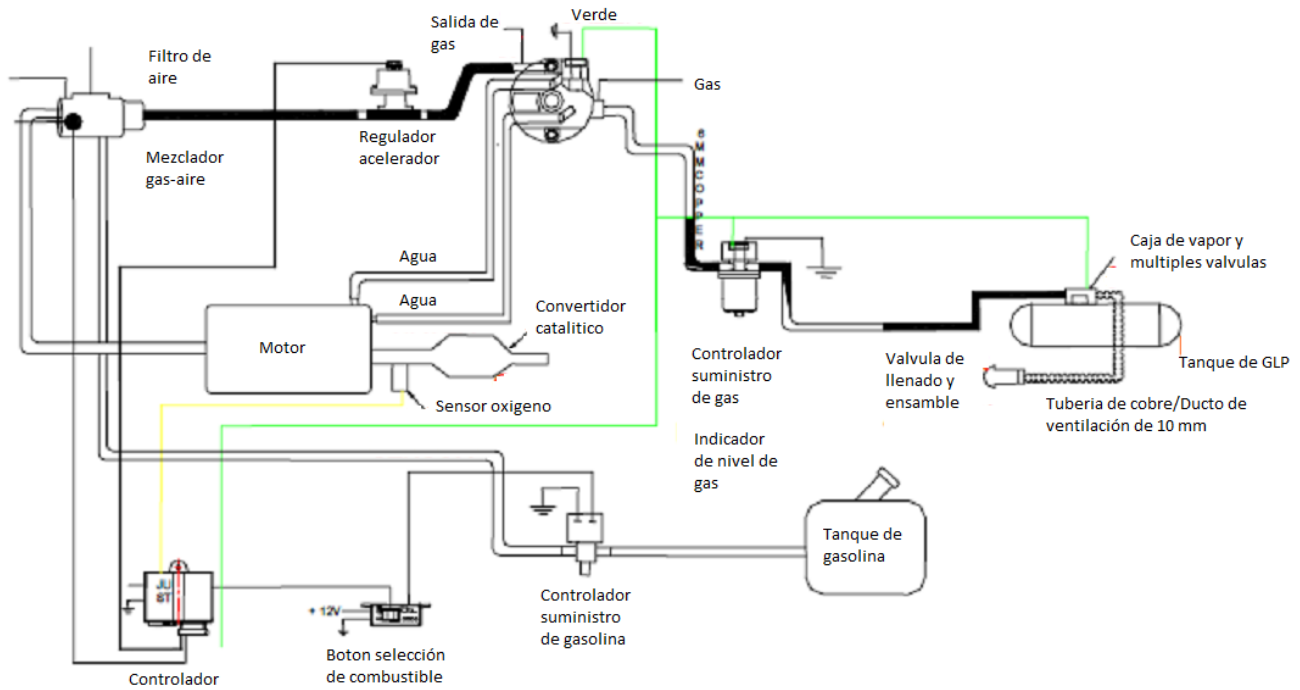


Figura 2-5. Diagrama de proceso de automóvil con suministro híbrido de GLP-Gasolina. (UNAL., 2014).

Depósito de GLP y accesorios:

El depósito de combustible es un recipiente donde se almacena el GLP en estado líquido. En el mercado actual es posible encontrarlos de dos tipos, tóricos, que se ubican en el hueco de la rueda de repuesto del vehículo o cilíndricos, que irían en el propio maletero.

Según Indian Auto LPG Coalition. (2008), mencionan que los depósitos de GLP deben ser aprobados según la regla *Chief Controller of Explosives under Gas Cylinders Rules* y cumplir con los requerimientos de la normativa S: 14899.

A diferencia de los cilindros de GLP normales, cada tanque de uso automotriz debe ser fijado con válvulas de múltiples funciones para la protección del sistema vehicular, seguridad de los pasajeros y del ambiente circundante (ver **Figura 2-6**). Actualmente estos se ensamblan con otros mecanismos de seguridad para el montaje, llenado y suministro de GLP en el vehículo, estos son (Indian Auto LPG Coalition. 2008):

1. Dispositivo automático de límite de llenado: Este provee el cerrado de la válvula de llenado, cuando el nivel de líquido en el depósito de GLP alcanza un 80% de su capacidad volumétrica.
2. Válvula de servicio: Este dispositivo provee el suministro/corte de GLP hacia el motor según la posición de la llave de encendido del vehículo. Esta puede ser de operación manual o controlada remotamente.
3. Válvula de choque para flujo en exceso: Este componente se encuentra en la línea de salida del depósito de GLP, en la cual esta se cierra automáticamente cuando un flujo predeterminado de gas excede la caída de presión del sistema de suministro. Esta válvula de seguridad es importante dado a que protege el sistema de suministro en caso de ruptura accidental desde el tanque de GLP hacia el motor.
4. Válvula de alivio de presión: Es un dispositivo automático de alivio de presión con comunicación directa con el espacio de vapor del tanque de suministro de GLP, proveyendo una constante presión interna de los fluidos. Este se abre solo si se alcanza una presión interna en el contenedor de 22 kg/cm^2 .
5. Tapón fusible: Es un dispositivo que se funde a una temperatura aproximada de $110 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$ y permite la salida del GLP presurizado en el contenedor en caso de incendio.
6. Indicador de contenido: Es un dispositivo de indicador visual que permite conocer el nivel o cantidad de GLP almacenado en el depósito del vehículo.
7. Válvula de no retorno en el conector de llenado: Esta válvula permite el flujo del GLP en una única dirección, para evitar que por efecto de la despresurización del fluido el contenido del mismo no retorne por la línea de suministro. Esta válvula se ubica en la boca de alimentación de GLP del vehículo.



Figura 2-6. Depósito de GLP y accesorios (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

Sistema de suministro de GLP:

1. Regulador-vaporizador: Este es un componente que se encuentra conectado al sistema de refrigeración del automóvil. En la cual, el GLP líquido del depósito es vaporizado por el agua caliente del radiador y su presión es estabilizada mediante un complejo mecanismo para mantener el flujo de gas requerido en el motor para el correcto funcionamiento del sistema (ver **Figura 2-7a**) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).
2. Mezclador Venturi: La función de este dispositivo es para mezclar el GLP en estado gaseoso con el aire atmosférico entrante en la proporción correcta para suplir los cilindros del motor del vehículo (ver **Figura 2-7b**) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).
3. Válvula de corte de combustible de cierre automático: Es una válvula solenoide para el cierre de suministro de GLP proveniente del depósito de combustible cuando el encendido del vehículo se ubica en posición de apagado (ver **Figura 2-7c**) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).
4. Conmutador: Es el mando de selección instalado en el panel central del automóvil que permite seleccionar el combustible que se desea usar, así como también mostrarle al usuario el nivel de llenado del depósito de GLP. Por razones

de seguridad, durante el encendido del motor se utiliza gasolina para luego pasar automáticamente a GLP (ver **Figura 2-7d**) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

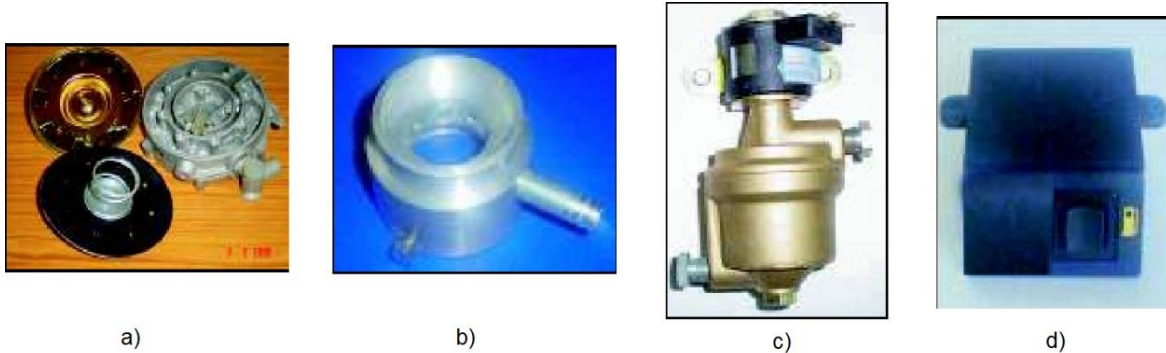


Figura 2-7. Sistema de suministro de GLP vehicular. a) Regulador-vaporizador, b) Mezclador Venturi, c) Válvula de corte de combustible de cierre automático y d) Conmutador. (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

Sistema de control de GLP vehicular:

Los sistemas de control de GLP implementados en el vehículo automotor se pueden considerar de dos tipos, sistemas de ciclo abierto y cerrado. En el sistema de ciclo abierto se presenta la forma más simple de conversión de señales eléctricas y no necesita de control de precisión en mecanismos del vehículo. En estos vehículos la mezcla de aire-GLP es obtenida mediante señales de presión de vacío antes de entrar a los cilindros del motor (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

1. Emulador: Este es un componente de almacenamiento de señales provenientes del sistema de inyección cuando el vehículo se encuentra en marcha bajo el modo de suministro de GLP. Este funciona como dispositivo interpretador de señales para realizar el complejo cambio de suministro de gasolina-GLP y viceversa (ver **Figura 2-8a**).
2. Acelerador de motor: Este dispositivo regula el flujo de GLP en el sistema de inyección del motor basado en el sistema de control LAMBDA (o ECU). Este dispositivo posee 216 posiciones y control de flujo de combustible con alta precisión (ver **Figura 2-8b**).
3. Sistema de control LAMBDA (ECU): Este dispositivo realiza las mediciones de contenido de oxígeno en el escape del motor y envía señales hacia el controlador de aceleración del motor para controlar el flujo de GLP de entrada (ver **Figura 2-8c**).

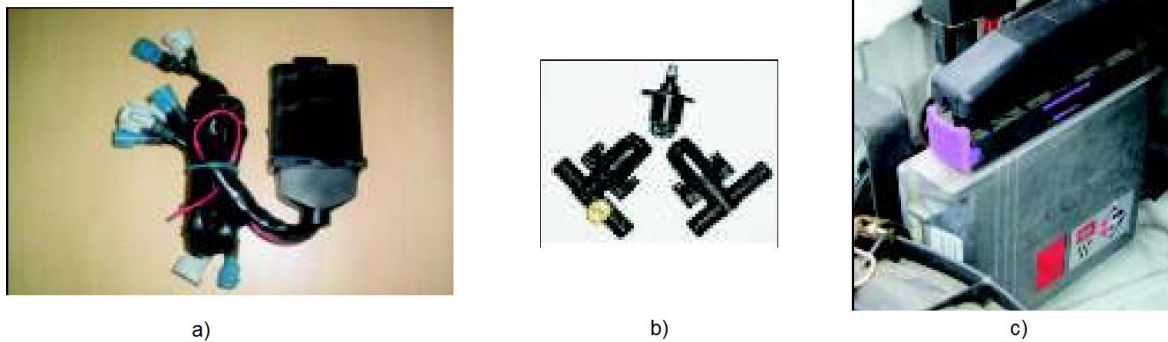


Figura 2-8. Sistema de control de GLP vehicular. a) Emulador, b) Acelerador de motor y c) Sistema de control LAMBDA (ECU) (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

El acelerador y sistema de control LAMBDA del motor son componentes esenciales del sistema cerrado del vehículo. El kit de conversión de GLP de los vehículos debe ser ensayado a diversas condiciones de operación y aprobado bajo la normativa 126 de *central motor vehicles rules* en el modo bifuncional de GLP/gasolina (Indian Auto LPG Coalition. 2008).

2.2 Comparación de los vehículos con GLP y gasolina

Tomando como objetivo la implementación del GLP en vehículos Colombianos debe tomarse en consideración efectos medio ambientales, rendimiento y autonomía, así como de del establecimiento de una equivalencia energética o autonomía teórica entre un vehículo propulsado con GLP y con gasolina.

2.2.1 Medio Ambiente

En el año 1989, la comisión nacional de energía en Chile organizó un experimento piloto con el objetivo de verificar la eficiencia energética y el impacto de la polución producida por buses funcionando con distintos combustibles “alternativos” (un vehículo alimentado con gas natural comprimido (GNC), tres con GLP y metanol respectivamente). Como elementos de control fueron añadidos nueve buses de similares prestaciones funcionando siete de ellos con combustible Diésel y dos con gasolina convencional respectivamente, bajo distintas condiciones de mantenimiento en los motores. Los experimentos fueron llevados a cabo a lo largo de seis meses y durante las pruebas se realizaron promedios de las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NOx), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y aldehídos, medidos en gramos por kilómetro (**Tabla 2-1**), y se obtuvieron datos muy concluyentes sobre la efectividad del uso de combustibles alternativos como el GNC, metanol y GLP para reducir las emisiones de estos contaminantes al ambiente durante la operación de los buses. De los datos obtenidos se puede observar en la **Tabla 2-1**, como los tres buses con

convencionales sobre territorio colombiano

alimentación de GLP son los que más emisiones de CO y NOx producen con respecto a los que usaron gasolina, Diesel y gas natural comprimido. Sin embargo, es destacable la baja emisión de material particulado (0.047 g/km), compuestos orgánicos volátiles (2.626 g/km) y aldehídos (0.0127 g/km) en el mismo experimento (Faiz et al., 1996).

Bus I.D./ tipo combustible	CADEBUS (Ciclo de manejo en Santiago de Chile) ^a				
	Material particulado [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	Compuestos orgánicos volátiles [g/km]	Aldehídos [g/km]
GLP-1	0.076	31.543	11.491	2.626	0.0127
GLP-2	0.061	166.253	3.727	6.264	0.0068
GLP-3	0.047	115.294	8.949	3.617	0.0050
Metanol-1	0.164	116.438	4.746	11.866	0.0600
Metanol-2	0.033	84.354	6.059	6.494	0.0471
Metanol-3	0.154	16.598	4.150	7.227	0.0328
Gasolina-1A^b	0.195	2.568	3.705	0.842	0.0003
Gasolina-1	0.304	23.423	3.857	15.341	-
GNC-1	0.043	28.976	7.937	5.136	0.0033
Diesel-1A^b	0.385	1.796	3.821	0.640	-
Diesel-1	1.621	3.656	4.205	1.291	0.0029
Diesel-2	0.705	2.136	4.632	1.422	0.0016
Diesel-3	0.598	2.556	4.522	1.447	0.0022
Diesel-4	1.518	4.606	7.779	2.295	-
Diesel-5	0.341	1.833	5.362	0.885	0.0028
Diesel-6	3.050	9.660	7.000	1730	-

-: No aplica.

a: Todas las pruebas realizadas en un dinamómetro en el chasis.

b: Con convertidor catalítico

Tabla 2-1. Emisiones de buses con combustibles alternativos en Santiago de Chile (Faiz., 1996).

Recientes investigaciones demostraron que las contribuciones de los sistemas de transporte actuales hacia las emisiones antropogénicas globales son de 21% del dióxido de carbono (CO₂), 37% de óxidos nitrosos (NO_x), 19% de componentes orgánicos volátiles, 18% de monóxido de carbono (CO) y 14% de otros compuestos contaminantes (Forster et al., 2007). De lo anterior, tomando como base el estudio del caso chileno, Ning, Z., & Chan., T. L. (2007) mencionan que, en el año 1998, la ciudad de Hong Kong realizó un plan piloto para el reemplazo de taxis con combustible diésel hacía uno con GLP, en donde el gobierno incentivó dos años después a los propietarios de los vehículos con un bono de \$5140 dólares aproximadamente para acelerar el proceso. El programa fue completado tres años después y cerca del 99.8% de la población de taxis con diésel en Hong Kong (aproximadamente 18000 taxis) fueron reemplazados. Años más adelante, Ning, Z., & Chan, T. L. (2007) realizan un estudio mediante sensores de emisiones de automóviles en las carreteras utilizando taxis del año 2000 al 2004 con GLP como combustible, y mencionan reducciones de emisiones promedio de gases a la atmósfera importantes entre 73.9%, 84.5%, 74.2% y 62,9% a velocidades de 10, 30, 50 y 70 km/h respectivamente, comparado con los mismos vehículos en versión diésel. Demostrando que la introducción de este combustible en vehículos modernos alivia

efectivamente la carga de contaminantes hacia la atmósfera terrestre, he incluso afirmaron que las emisiones locales de los vehículos dependerán también del patrón de manejo del usuario. Los resultados obtenidos de este estudio muestran que las emisiones promedio de CO (E_{CO}) en los vehículos disminuyen rápidamente con el incremento de la velocidad instantánea hasta los 50 km/h, más allá de esta tiende a verse un leve incremento (Figura 2-9a). Por otro lado, las emisiones de hidrocarburos disminuyen conforme se aumenta en el rango de velocidad instantánea de los vehículos entre 10 km/h (Figura 2-9b). Y por último, las emisiones de óxidos nitrosos (NO_x) disminuyen levemente hasta los 35 km/h, más allá de esta velocidad las emisiones se incrementan considerablemente (Figura 2-9c).

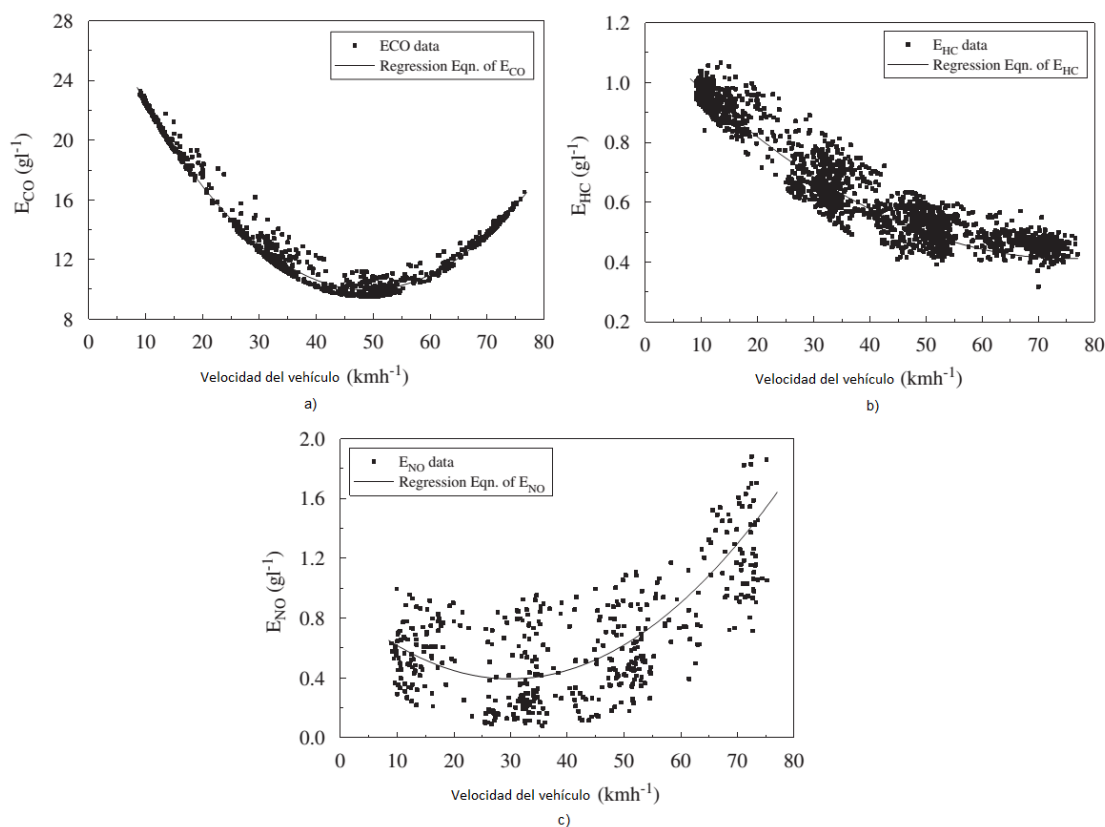


Figura 2-9. Gráfica de factor de emisiones de CO, NO y HC en taxis con respecto a la velocidad instantánea del vehículo (Ning, Z., & Chan, T. L. 2007).

Tomando como base los dos casos anteriores, desde el año 1991 la compañía estatal ECOPEPETROL en Colombia ha mejorado la calidad de la gasolina reduciendo el contenido de plomo de 3 a 0.15 ppm (Enero 1991), disminuyendo la presión de vapor del combustible en 8.5 psi (Noviembre 1991) e incrementando el número de octanos en 86 y 94 para los dos tipos de gasolina que se producen actualmente, “corriente” y “extra” respectivamente (Desde marzo 1994 para la zona costera y en enero 1996 para el resto del país), mediante la optimización del proceso de “crackeo” catalítico en las refinerías.

De estos combustibles es importante destacar el alto contenido de componentes aromáticos y olefinas de 24 - 28 % y 17.5 – 23 % en volumen respectivamente, por otro lado, el bajo contenido de bencenos y sulfuros de 0.8 – 0.9 % en volumen y 0.06 ppm respectivamente (Onursal & Gautam 1997) (ECOPETROL., 2014). Con motivos de comparar la calidad y el rendimiento entre la gasolina colombiana y el GLP, Adam et al., (2011) realizaron estudios en diez automóviles con suministro de tres tipos distintos de GLP y gasolina comercial (muy similar a la colombiana) en el dinamómetro Maha GmbH de Alemania. En las cuales, se destacaron reducciones de CO₂ bastante notables de 114 g/km suministrando GLP en los vehículos, comparado con las emisiones representadas por la gasolina con 202 g/km; ambos resultados con niveles de emisiones menores a la legislación EURO-4, excepto que en algunas pruebas usando GLP comercial, las emisiones de NO_x en los vehículos fueron de 0.143 g/km y por consiguiente mucho más alta que la normativa EURO (0.032 g/km). En la disyuntiva de los resultados, los autores realizaron la misma prueba utilizando un suministro de GLP sintetizado en laboratorio con 30% de contenido en propano de la cual se obtuvo una reducción de emisiones de cerca de 0.015 g/km. De lo anterior, los autores destacan la mejor apariencia de los resultados en esta última prueba, debido a que la composición del GLP puede jugar un papel muy importante durante el proceso de combustión, dado a que la temperatura del motor puede ser cercana a los 900 – 1000 °C comparado con los 500 – 800 °C utilizando gasolina, por lo tanto, conduciendo a un incremento térmico notable en el motor y en sus componentes de expulsión de gases en las cuales subyace una mayor producción de NO_x durante todo el proceso (Adam et al., 2011).

Según Ceviz & Yüksel., (2006), las causas de las altas emisiones de químicos tanto en el uso de la gasolina y el GLP se debe a la variación de los ciclos internos de cada uno de los diferentes motores de combustión interna de los fabricantes, siendo un factor limitante incluso con el rendimiento y autonomía del vehículo. En particular, es deseado disminuir la variación de los ciclos de operación de tal manera que también lo hagan las emisiones de óxidos nitrosos y de hidrocarburos hacia al ambiente. Por lo tanto, si los ciclos internos varían demasiado durante la carga operacional del motor, esto puede restringir la combustión y ocasionar un efecto de “cascabeleo”, que disminuye la potencia del motor e incremento de las emisiones de hidrocarburos de combustión incompleta. De forma general, este fenómeno se debe a una mala relación de aire-combustible en los cilindros del motor que provocan una desigual velocidad de ignición del combustible de acuerdo a la composición de la mezcla en cada uno de ellos, tal como se muestra en la Figura 2-10 utilizando GLP y gasolina en un motor de combustión interna. Con estos resultados se puede argumentar que a medida que la relación aire-combustible aumenta, las emisiones de CO, CO₂ y HC en el motor utilizando GLP disminuyen significativamente, debido a la baja relación de carbonos con respecto a la gasolina por ciclo en los cilindros, excepto que las emisiones de hidrocarburos se mantendrían en promedio en 200 ppm más altas que al utilizar la gasolina, a causa de una combustión incompleta. No obstante, los resultados se mantienen en términos aceptables y el autor recomienda ciclos de desplazamiento de pistón más largos para permitir la entrada de mayor contenido de GLP y aire para un mejor uso vehicular.

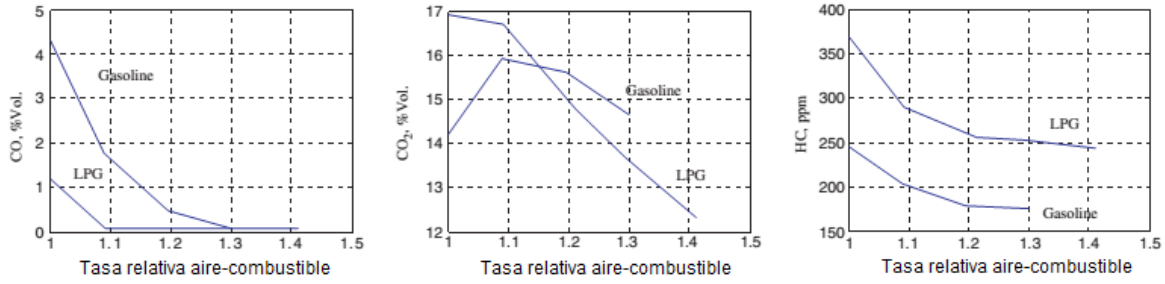


Figura 2-10. Variaciones en las emisiones de CO, CO₂ y HC en un motor de combustión interna de ignición con chispa (Ceviz & Yuksel., 2006).

De lo anterior, es posible concluir que es necesario una buena relación aire-combustible, altas relaciones de compresión y mejoras tecnológicas en los sistemas de carburación y combustión, para una disminución y mejora en el trabajo del motor. No obstante, el GLP es un claro candidato para la generación de un nuevo mercado que facilite la transición para el uso de combustibles menos contaminantes.

2.2.2 Rendimiento y autonomía

La tecnología del sistema de inyección del GLP ha seguido el desarrollo de los sistemas de inyección de gasolina actuales, por lo tanto, estos son más eficientes y con menos pérdidas de potencia en el motor en comparación de los sistemas más viejos. Un ejemplo, lo proponen Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. (2015). En una prueba realizada sobre un motor Ford MVH-418 de cuatro cilindros, con una relación de compresión de 10:1, potencia máxima de 93 KW a 6250 rpm y un torque máximo de 157 Nm a 4500 rpm. Los resultados del experimento, mostraron un incremento excesivo de la temperatura y presión del GLP en el regulador-vaporizador, provocando una reducción de la eficiencia volumétrica y pérdida de potencia del motor, cuando la temperatura del refrigerante se acercó a un nivel de estado estable (**Figura 2-11** y **Figura 2-12**). Además, el problema se complica dado a que no es sencillo, para los sistemas inyectoros proveer del aire suficiente a causa de la variabilidad de la densidad del combustible. De lo anterior, el autor afirma que el sistema de inyección debe proveer un continuo monitoreo de la temperatura del refrigerante hacia el regulador-vaporizador.

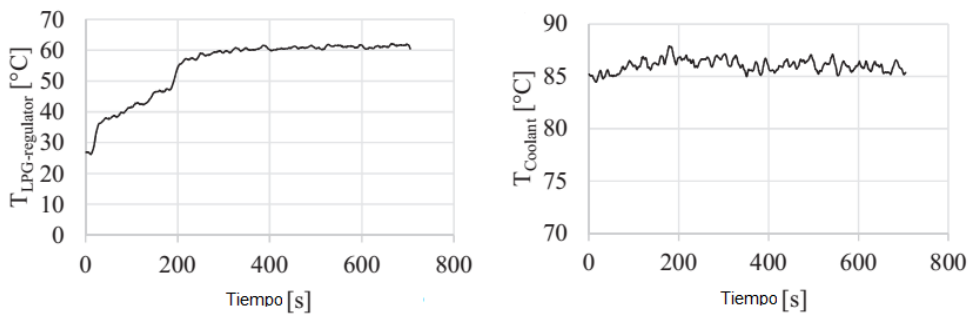


Figura 2-11. Variación de la temperatura del vaporizador-regulador y del refrigerante del motor (Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. 2015).

De la **Figura 2-11** y **Figura 2-12**, Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. (2015), argumentan que a medida que aumenta la temperatura del GLP el torque, potencia al freno y velocidad de rotación del motor disminuyen levemente. Tomando en cuenta, que cuando la temperatura del vaporizador-regulador del GLP se incrementa en un rango de 27 – 62 °C, la potencia al freno se disminuye cerca de un 1.85% debido a la disminución de la eficiencia volumétrica. Sin embargo, también observaron que no hubo un cambio en el consumo específico del combustible argumentando una pérdida de energía mediante la generación de calor. Como conclusión, los autores recomiendan sistemas de control de inyección del GLP dinámicos con múltiples perfiles según zona de uso del vehículo, y un ajuste en la temperatura de salida del regulador de presión del GLP en un rango de 30 – 40°C que prevenga la pérdida de potencia en el motor y se aumente la potencia al freno cerca de un 1.85%.

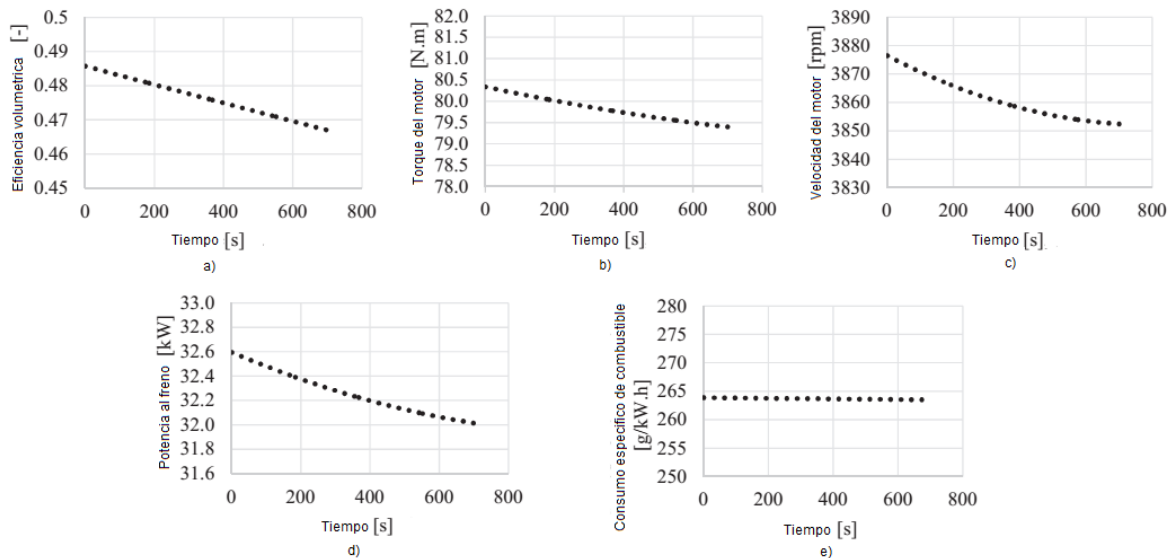


Figura 2-12. Rendimiento del motor con respecto al incremento de la temperatura del vaporizador-regulador (Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. 2015).

En un planteamiento similar realizado por Masi, M. (2012) del experimento de Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. (2015), en un motor FIAT 838 de cinco cilindros, con una potencia máxima de 107 KW a 6100 rpm y torque máximo de 185 Nm a 4500 rpm, el autor menciona que el rendimiento del motor con suministro de GLP, es afectado por el dispositivo evaporador de dos maneras similares:

1. Cambios en las condiciones climáticas alterarían el intercambio calórico entre el GLP y el refrigerante del motor, afectando la composición del gas sobrecalentado y la densidad del aire que se inyecta al motor.

- Algunos diseños del evaporador pueden producir zonas de calor superficiales en el dispositivo, alterando la forma como se transfiere el calor entre el líquido refrigerante hacia el GLP. Alterar el grado de sobrecalentamiento del GLP sin modificar la densidad del aire ambiente.

De lo anterior, el autor plantea tres diferentes tipos de pruebas climáticas con el propósito de comparar la potencia y torque del motor usando GLP con respecto al uso de gasolina ($T_{med} = 25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{hot} = 31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{cold} = 12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ver **Figura 2-13**). En las cuales se destaca que el máximo torque y potencia experimental usando GLP es levemente inferior que aquellos valores con gasolina declarados por el fabricante. No obstante, el autor argumenta que los resultados son dependientes parcialmente de la dispersión del gas en los equipos y de los componentes mecánicos del motor. En particular, el torque hallado utilizando GLP es 20% inferior que el obtenido con el uso de la gasolina a temperatura T_{med} . Además, al comparar el GLP con la gasolina, se nota un gradual y continuo aumento en la diferencia en las gráficas de carga máxima de torque en las distintas pruebas; siendo consistente esta tendencia con el incremento del deterioro en la eficiencia volumétrica durante el uso del GLP a medida que aumentan las revoluciones por minuto del motor (Masi, M. 2012).

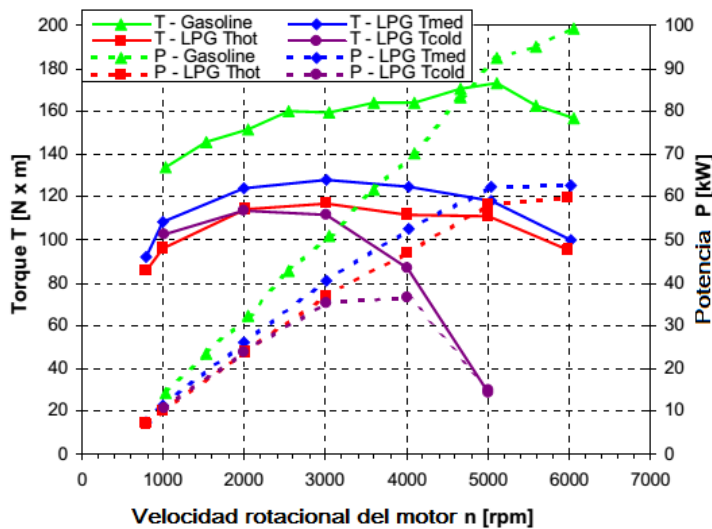


Figura 2-13. Grafica de torque (línea sólida) y potencia máxima (línea punteada) utilizando gasolina (triángulos) y GLP (diamantes=Tmed, cuadrados=Thot y Círculos=Tcold) (Masi, M. 2012).

De la **Figura 2-14**, Masi, M. (2012), argumenta que el consumo del GLP en el motor tiende a tener un comportamiento lineal en un régimen de bajo a intermedio en la gráfica, en la cual el consumo de combustible indica una alta eficiencia en la conversión energética durante el proceso de combustión. Durante el experimento se utilizó un GLP a distintos flujos máxicos con una capacidad calórica de 46000 KJ/kg en una mezcla de 53 – 47% de propano-butano y temperatura de vaporizador a Tmed. Como consecuencia, la

convencionales sobre territorio colombiano

eficiencia del motor a carga máxima fue de 0.29, excepto en el régimen de reposo del motor que se notó una menor eficiencia. Por otro lado, a medida que se disminuye el flujo másico de GLP hacia el motor, la eficiencia térmica del motor mejora significativamente, lo que hace pensar en la necesidad de ajustar dinámicamente el flujo del combustible de acuerdo a la presión de entrada y velocidad de rotación del motor, tal como había argumentado Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. (2015) en el caso anterior.

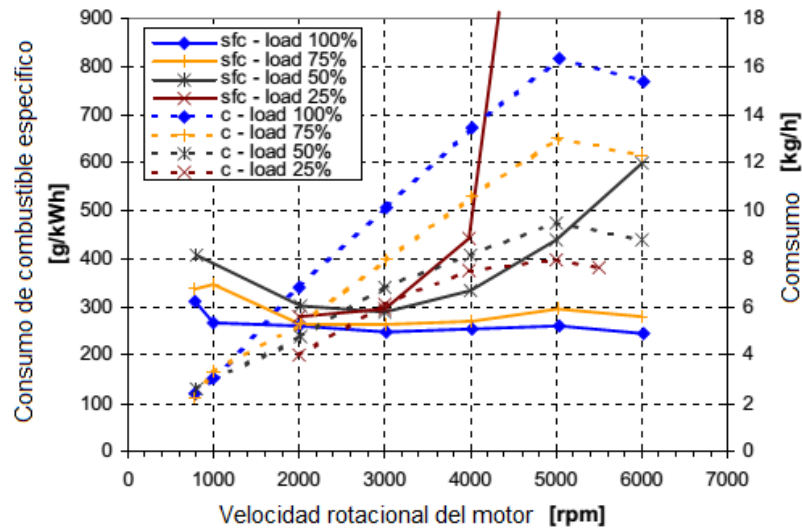


Figura 2-14. Consumo de combustible específico (Línea sólida) y consumo de combustible en operaciones del GLP a diferente carga del motor (Línea punteada) (Masi, M. 2012).

En búsqueda de enfatizar la diferencia del consumo real entre el GLP y la gasolina, Masi, M. (2012) llega a un mismo planteamiento que Ceviz et al., (2015), en el cual a altas temperaturas de vaporizador-regulador del GLP, se presenta un incremento de presión importante de $6E-05$ pascales a 31.7 °C, que puede suceder a velocidades bajas a intermedias de rotación en el motor, cuando el fluido refrigerante del vaporizador posee un mayor contacto con el mismo. Demostrando en la **Figura 2-15**, que a altos niveles de presión (mod), mayor cantidad de combustible se entrega en los cilindros, y como es natural, un mayor consumo del mismo por cada ciclo (líneas completas), mientras que a bajas presiones (std) se presenta el caso contrario. Como puntos importantes, el autor argumenta la necesidad de un ajuste de la relación de aire-combustible cercano a la relación estequiométrica, que contribuye a una mejor concentración de los hidrocarburos en el cilindro y un respectivo aumento en la potencia del motor. En otras palabras, el centro de control de inyección del GLP en el vehículo, debe ser capaz de ajustar los parámetros de relación aire-combustible mediante la medición de las señales de oxígeno. No obstante, algunos fabricantes tienden a tener un margen muy alto de incertidumbre en la cantidad de oxígeno proporcionado a altas revoluciones debido a la alta demanda del

mismo, de la cual no es posible ejercer un apropiado control, que garantice la relación estequiometrica que aumente la potencia a alto rendimiento del motor.

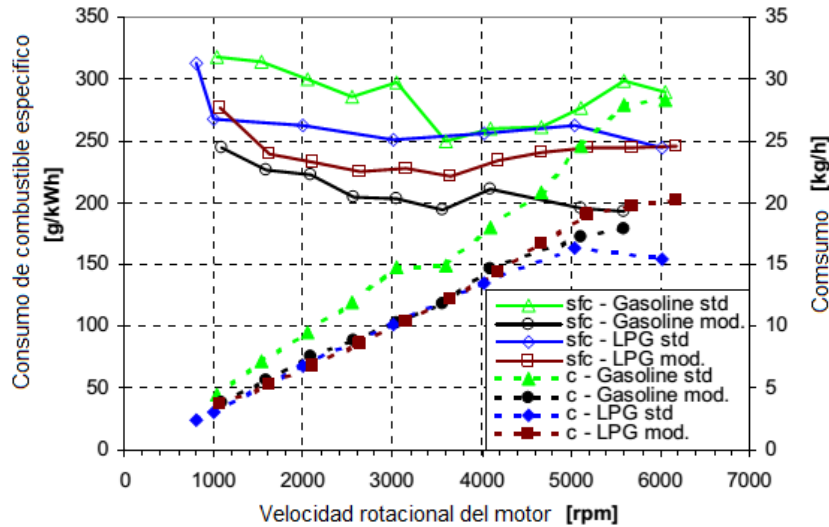


Figura 2-15. Consumo de combustible específico a carga máxima (Línea sólida) y consumo de combustible en operaciones del GLP a diferente carga (Línea punteada) (Masi, M. 2012).

2.2.3 Equivalencia energética o autonomía teórica entre combustibles

Para poder relacionar energéticamente tres tipos de combustible como el GLP, gas natural vehicular y la gasolina, se requiere conocer sus distintas propiedades intrínsecas, tal como sus poderes caloríficos. Luego, el reto adicional se basa en la medición del consumo de un combustible gaseoso y uno líquido a temperatura ambiente, debido a que el caso de la gasolina la medición se hace de forma directa pesando el tanque externo de combustible, mientras que para el caso del GLP, parte del combustible se encuentra líquido y la otra en gas a una presión más elevada que la del ambiente, por lo tanto, para llevarlos a un punto en común de uso en un motor (inyección a presión ambiente) a los dos combustibles, se debe estimar el volumen de GLP mediante condiciones normalizadas utilizando las medidas de presión y curvas de carga (mismo procedimiento para el gas natural). Luego, de forma empírica se puede realizar un cálculo de la equivalencia energética o autonomía teórica entre los distintos combustible como medio de comparación y así obtener conclusiones representativas sobre los tipos de combustibles. El procedimiento se define de la siguiente manera:

- a) Obtener los valores de densidad y capacidades caloríficas de cada combustible a condiciones normalizadas o estándares:

Gasolina: $\rho_{gasolina} = 743 \text{ kg/m}^3$, $C_{pgasolina} = 43.448 \text{ MJ/kg}$ y $C_{pgasolina} = 32281.864 \text{ MJ/m}^3$ (Mezcla de 10% en volumen de etanol) (Gonzales., 2010).

GLP: $\rho_{GLP} = 2.261 \text{ kg/m}^3$, $C_{pGLP} = 49.7 \text{ MJ/kg}$ y $C_{pGLP} = 112.4 \text{ MJ/m}^3$ (Tomando en cuenta un promedio de la gravedad específica entre el propano y butano comercial de la **Tabla 3-9**).

Gas: $\rho_{Gasnatural} = 0.7752 \text{ kg/m}^3$, $C_{pGasnatural} = 42.619 \text{ MJ/kg}$ y $C_{pGasnatural} = 33.038 \text{ MJ/m}^3$ (Baquero, M., & Avila, O., 2008).

- b) Con los datos anteriores se busca el equivalente energético entre el GLP-gasolina, gasolina-gas natural y GLP-gas natural:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de gasolina equivale} = 287.2 \text{ m}^3 \text{ de GLP}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ de gasolina equivale} = 977.1 \text{ m}^3 \text{ de gas natural}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ de gas natural equivale} = 0.294 \text{ m}^3 \text{ de GLP}$$

- c) Ahora se calcula por cada unidad de volumen de gas natural y GLP cuantos galones de gasolina se necesitan:

$$\frac{287.2 \text{ m}^3 \text{ GLP}}{\text{m}^3 \text{ gasolina}} * \frac{\text{m}^3 \text{ gasolina}}{264.17 \text{ gal gasolina}} = 1.087 \frac{\text{m}^3 \text{ GLP}}{\text{gal gasolina equivalente}}$$

$$\frac{977.1 \text{ m}^3 \text{ gas natural}}{\text{m}^3 \text{ gasolina}} * \frac{\text{m}^3 \text{ gasolina}}{264.17 \text{ gal gasolina}} = 3.698 \frac{\text{m}^3 \text{ gas natural}}{\text{gal gasolina equivalente}}$$

Demostrando la superioridad que posee el GLP sobre el gas natural en términos de capacidad calórica y relación volumétrica con respecto a la gasolina.

- d) Si se toma en cuenta la autonomía de 37 km/gal a gasolina de un vehículo Chevrolet Captiva 2015 de de 2,4 litros de cilindraje, y un Chevrolet Spark de 1.2 litros de cilindraje y autonomía de 56.33 km/gal a gasolina (U.S Energy department., 2015). Se puede calcular la autonomía ideal del mismo suministrándole GLP o GNC mediante la siguiente correlación:

- Chevrolet Captiva

$$37 \frac{km}{gal \text{ gasolina}} * \frac{gal \text{ gasolina}}{1.087 m^3 \text{ GLP}} = 34.03 \frac{km}{m^3 \text{ GLP}}$$

$$37 \frac{km}{gal \text{ gasolina}} * \frac{gal \text{ gasolina}}{3.698 m^3 \text{ gas natural}} = 10,005 \frac{km}{m^3 \text{ gas natural}}$$

- Chevrolet Spark

$$56.33 \frac{km}{gal \text{ gasolina}} * \frac{gal \text{ gasolina}}{1.087 m^3 \text{ GLP}} = 51.82 \frac{km}{m^3 \text{ GLP}}$$

$$56.33 \frac{km}{gal \text{ gasolina}} * \frac{gal \text{ gasolina}}{3.698 m^3 \text{ gas natural}} = 15,232 \frac{km}{m^3 \text{ gas natural}}$$

Si se tomara en cuenta la capacidad de almacenamiento de combustible para ambos vehículos, en un caso hipotético que se pudiera almacenar los combustibles en el mismo recipiente, se podría determinar la autonomía total de cada combustible.

Para el caso del GLP:

- Chevrolet Captiva: Posee una capacidad de almacenaje de combustible de 19 galones, por lo cual, si se tomará en cuenta la normativa de llenado de GLP vehicular, solo se podría llenar el tanque de almacenamiento hasta un 80% de su

volumen total con combustible líquido, es decir, 15.2 galones, mientras que 3.8 galones sería GLP en estado gaseoso a una presión de 200 psi.

Aplicando la ley de gas ideal en el GLP en fase gaseosa para hallar la cantidad de volumen a temperatura ambiente a suministrar al motor:

$$P_{alm} V_{alm} = P_{amb} V_{amb} \Rightarrow V_{amb} = \frac{P_{alm} V_{alm}}{P_{amb}} \Rightarrow V_{amb} = 51.7 \text{ gal}$$

Luego, se supone que el GLP se suministra al motor en fase gaseosa y se debe convertir todo el combustible líquido en gas para poder obtener la cantidad total de gas a temperatura y presión ambiente que se puede usar:

$$GLP_{gastotal} = \frac{\rho_{GLPliq}}{\rho_{GLPgas}} V_{GLPliq} + V_{GLPgas} = \frac{510 \text{ kg/m}^3}{2.261 \text{ kg/m}^3} 0,05753826 \text{ m}^3 + 0,1957058 \text{ m}^3 = 13.2 \text{ m}^3$$

Luego la autonomía teórica total en el vehículo usando GLP es:

$$34.03 \frac{\text{km}}{\text{m}^3 \text{ GLP}} * 13.2 \text{ m}^3 \text{ GLP} = 449.2 \text{ km}$$

Chevrolet Spark: bajo la misma base que con el vehículo anterior, la capacidad total de almacenaje de combustible de este automóvil es de 9.2 galones. El tanque se llena con GLP líquido al 80 % de su capacidad de almacenaje y 20% lo recubre el combustible en fase gaseosa a una presión de 200 psi.

Aplicando la ley de gas ideal en el GLP en fase gaseosa:

$$P_{alm} V_{alm} = P_{amb} V_{amb} \Rightarrow V_{amb} = \frac{P_{alm} V_{alm}}{P_{amb}} \Rightarrow V_{amb} = 25.03 \text{ gal}$$

Luego la cantidad total de gas a temperatura y presión ambiente que se puede usar es:

$$GLP_{gastotal} = \frac{\rho_{GLPliq}}{\rho_{GLPgas}} V_{GLPliq} + V_{GLPgas} = \frac{510 \text{ kg/m}^3}{2.261 \text{ kg/m}^3} 0,02786063 \text{ m}^3 + 0,094748857 \text{ m}^3 = 6.38 \text{ m}^3$$

Luego la autonomía teórica total en el vehículo usando GLP es:

$$51.82 \frac{\text{km}}{\text{m}^3 \text{ GLP}} * 6.38 \text{ m}^3 \text{ GLP} = 330.6 \text{ km}$$

Para el caso del gas natural vehicular:

- Chevrolet Captiva: al utilizar el mismo volumen del tanque de almacenamiento de gasolina (19 galones) para el cilindro contenedor del gas natural vehicular (GNV) a una presión de 20 MPa (2900 psi) (presión máxima de operación de cilindros en normativa GNV), se puede utilizar la ley de gas ideal para hallar la cantidad de volumen de GNV a temperatura ambiente a suministrar al motor:

$$P_{alm} V_{alm} = P_{amb} V_{amb} \Rightarrow V_{amb} = \frac{P_{alm} V_{alm}}{P_{amb}} \Rightarrow V_{amb} = 3750.3 \text{ gal} = 14,2 \text{ m}^3$$

Luego la autonomía teórica total en el vehículo usando GNV es:

$$10.005 \frac{\text{km}}{\text{m}^3 \text{ gas}} * 14.2 \text{ m}^3 \text{ gas} = 142.1 \text{ km}$$

- Chevrolet Spark: al utilizar el mismo volumen del tanque de almacenamiento de gasolina (9.2 galones) para el cilindro contenedor del gas natural vehicular (GNV) a una presión de 20 MPa (presión máxima de operación de cilindros en normativa GNV), se puede utilizar la ley de gas ideal para hallar la cantidad de volumen de GNV a temperatura ambiente a suministrar al motor:

$$P_{alm} V_{alm} = P_{amb} V_{amb} \Rightarrow V_{amb} = \frac{P_{alm} V_{alm}}{P_{amb}} \Rightarrow V_{amb} = 1815.94 \text{ gal} = 6.87 \text{ m}^3$$

Luego la autonomía teórica total en el vehículo usando GNV es:

$$10.005 \frac{\text{km}}{\text{m}^3 \text{ gas}} * 6.87 \text{ m}^3 \text{ gas} = 68.73 \text{ km}$$

Para el caso de la gasolina, la autonomía teórica total es de:

- Chevrolet Captiva:

$$37 \frac{\text{km}}{\text{gal gasolina}} * 19 \text{ gal gasolina} = 703 \text{ km}$$

- Chevrolet Spark:

$$56.33 \frac{\text{km}}{\text{gal gasolina}} * 9.2 \text{ gal gasolina} = 518.24 \text{ km}$$

De los resultados anteriores, es posible destacar que el GLP posee aproximadamente 3.2 veces mayor autonomía vehicular que el gas natural vehicular en una camioneta Chevrolet Captiva y Chevrolet Spark modelos 2015. No obstante, la gasolina se mantiene en un margen discreto de 37% superior autonomía que el GLP para ambos vehículos. Además, se debe tomar en cuenta que los resultados del GLP en escala real deberían ser inferiores a los expuestos en este trabajo, debido a la forma de conducción del usuario y a que se puede presentar una baja eficiencia de los accesorios, equipos de suministro del GLP y motores de combustión interna en particular a causa de los propios principios termodinámicos.

3. Especificaciones de calidad

3.1 Determinación de las variables de calidad del GLP

Desde mediados de la década de los ochenta, es mucho lo que se ha debatido acerca de la importancia de la utilización del gas licuado de petróleo (GLP) en los sectores residencial, comercial, industrial y automotor como estrategias que le permitirán al país hacer un uso más racional y diversificado de este recurso energético. Esta masificación exige que el GLP cumpla con ciertas especificaciones de calidad, de manera que se pueda garantizar su uso eficiente, seguro y económico en cualquiera de las fases de la cadena de producción, almacenamiento y consumo (García et al., 1997).

El control de calidad se aplica a la composición química del combustible, específicamente en lo relacionado a sus contaminantes y sobre cada una de sus propiedades físicas, con el único objetivo de tener un combustible eficiente y seguro en el vehículo automotor. Por lo tanto, en este tópico se pretende demostrar la importancia de que el GLP cumpla con las especificaciones de calidad, los métodos de pruebas en laboratorio y normativas internacionales de uso automotor, con el propósito de presentar una reglamentación colombiana para su uso vehicular (García et al., 1997).

En el ambiente de competencia en que actualmente se mueve el mundo, existe una estrecha relación entre la calidad de un producto y sus posibilidades de penetración y posterior sostenimiento en el mercado. Por ende, la calidad de un producto se debe al conjunto de atributos y propiedades que este posee, mediante las cuales responda durante su uso a las expectativas o requerimientos del cliente, usuario o consumidor. Sin embargo, el concepto de “calidad” no significa lo mejor, lo óptimo o lo perfecto en sentido absoluto; sino lo más apropiado para satisfacer los requerimientos del cliente, especialmente aquellos relacionados con el uso o aplicación específica del producto y con su precio de venta. Aun así, el mercado de los combustibles gaseosos en el país está aún lejos de ser un mercado de competencia perfecta (existencia de numerosos productores y distribuidores que garanticen una oferta diversificada), la coyuntura que se avecina en la entrada del incremento de la producción nacional de GLP, hace necesario que las entidades competentes le den una mayor importancia al control de calidad de estos, mediante la introducción en los contratos de compraventa las cláusulas claras sobre las especificaciones de calidad que debe cumplir el combustible para su comercialización con uso automotor. Por otro lado, no se desprecia que la calidad también juega un papel importante en los demás procesos que involucra su comercialización, transporte, distribución y almacenamiento en el territorio colombiano (García et al., 1997).

De lo anterior, las especificaciones de calidad del GLP deben tener en cuenta aquellas variables que garanticen que su uso se ajuste a criterios exigentes en cuanto a eficiencia

energética, seguridad, economía y reducción de impactos negativos al medio ambiente (ver **Figura 3-1**). De este modo, el control de calidad se constituye en la garantía para que dicho energético traiga beneficios económicos reales a las regiones de Colombia (García et al., 1997).

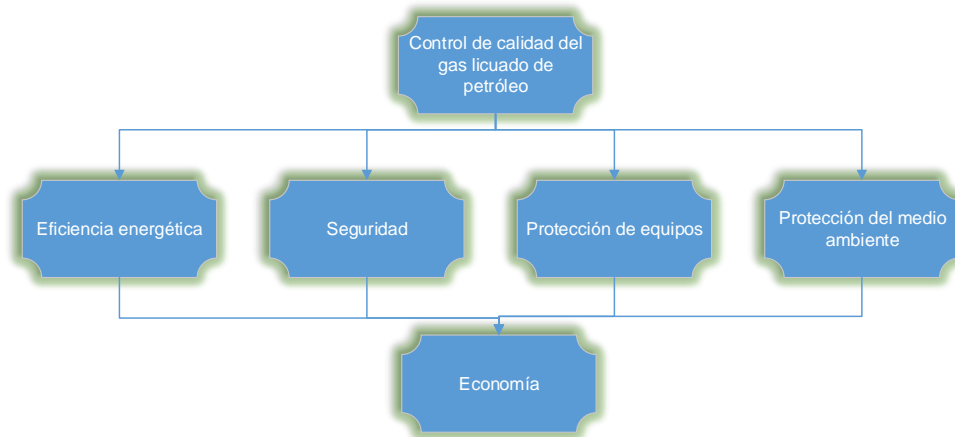


Figura 3-1. Objetivos del control de calidad en combustibles gaseosos (García et al., 1997).

Las propiedades que garantizan la calidad del combustible son la composición, gravedad específica, presión de vapor, límite de inflamabilidad y poder calorífico.

- **Composición**

Según la norma ASTM D1835-97, los gases licuados de petróleo deben ser lo suficientemente rigurosos para satisfacer la presión de vapor, número de octanos (olefinas) y los requerimientos de volatilidad/residuos en una vasta mayoría de aplicaciones y equipos existentes (American Society for Testing Methods., 1997). De este modo, Totten et al., (2003) menciona que las pequeñas diferencias en la composición del GLP dentro de límites especificados para su uso, son generalmente insignificantes y no afectan ni su valor en el comercio o en su aplicación final. Por ejemplo, un GLP constituido en su mayor parte de propano con 1-2% de etano obtiene un rendimiento similar en su uso automotor y en valor de mercado que un mismo GLP con 5-6% de etano. Otro caso similar, es el del uso de un GLP de propano que contiene 1% de propenos que el de uno con 5% de propenos (Propano HD-5). No obstante, en este último caso, este combustible tiende a tener una presión de vapor mayor que el primero, y por lo tanto es muy apetecido su uso preferente en vehículos automotores, teniendo la ventaja de que su valor comercial es similar al primero.

Los autores también argumentan que dada a la baja cantidad de componentes de mezcla de los distintos GLPs del mercado, es posible realizar una suma lineal de sus distintas propiedades. Es decir, los cálculos basados en su peso o correlaciones empíricas por cromatografía de gases por la norma ASTM D2598-02 (ver capítulo A) pueden ser usados con bastante exactitud para la determinación de la presión de vapor, densidad y número de octano como alternativa de la norma ASTM D1267-02 que constituye la medición experimental en laboratorio de cada una de estas propiedades. De manera similar, puede realizarse una medición de la volatilidad relativa mediante sumas lineales o correlaciones empíricas como alternativa a la norma ASTM D1837-02A que constituye la medición de estas propiedades mediante el conocimiento de los componentes pesados del GLP (Pinzon, N., 2010).

- Presión de vapor

Históricamente, la presión de vapor del GLP fue una de las especificaciones más importantes en la industria, siendo responsable de la mayoría de los problemas en etapas tempranas de esta. La propiedad como tal, se encuentra invariablemente ligada a la presión del contenedor y a las válvulas de seguridad certificadas que garanticen la estabilidad termodinámica del combustible durante el transporte o en estado estático. Por lo que generalmente, se considera que su cumplimiento y revisión de estos durante su uso sea crítico. Sin embargo, estándares modernos de contenedores de presión, así como equipos de producción y análisis de GLP apuntan directamente a la eliminación de la presión de vapor ante el mínimo error o problema operacional (Shipman, R., 2013).

Los estándares sobre esta propiedad varían dependiendo de la jurisdicción, pero típicamente, los equipos que trabajan con GLP poseen un amplio margen de presión. Por ejemplo, un típico cilindro de GLP tasado para una presión de trabajo de 250 psig (17,23 bar) por el fabricante, usualmente son probados con el doble de esta presión (500 psig), estando equipados con válvulas de alivio de presión con márgenes de trabajo de 250-500 psig. Por lo tanto, en este punto se destaca que el propano debe ser calentado por encima de los 60 °C (140 °F) para alcanzar la presión de ruptura del contenedor y la válvula reguladora. No obstante, en los últimos años, la presión de rotura real de los contenedores se ha controlado para que estos puedan soportar hasta un máximo de tres veces la presión de trabajo. Las compañías multinacionales que trabajan con la producción y transporte del GLP están obligados a realizar una prueba de presión en uno de los cilindros escogidos aleatoriamente hasta su punto de quiebre como procedimiento de control de la calidad del acero y las soldaduras de los equipos. Dada la razón anterior, es muy común que los fabricantes sobreestimen el rango de sus cilindros contenedores para evitar incertidumbres en el costo del proceso de certificación. Por ejemplo, los cilindros de prueba para uso automotor son tasados para presiones de trabajo de 1800 psig y a menudo estos son diseñados para soportar sobrecargas cercanas a los 5000

psig e incluso en casos especiales se exceden a presiones de trabajo cercanas al rango de 12000 – 15000 psig (827,37 – 1034,21 bar). Como conclusión, todos los proveedores de cilindros, recipientes de almacenamiento, camiones y trenes requieren inspección periódica, y recertificación de estos equipos, eliminando finalmente la presión de vapor del GLP como un problema significativo en el diseño o conversión de vehículos de gasolina a este (Totten et al., 2003).

La presión de vapor de un GLP, es medida hallando de primera mano la composición del combustible usando la norma ASTM D2163-91 y luego usando los métodos de cálculo de la norma ASTM D2598-02 para determinarla finalmente. Sin embargo, este método no puede ser utilizado si el combustible presenta trazas de metano, ya que no se poseen datos de presión de vapor en presencia de este, por lo tanto, en este caso es necesario realizar un cálculo manual en algunas circunstancias. Además, otra consideración importante, es que el cálculo de la presión de vapor en la norma ASTM D2598-02 tiende a ser medianamente alta en el caso de alto contenido de etano, debido a que se debe realizar una extrapolación de los datos por encima del punto crítico de este componente. No obstante, la ASTM en la actualidad diseñó una norma más actual similar a la D5191-03 y D6378-03 de la gasolina, que utiliza transductores de presión para facilitar la medición de la presión de vapor del combustible experimentalmente (Totten et al., 2003).

En la actualidad, no existe un criterio universal aceptado del ajuste máximo de las especificaciones de la presión de vapor del GLP, siendo un área de futura investigación y estandarización internacional. De la problemática anterior, las especificaciones de la norma ISO 9162:1989 posee una presión de vapor máxima en los contenedores de 1550 kPa a 40 °C, comparado con los 208 psig (1435 kPa) a 100 °F por la ASTM, GPA y CGSB. Por lo tanto, cálculos con la ecuación de estado que indica la norma ISO estándar puede corresponder cerca de 213 psig a 100 °F (37.8 °C), haciendo que la norma estándar ASTM sea más conservativa con cerca de 5 psig. Esta diferencia generalmente no es significativa en las operaciones de día a día y en la práctica para uso vehicular, debido a que el rango máximo de la presión de vapor del GLP se podría encontrar entre estos dos estándares a 100 °F (García et al., 1997).

Con el propósito de hallar esta y otras relaciones de presiones de vapor con temperatura, la **Figura 3-2** muestra presiones de vapor típicos para propano y butano comercial de la norma ASTM D1835-97, en donde la curva del primero es muy semejante al GLP HD5 usado para vehículos automotores, debido a su bajo contenido de olefinas. Esta semejanza es posible tomarla en cuenta, ya que en las normativas es permitido un rango para este combustible entre 92.5 - 99% de propano, 1 - 5% de propenos y 0.5 – 2.5% de butano y componentes pesados, en donde habría que tomar en cuenta las incertidumbres del sistema en general para calcular bien esta propiedad (American National Standard. 1997). Por otro lado, Pinzon, N., (2010) muestra los procedimientos

experimentales para hallar la presión de vapor del GLP mediante la norma ASTM D1267-02, tal como se muestra en el capítulo A.

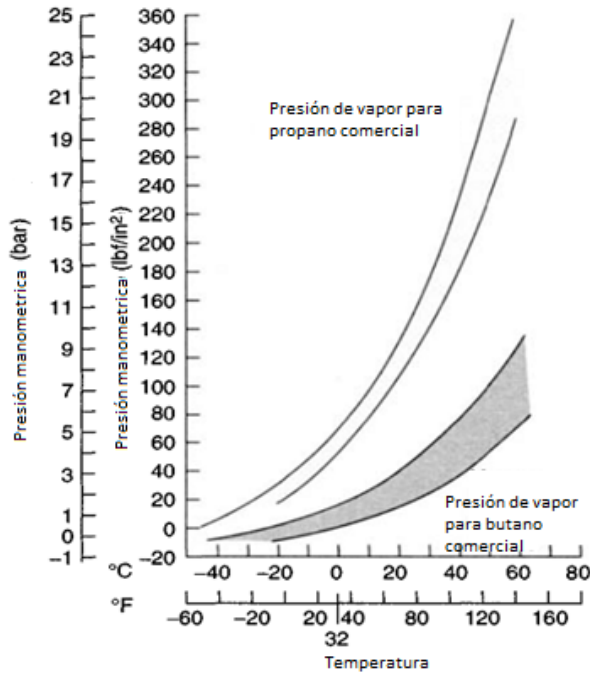


Figura 3-2. Curvas de presión de vapor con respecto a la temperatura para propano y butano comercial (Dennis., 2002).

- Gravedad específica

La gravedad específica de una sustancia es la relación entre su densidad y la de una sustancia de referencia, tomando ambas densidades a las mismas condiciones de presión y temperatura en las mismas unidades. En el caso del GLP en estado gaseoso (presión y temperatura ambiente) se toma como sustancia de referencia el aire, dando una connotación directa sobre lo ligero o pesado del GLP con respecto a este; por lo tanto, el valor de gravedad específica que usualmente se le atribuye al GLP es de 1.5 – 2.0 con respecto al aire, siendo el combustible mucho más pesado que el aire; hecho que es muy importante en el caso de una fuga. Por otro lado, la gravedad específica del GLP en su estado líquido (presiones > 690 kPa y temperatura ambiente) toma como sustancia referencia el agua, ya que al comparar su valor con el correspondiente al que tendría como gas, se puede estimar el factor de expansión del líquido al vaporizarse y por lo tanto la eficiencia de almacenamiento en los contenedores. El valor de gravedad específica que usualmente se le atribuye industrialmente es de 0.5 con respecto al agua. De lo anterior, esta propiedad es un parámetro clave para el transporte y el consumo del combustible desde la refinería hasta las estaciones de suministro en las regiones (Dennis., 2002). En el capítulo A, se muestra el procedimiento experimental para hallar la gravedad específica (densidad relativa) de la norma ASTM D1657-02 (Pinzon, N., 2010).

Otro caso importante en el cual se necesita conocer la gravedad específica es cuando se mezclan GLPs provenientes de procesos de refinamiento con composiciones diferentes, ya que, al generarse los gases al interior del recipiente de almacenamiento por el calor que recibe el mismo, estos tienden a estratificarse presentándose una sobrepresión. Este fenómeno se da por el continuo calentamiento de la capa más densa de gas que no es lo suficientemente boyante para penetrar en la capa superior menos densa del otro gas. Por lo tanto, con el tiempo, la transferencia de calor y masa entre las capas tiende a igualar la densidad, generando que las dos capas se mezclen rápidamente y el gas más caliente genere aún más vapor de la fase líquida para liberar la energía contenida, siendo es hecho muy peligroso durante su uso vehicular (Dennis., 2002).

- Poder calorífico

Esta propiedad es definida como la cantidad de energía liberada por unidad de volumen de un gas (o unidad de masa), cuando es quemado a temperatura y presión estándar, siendo expresada en términos de megajoules por metro cubico de gas a 15°C y 1016 mbar. Valores típicos de poder calorífico del GLP y otros gases combustibles como medio de comparación son mostrados en la **Tabla 3-1** (Dennis., 2002).

Poder calorífico	$\frac{MJ}{s\ m^3}$	$\frac{BTU}{s\ ft^3}$	$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{BTU}{lb}$
Gases				
Propano comercial	93.1	2500	50.0	21500
Butano comercial	121.8	3270	49.3	21200
Gas de pozo	4.7 – 6.1	125 – 165	–	–
Gas domestico	14 – 20.5	375 – 550	–	–
Gas natural	31.6 – 46.6	850 – 1250	–	–
Acetileno	56	1500	49.9	21460

Tabla 3-1. Valores típicos de poderes caloríficos (Dennis., 2002).

De la **Tabla 3-1**, se puede destacar que el poder calorífico del GLP puede llegar a ser de dos a cuatro veces más alto con respecto al gas natural, por lo tanto, su combustión generaría mucho más calor. Esto en cierta manera, podría generar problemas a la hora de la implementación del GLP en su estado puro (propano o butano) en motores de automóviles, debido a la máxima resistencia térmica que poseen los componentes internos del mismo, pudiendo dañar seriamente el bloque del motor, empaque de anillos e inclusive componentes más críticos como el árbol de leva y pistones. (Dennis., 2002).

La capacidad calórica del GLP puede ser hallada mediante la norma ASTM D2163-91 que involucra la cromatografía de gases, tal como Pinzon, N., (2010) lo sugiere en el capítulo A.

- Límites de inflamabilidad

Un gas es inflamable si a través de una mezcla con aire puede propagar una llama. Estos se caracterizan por poseer un límite inferior (L.I.I) y superior de inflamabilidad (L.S.I). El L.I.I es la concentración de gas en la mezcla aire-combustible, a partir de la cual la mezcla es inflamable y el L.S.I es la concentración por encima de la cual la mezcla deja de ser inflamable, debido a la deficiencia de oxígeno y exceso de gas en el medio. Cuando una corriente de aire es mezclada con GLP se forma una mezcla inflamable, que puede serlo en un rango aproximado de 2% de vapor de GLP en aire como límite inferior y hasta 10% de vapor de GLP en aire como límite superior a presión y temperatura ambiente. Fuera de este rango, cualquier mezcla es demasiado pobre o enriquecida como para propagar una llama. Sin embargo, a presiones altas el límite superior de inflamabilidad se aumenta de una forma no lineal llegando a ser un problema en lugares confinados o con poca ventilación (Dennis., 2002).

En comparación con otros combustibles gaseosos, los límites de inflamabilidad del propano y butano comercial son muy cercanos, permitiendo la estandarización de las regulaciones de confinamiento y/o almacenamiento seguro de este combustible (Dennis., 2002).

3.1.1 Efectos en la calidad del GLP a causa de contaminantes

Hasta este punto se han establecido las especificaciones que garantizan la calidad del GLP como combustible automotor. En este tópico se hablará de los efectos en la calidad de este con respecto a contaminantes y contenido de humedad.

- Efectos en la calidad del GLP de acuerdo a la composición en hidrocarburos insaturados

Algunas investigaciones recientes indican que el contenido de olefinas en el GLP va relacionado con la limpieza, estabilidad o emisiones del escape del automóvil de manera similar como con la gasolina (Hewitt., 1998). Sin embargo, existen diferencias significantes y no hay un consenso de estas comparaciones en el momento. Por ejemplo,

el tanque de depósito de GLP no se encuentra atmosféricamente ventilado, por lo tanto, no existe una preocupación por la reacción oxidativa entre el aire y el combustible, tal como si sucede con la gasolina y el diésel. Por otro lado, el carburador-vaporizador de los vehículos propulsados con GLP tiende a tener residuos no volátiles de componentes más pesados de carbono, y no compuestos oxidativos como gomas provenientes de combustibles con alta concentración de olefinas, tiofenos y otras trazas de componentes reactivos de la gasolina. Sin embargo, algunos desarrolladores de los sistemas de inyección electrónica del GLP han experimentado importantes dificultades con los depósitos de compuestos orgánicos e inorgánicos que interfieren con el correcto funcionamiento de los inyectores. En este punto, es importante destacar que el propano y butano derivado de procesos de separación del petróleo y el gas contienen muy bajas concentraciones de olefinas, por otro lado, si estos son obtenidos mediante procesos de “crackeo” catalítico pueden llegar a contener altas concentraciones de olefinas (cercas a 49% del total del GLP), o mezcladas con una corriente de alta concentración de propano o butano (según sea el caso de la presencia de los grupos de olefinas). Luego de ser refinado el GLP hasta obtener un 5% de propenos en volumen, se alcanza un combustible de norma ASTM de “calidad especial” o propano HD5 usualmente usado en EEUU para vehículos (Hewitt., 1998).

A partir de lo anterior, estudios recientes auspiciados por la compañía *California Air Resources Board (CARB)* recomiendan la relajación de las especificaciones del GLP con respecto a los propenos y residuos volátiles para uso automotriz, citando una relación de 10% de propenos/5% de butenos en el combustible que equivalen a un mejor rendimiento en emisiones en automóviles modernos (Brasil., 1998). Incluso recomiendan un límite de máximo de 0.5% de composición máxima de pentanos y elementos pesados. Estos cambios fueron propuestos para preservar y mejorar el suministro actual de GLP en el estado de California en EEUU, mientras mantienen un nivel de emisiones adecuado (Propane101., 1998).

- Efectos en la calidad del GLP de acuerdo a su contenido de humedad

Los clientes necesitan un combustible que sea confiable en climas fríos para sus automóviles. Como resultado, la humedad es probablemente la especificación más crítica del GLP a tener en cuenta en regiones montañosas de nuestro país. Usualmente, esta es determinada mediante pruebas de rendimiento del motor que indican la conveniencia de su uso en automotores a estas condiciones ambientales, pero no se determina el contenido de agua de manera cuantitativa. Este último criterio tiende a ser más riguroso, debiendo ser obligatorio para prevenir la separación de agua libre, la formación de hidratos y hielo en el tanque de depósito o en los equipos de procesos bajo condiciones frías. Sin embargo, en algunas aplicaciones, se puede presentar una inadecuada

liberación de agua en el vaporizador por baja eficiencia térmica de este, necesiéndose un agente químico tal como el metanol, dado a que la fase de agua separada no se congelaría a causa de que, en presencia de este, las moléculas de agua no se cristalizan en un rango más amplio de temperaturas, cumpliendo con los requerimientos específicos de humedad en los vehículos automotores. En este punto, el propano y mezclas de propano-butano son los únicos combustibles que requieren de una especificación de humedad muy baja y no basta con una simple verificación visual de su contenido (tal como la norma ASTM D4176-93 lo especifica), debido a que el ser humano solo puede apreciar agua libre hasta 20-40 ppmv, a simple vista (Cannon., 1999). Por otro lado, las pruebas de contenido libre de agua en el butano se realizan mediante inspección del fondo de recipiente contenedor y no requieren de un criterio riguroso, debido al menor efecto de auto-refrigeración que presenta este combustible que no permite que la temperatura del contenedor baje lo suficiente como para generar hidratos/hielo. Este fenómeno de auto-refrigeración de Joule-Thomson se refiere al efecto de pérdida de temperatura a medida que un gas se despresuriza a temperatura ambiente, a través de válvulas, orificios, reguladores de presión u otro tipo de dispositivo. Por lo tanto, este efecto es dependiente de los tipos de procesos, en la cual si es adiabático se da en válvulas, isentropicos en turbo-expansor o politropico en accesorios o equipos entre válvulas y expansores (Fisher control., 2003). El contenido de humedad del GLP puede ser hallado de manera experimental siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D2713-91, tal como Pinzon, N., (2010) lo sugiere en el capítulo A.

- Efectos en la calidad del GLP de acuerdo a su contenido de H_2S y sulfuros

Históricamente, el contenido total de sulfuros en combustibles como el GLP fueron siempre mucho menores que otros combustibles automotores. Recientemente, los requerimientos fueron cambiados para incluir una solución odorante de mercaptanos para la percepción del gas en ambientes abiertos, la cual se mantiene muy estrictamente aferrada al límite máximo de 80 ppm de sulfuros en el estándar California ARB HD10. En este punto, la norma ASTM D1838-91 se encarga de regular y controlar los compuestos de sulfuros corrosivos en el GLP para proteger las tuberías, accesorios y equipos basados en cobre para permitir su almacenamiento, transporte y aplicación segura según sea su utilidad. Esto se debe a que, dependiendo de la naturaleza compleja del compuesto de sulfuro, su reactividad puede ser mayor o menor dado el acontecimiento de la prueba. Por lo tanto, mezclas de ciertos compuestos de sulfuro pueden ser más corrosivas en el cobre que cada uno en específico actuando sobre el mismo, lo cual puede conducir a situaciones en donde se mezclen dos corrientes de GLP con compuestos de sulfuros distintos y ocasionar graves daños en el sistema de tuberías y almacenamiento (Totten et al., 2003).

En la gran mayoría de las veces, los problemas por corrosión en la cadena de producción y transporte de GLP va asociado con la presencia de H_2S , S_8 (sulfuro elemental con anillo de ocho miembros), COS (sulfuro de carbonilo), $RSSxR$ (Poli sulfuros de alquil), $HSSxH$ (Polisulfones), H_2O y O_2 . Siendo las dos primeras al mezclarse una de las soluciones más reactivas y difíciles de detectar en laboratorio, que generan poli sulfuros intermedios que son muy corrosivos y reaccionan rápidamente con la mayoría de metales. No obstante, la corrosión de tuberías y equipos con cobre en el sistema de uso del GLP, debido directamente al mal tratamiento del combustible durante su producción, o poca documentación del contenido composicional de GLP de otras refinerías en su transporte por los poliductos (Totten et al., 2003). El contenido de sulfuros del GLP puede ser hallado de manera experimental siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D1835-97, tal como Pinzon, N., (2010) lo sugiere en el capítulo A.

- Efectos en la calidad del GLP de acuerdo al contenido de otros contaminantes

Amoniaco

La presencia de amoniaco en los sistemas vehiculares puede ocasionar tensión y rompimiento por corrosión en tuberías y accesorios de cobre a concentraciones entre 5 – 10 ppmv. En la actualidad no existe una especificación clara de la concentración máxima de amoniaco en presencia de gas propano permisible para el transporte en poliductos. Sin embargo, en pruebas rápidas de campo se usa un tipo especial de papel (tornasol) que se colorea de rojo en presencia mínima de amoniaco (< 1 ppm). No obstante, es necesario recalcar que no es muy común encontrar concentraciones apreciables de amoniaco en combustibles de GLP, debido a que este es removido mediante destilación y separación de corrientes por densidades de fluidos durante el proceso de producción del combustible en refinería. Por otro lado, en el pasado era muy común que se ocasionara contaminación cruzada durante el transporte en camiones cisternas a causa de que estos en ciertas temporadas transportan amoniaco anhídrido como fertilizante para fincas y no se les realizaba un adecuado mantenimiento y limpieza después de su vaciado (Totten et al., 2003).

Hasta este punto se han establecido los rangos y algunas normativas de calidad del GLP como combustible automotor. En el siguiente tópico se hablará de la reglamentación y límites de las especificaciones del GLP a usar en los vehículos de Colombia.

3.2 Reglamentación de especificaciones de calidad del GLP para uso automotor

La normatividad hoy, es una política que se debe involucrar en todas las actividades técnico-económicas que realiza el hombre. Es así como la comercialización de la gran diversidad de bienes y servicios que se ofrecen en un mercado dado, se debe regir por normas destinadas a proteger la salud, garantizar la seguridad e informar el consumidor acerca de las exigencias de fabricación de un determinado producto, al igual que las recomendaciones de uso. De este modo, la normatividad técnica del GLP automotor se concibe como el proceso de formular y aplicar reglas con el propósito de establecer un orden, para beneficio de todos los interesados y la obtención de una economía óptima de conjunto, respetando las exigencias funcionales y de seguridad (García et al., 1997).

La especificación es entonces la representación cuantitativa de una propiedad o del contenido de un compuesto en un determinado producto, como resultado de un consenso entre las partes, con base en principios técnicos, con el único objetivo de garantizar un producto de óptima calidad. Es necesario aclarar, que cada una de las especificaciones del GLP automotor deben ser altamente eficientes, esto significa, que deben brindar un control adecuado de la calidad del producto o servicio, sin ser demasiado restrictiva y al mismo tiempo involucrar el mínimo número de pruebas (García et al., 1997).

La prueba es el mecanismo mediante el cual, un proceso de control de calidad define si un determinado producto, está o no cumpliendo con las especificaciones de las normas. Por lo tanto, las pruebas establecidas para correlacionar las especificaciones deben tener las siguientes características (García et al., 1997):

- Controlar la calidad del producto.
- Medir las propiedades independientemente.
- Medir estas propiedades con adecuada precisión.
- Ser económicas en equipos y fuerza humana.

De acuerdo con el análisis de las variables y efectos en la calidad del GLP del capítulo 3.1 de esta tesis, en este tópico se hará una revisión de la normatividad existente, tanto a nivel nacional como internacional, para el control de la calidad del GLP, haciendo énfasis en las especificaciones existentes, en las pruebas y equipos que permitan verificar dichas especificaciones.

▪ Normatividad técnica para el control de calidad del GLP

Los gases licuados de petróleo son un producto desarrollado en el siglo XX. En el año 1907, se formaron varias compañías en los EEUU con el fin de distribuir un producto denominado “bluagas”, el cual se comercializaba en estado líquido al comprimirlo hasta cerca de 1800 psig. De lo anterior, puede inferirse que las mayores dificultades para el desarrollo del mercado del producto, eran los altos costos de transporte y la complejidad del equipo necesario para su utilización. Por lo tanto, la industria de los GLPs, solo se pudo desarrollar cuando se garantizaron requerimientos como: operaciones a presiones relativamente bajas, composición química controlada y por supuesto un precio competitivo. No obstante, en la misma época otro competidor importante entra en el ruedo, el gas natural, haciendo que el advenimiento del GLP se retrasara. En la aparente ventaja que poseía el GLP, se vio desvirtuada por la inexistencia de políticas de investigación que permitiesen la mejora del procesamiento y el tratamiento del hidrocarburo para ir ajustando su calidad de acuerdo a los requerimientos del mercado (García et al., 1997). Desde ese entonces, cuando se habla de los avances en la tecnología de los combustibles gaseosos es necesario mencionar ciertas entidades cuya misión está orientada a optimizar los diferentes procesos que involucra la cadena tecnológica del GLP. Entre ellas se tiene (García et al., 1997):

- GPSA (Gas processors Suppliers Association): esta asociación fundada en 1928 con el nombre de NGSMA (Natural Gasoline Supply Men’s Association), tuvo como propósito inicial servir de apoyo a su homóloga ya existente la NGAA (Natural Gasoline Association of America). Dichas asociaciones cambiaron sus nombres en 1961 por NGPA (Natural Gas Processors Association) y NGPSA (Natural Gas Processors Suppliers Association); respectivamente. En el año 1974, los nombres mencionados fueron nuevamente cambiados por los que actualmente tienen, GPA (Gas Processors Association) y GPSA (Gas processors Suppliers Association).
- AGA (American Gas Association): Dicha entidad fue fundada en 1918 y su área de trabajo cubre prácticamente todos los aspectos de la industria de gas natural y GLP.
- IGT (Institute of Gas Technology): Este instituto fue creado en 1941 como un apoyo a la industria del gas en educación e investigación.

3.2.1 Normatividad Internacional

En la década de los cincuentas fueron publicadas las primeras especificaciones para el control de calidad del GLP por las entidades CNGA en su boletín TS441 de 1953 y la NGAA en la norma GPA 2140 de 1957 por exigencias de control de los productos de compañías privadas que operaban en Estados Unidos en ese entonces. Más adelante, en 1961, la ASTM publica la primera norma de calidad del GLP D-1835-97 a partir de estándares internacionales que incluyen la norma ISO 9162:1989, que, hasta este entonces, representa la estructura virtual del comercio mundial del GLP. De lo anterior, la norma D1835-97 presenta las especificaciones de calidad definitivas para el propano y butano comercial, al tiempo que publica los métodos de pruebas en laboratorio para determinar contaminantes y propiedades extensivas e intensivas (ver **Tabla 3-3**) (American Society for Testing Methods. 1997). En el año 1964, la ASTM publica una segunda revisión de la norma ASTM D2154-74, en la cual se especifica un propano de calidad especial (Special Duty propane) muy similar al propano HD-5 que contiene 5% de propenos en volumen con el único objetivo de limitar el número de octanaje mínimo (MON) para motores de vehículos; este tipo de combustible luego sería incorporado en la norma ASTM D1835-97 en el año 1975, agregando a su vez la regulación de mezclas de propano-butano. En este punto la norma ASTM D1835-97 y GPA 2140:1957 se catalogan como métodos técnicos similares para las pruebas de propiedades del GLP. Cinco años más tarde, en España, se aumenta la preocupación de unificar estándares y reformar contratos de importación y exportación de gases naturales y licuados de petróleo con el resto de Europa, buscando evitar la condensación de los fluidos en los gasoductos; informando apropiadamente el punto de rocío del producto y actualizando las normas existentes. Lo anterior, se reflejaba en un gran problema debido a la formación de hidratos, corrosión y pérdidas de flujo en tuberías entre otros problemas, dado a la presencia de fase líquida en el transporte del gas directo desde los pozos donde no existían equipos de separación de fluidos en superficie que garantizaran una fase gaseosa sin presencia de compuestos condensables (Cannon., 1996, Montenegro et al., 1994 & Sutton., 1977).

A partir de las especificaciones de calidad de la norma ASTM D1835-97 y su similar la GPA 2140:1957, se permite la compra y venta de GLP con límites composicionales para la relación de propano/propeno y butano/propano. Estas mezclas pueden ser usadas como combustibles especiales, tales como gas de soldadura (o combustible de alta capacidad calorífica, o como propelentes para aerosoles), y por lo tanto son incluidos como un estándar para las normas ASTM. Sin embargo, estas normas estándar son raramente usadas para contratos comerciales tales como materias primas o similares de uso en equipos de proceso industriales, dado a la necesidad de incluir diferentes composiciones de GLP en cada etapa de proceso. En este punto vale la pena resumir las especificaciones de las normas ASTM D1835-97 y GPA 2140:1957 para uso automotor:

Norma GPA 2140:1957:

Esta norma establece las especificaciones exigidas para los GLPs, por la industria norteamericana. Como puede verse en la **Tabla 3-2**, la norma en mención considera cuatro tipos de GLPs: Propano comercial, Butano comercial, mezclas comerciales Butano-Propano y el denominado propano HD-5 para vehículos.

Norma ASTM D 1835-97:

Esta norma al igual que la GPA contempla cuatro tipos de GLPs. Para la ASTM el producto denominado propano de uso especial es equivalente al HD-5 (considerado por la GPA), el cual es un producto de alta calidad, compuesto principalmente por propano y con aditivos antidetonantes adecuadas para su uso como combustible en automóviles. En la **Tabla 3-3** se presentan dichas especificaciones.

Las normas ASTM D1835-97 y GPA 2140:1957 se basan generalmente para un mercado de compra y venta, que para las normativas actuales no llegan a ser lo suficientemente rigurosas para las regiones de sus países con grandes matices en temperatura y accidentalidad del terreno. Por esto en este punto, se pretende mostrar el estándar europeo, americano y japonés con el propósito de llegar a desarrollar las especificaciones de una norma colombiana.

		Propano comercial	Butano comercial	Mezcla comercial	Propano HD-5	Métodos de prueba (ASTM)
Composición		Predomina el propano y/o propeno	Predomina el butano y/o buteno	Predomina mezclas de butanos y/o butenos con propanos y/o propenos	El porcentaje de propano no es menor de 90% y el propeno es mayor o igual al 5%	D2163-91
Presión de vapor kPa manométricos a 100 °F (37.8 °C)		208 psig 1434 kPa	70 psig 483 kPa	208 psig 1434 kPa	208 psig 1434 kPa	D1267-94 o D2598-91
Residuos volátiles	Temperatura de evaporación, 95% máximo	-37 °F -38.3 °C	36 °F 2.2 °C	36 °F 2.2 °C	-37 °F -38.3 °C	D1837-94
	Volumen de butano y elementos pesados, vol %	2.5	--	--	2.5	D2163-91
	Volumen de pentano y elementos pesados, vol %	--	2.0	2.0	--	D2163-91
Residuo en:						
Evaporación de 100ml Mancha de aceite		0.05 ml Pasa (1)	-- --	-- --	0.05 ml --	D2158-97e1 D2158-97e1
Corrosión a la lámina de cobre		No. 1	No. 1	No. 1	No. 1	D1838-91e2
Concentración de sulfuro total, ppm (masa)		185	140	140	123	D2784-92
Contenido de humedad		Aprobado	--	--	Aprobado	D2713-86
Libre de contenido de agua		--	Ninguna	Ninguna	--	--

(1) El producto se acepta si no persiste un anillo de aceite cuando 0.3 ml del residuo solvente son agregados a un papel de filtro en incrementos de 0.1, examinados a la luz del día, después de 2 minutos.

Tabla 3-2. Especificaciones del GLP. Norma GPA 2140:1997 (Fondonorma., 1998).

convencionales sobre territorio colombiano

		Propano comercial	Butano comercial	Mezcla comercial	Propano especial	Métodos de prueba (ASTM 1835-97)	Métodos de prueba Colombia (NTC 2303-2007)
Presión de vapor kPa manométricos a 100 °F (37.8 °C)		208 psig 1434 kPa	70 psig 483 kPa	^B --	208 psig 1434 kPa	D1267-95 o D2598-96	NTC 2562:1989 o D2598-96
volátiles	Temperatura evaporación, 95% max	-37 °F -38.3 °C	36 °F 2.2 °C	36 °F 2.2 °C	-37 °F -38.3 °C	D1837-02A	NTC 2563:1989
	Volumen de butano y pesados, vol %	2.5	--	--	2.5	D2163-91	NTC 2518:1997
	Volumen de pentano y pesados, vol %	--	2.0	2.0	--	D2163-91	NTC 2518:1997
Contenido propenos, max, vol %		--	--	--	5.0	D2163-91	NTC 2518:1997
comercial materiales	Residuo durante evaporación 100ml, max, ml	0.05	0.05	0.05	0.05	D2158-91	NTC 2517:1986
	Observación mancha de aceite	Aprobado ^D	Aprobado ^D	Aprobado ^D	Aprobado ^D	D2158-91	NTC 2517:1986
Numero de octano, Min		--	--	--	95	D2598-91	NTC2517:1986 o D2598-91
Densidad relativa a 60 °F		^E	^E	^E	--	D1657-94 o D2598-91	NTC2517:1996 o D2598-91
Corrosión a la lámina de cobre		No. 1	No. 1	No. 1	No. 1	D1838-64 ^F	D2515-66 ^F
Concentración de azufre, ppm (masa)		185 ^G	140 ^G	140 ^G	123 ^G	D2784-98	D2784-98
Sulfuro de hidrogeno		Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado	D2420-91	D2420-91
Contenido de humedad		Aprobado	--	--	Aprobado	D2713-86	D2413-98
Libre de contenido de agua		--	Ninguna ^H	Ninguna ^H	--		

A: Equivalente a propano HD-5 del estándar GPA 2140.

B: Presión de vapor del producto permisible como mezcla comercial sin exceder los 208 psig (1430 kPa) y adicionalmente no debe exceder la siguiente relación: Presión de vapor, max= 1167 – 1880 (densidad relativa a 60 °F).

C: En caso de disputas acerca de la presión de vapor del producto, el valor actual determinado por el método de prueba D1267 debería prevalecer sobre el valor hallado del método de prueba D2598.

D: Un producto aceptable no debería mostrar una mancha persistente de aceite cuando una solución de 0.3 ml en un papel filtro con incrementos de 0.1 ml y examinando cada 2 minutos como se describe en el método de prueba D2158.

E: Aunque no es requerimiento específico, la densidad relativa debe ser determinada y reportada. Adicionalmente, la densidad relativa de la mezcla comercial debe encontrarse en un rango permisible de presión de vapor.

F: Este método de prueba no es preciso para determinar presencia de compuestos reactivos (H₂SyS) si el GLP posee agentes inhibidores u otros químicos durante la prueba de la lámina de cobre.

G: El límite total de sulfuros en estas especificaciones debe incluir los compuestos fétidos adicionales según ley.

H: La presencia o ausencia de agua debe ser determinada por inspección visual en las muestras en la cual la densidad relativa es hallada.

Tabla 3-3. Reglamentación del GLP ASTM D 1835-97 (American Society for Testing Methods., 1997 & ICONTEC., 1998).

▪ Estándar Europeo

De acuerdo con las regulaciones internas de la CEN/CENLEC u organizaciones de estándares nacional de países miembros, los países de la unión europea se encuentran ligados a el estándar EN 589 de 1993. Esta normativa es equivalente a las especificaciones de combustibles licuados de petróleos EURO 2, siendo esta una modificación de la norma BS4250 de 1987. Por lo tanto, la norma europea para GLP vehicular se basa en no incluir un requerimiento composicional, no obstante, la mezcla de propano y butano debe cumplir con un número mínimo de octanaje de 89 – 90 para ser usada en los vehículos. Como punto de comparación de la norma ASTM D1835-97, también fueron eliminadas las especificaciones de niveles de mercaptanos de sulfuros, etilenos y componentes pesados como el C5. Sin embargo, la presión de vapor mínima del GLP vehicular fue establecida como base en las temporadas de invierno de cada uno de los países del territorio europeo. Un resumen de las especificaciones de la norma EN 589 se presenta en la Tabla 3-4 (NEN., 2000). Además, la ALPGA., (1998) presenta dos tipos de combustibles referencias según la temporada del año en la Tabla 3-6.

Propiedad	Limites	Método de prueba
Mínimo número de octanaje (MON)	89	*
Contenido de dienos (como % molar de 1,3 butadieno)	0.5	ISO 7941:1988
Contenido de H_2S	Aprobado	ISO 8819:1995
Contenido total de sulfuros mg/kg	200	EN 24260:2000
Corrosión a la lámina de cobre (1h at 40°C)	Clase 1	ISO 6251:1998
Evaporación de residuos (mg/kg)	100	NF M 41-015
Presión de vapor, (absoluta a 40°C) kPa	1550	ISO 4256:1998
Temperatura mínima, para Presión de vapor absoluta de 250 kPa (°C)	-10 - +10	ISO 4256:1998

Tabla 3-4. Reglamentación europea EN 589:2000 para el GLP vehicular (NEN., 2000).

*. El cálculo parcial del MOM en la mezcla del GLP sigue la siguiente correlación:

$$MON = M * C$$

Donde, M es el factor del número de octanaje específico para cada componente en la Tabla 3-5 y C es la fracción molar de la mezcla del componente.

Componentes	Factor MOM
Propano (+ C2)	95.4
Propeno	83.9
Butano (+ C5)	89.0
Iso-butano	97.2
Butenos	75.8

Tabla 3-5. Factores de octanaje específico para calculo MOM de la norma EN 589:2000 (NEN., 2000).

Composición	Combustible A (verano)	Combustible B (invierno)
C3, % molar	30 ± 2	85 ± 2
C4, % molar	Balanceado con el superior	Balanceado con el superior
<C3, >C4, % molar	Máximo 2	Máximo 2

Tabla 3-6. GLP referencia en Europa (ALPGA., 1998).

- Estándar Americano

En la actualidad, no existen requerimientos federales estándares para el GLP de uso vehicular en los estados unidos. Sin embargo, una aproximación a una normativa muy válida del GLP en este país, es la norma ASTM D1835-97 previamente comentada en la **Tabla 3-3**, en lo que se denominaría un propano especial que se compone en su mayoría de este componente y 5% en volumen de propenos como máximo en la mezcla. En la cual, la EPA., (1994), garantiza una presión de vapor en los contenedores muy cercana a los 232-800 kPa en invierno y 800-1437 kPa en verano; valores lo suficientemente altos para que exista un continuo suministro de combustible durante las operaciones en equipos a partir de los contenedores en cualquier época del año.

En 1992, el CARB (Californian Air Resource Board) estableció la norma “*motor vehicle fuel specs for liquefied petroleum gas*” en el titulo 13, sección 2292.6. En donde, el estado de california definió las especificaciones del GLP para su uso vehicular, para proveer a los desarrolladores de vehículos los detalles de la calidad del combustible en los motores, buscando la reducción de problemas ocasionados por emisiones y rendimiento del motor. En esta normativa se incluye un máximo límite de propenos de 10% en volumen, establece un nuevo límite de 2% en volumen de butenos, 0.5% en volumen máximo de pentanos y componentes pesados, 5.0 % en volumen de butano y reduce el máximo contenido de sulfuros de 120 a 80 ppmw (Brasil., 1998). La normativa se muestra en la **Tabla 3-7**.

		Propano especial	Métodos de prueba
Volumen de propano, vol % (min)		85.0	ASTM D2163-91
Presión de vapor kPa manométricos a 100 °F (37.8 °C)		208 psig (1434 kPa)	ASTMD1267 D2598 ^a
Residuos volátiles	Temperatura de evaporación, 95% máximo	-37 °F (-38.3 °C)	ASTM D1837-02A
	Volumen de butano, vol % (max)	5.0	ASTM D2163-91
	Volumen de pentano y elementos pesados, vol % (max)	0.5	ASTM D2163-91
	Volumen de butenos, vol % (max)	2.0	ASTM D2163-91
	Volumen de propenos, vol % (max)	10.0	ASTM D2163-91
Residuos materiales	Residuo durante evaporación 100ml, max, ml	0.05	ASTM D2158-91
	Observación mancha de aceite	Aprobado ^b	ASTM D2158-91
Numero de octano, Min		95	ASTM D2598-91
Corrosión a la lámina de cobre		No. 1	ASTM D1838-64
Concentración de azufre, ppm (masa)		80 ^d	ASTM D2784-98
Contenido de humedad		Aprobado	ASTM D2713-86
Odorante		c	--

a: En caso de disputa por la presión de vapor del producto, el valor actual determinado por el método de prueba ASTM D1267-89 debe prevalecer por encima del valor calculador por la practica ASTM D2598-88.

b: Un producto aceptable no debería mostrar una mancha persistente de aceite cuando una solución de 0.3 ml en un papel filtro con incrementos de 0.1 ml y examinando cada 2 minutos como se describe en el método de prueba D2158.

c: La vaporización a condiciones ambientales del GLP debe tener una potencia lo suficientemente potente para detectarse a concentraciones en el aire no superior a 1/5 de distancia del producto de su límite de inflamabilidad baja

d: El límite total de sulfuros en estas especificaciones debe incluir los compuestos fétidos adicionales según ley.

Tabla 3-7. Reglamentación de la CARB del GLP vehicular (Brasil., 1998).

- Estándar Japonés

La composición y relación de contenido de sulfuros provistos en el GLP dentro del país japonés, se adhiere al criterio especificado en la JIS y a la “ley concerniente a la seguridad y optimización de transacciones de gases licuados de petróleo”. Además, la Japan LP Gas Association. (1969) posee su propio criterio de estándares para la garantía de la preservación razonable de la calidad del GLP, como por ejemplo en la adición de metil-alcohol durante invierno para prevenir la congelación del combustible en tuberías y equipos, así como también el control del contenido de 1-3-butadieno (menos de 0.1 p/p%) y mercurio (propano: 0.009 mg/Nm³ o menos, butano: 0.080 mg/Nm³). La normativa completa del GLP para Japón se muestra en la **Tabla 3-8**. Para el uso vehicular del GLP se mezclan el propano y el butano de acuerdo a la temperatura de las

convencionales sobre territorio colombiano

áreas en Japón, por ejemplo, en el área norte de la isla en enero, junio y octubre se tiene una proporción de propano de 70, 20 y 30% respectivamente, y en el área central de la isla 20, 10 y 10% respectivamente en los mismos meses.

		Propano comercial	Butano comercial	Métodos de prueba
Densidad (15°C, g/cm³)		0.500-0.620	0.500-0.620	JIS K 2240:2000
Presión de vapor kPa manométricos a 40 °C, Kg/cm²		Menos de 15.5	Menos de 5.3	JIS K 2240:2000
Composición (mol%)	Etano y etileno	Menos de 5.0	Reportar	JIS K 2240:2000
	Propano y propileno	Por encima de 92.0	Reportar	JIS K 2240:2000
	Butano	Reportar	Por encima de 95.0	JIS K 2240:2000
	Butileno	Reportar	Menos de 2.0	JIS K 2240:2000
	Butadieno	Menos de 0.5	Menos de 0.5	JIS K 2240:2000
	Pentano	Reportar	Menos de 2.0	JIS K 2240:2000
Residuos materiales	40 °C, ppm	Menos de 60	Menos de 60	JLPGA 5-05T
	105 °C, ppm	Menos de 10	Menos de 10	JLPGA 5-05T
Corrosión a la lámina de cobre		Menos de 1	Menos de 1	JIS K 2240:2000
Concentración de azufre, ppm (masa)		Menos de 50	Menos de 50	JLPGA 2240
Contenido de humedad		Aprobado	Aprobado	JLPGA S-03
Contenido de agua libre		Nulo	Nulo	ISO DIS

Tabla 3-8. Reglamentación Japonesa del GLP (Japan LP Gas Association. (1969).

3.2.2 Normatividad Nacional

En Colombia, los primeros pasos para el control de calidad del gas licuado del petróleo aparecen con el decreto 499 de 1948 y la resolución 580 de 1960 (Acogas., 1994). Es destacable que solo hasta el año 1994 se establece como parcialmente obligatoria la norma NTC 2303-2007, en las cuales se instaura el cumplimiento en todo el territorio nacional y ensayos de laboratorio a los cuales se deben someter los gases licuados de petróleo destinados como combustible, al uso doméstico, comercial, industrial y automotor (ver **Tabla 3-3**) (ICONTEC., 1998). Cabe notar que esta normativa colombiana extrae en gran mayoría su esencia en la norma ASTM D1835-97.

Además de la norma NTC 2303-2007, Colombia en la actualidad, posee un estándar de especificaciones técnicas de equipos, accesorios, manejo y transporte definidos para el

GLP mediante la norma técnica colombiana 3853 del 21 de febrero de 1996 (Icontec., 1996), además de unas especificaciones de calidad, de la cual no se han desarrollado mayores cambios a lo largo de la última década (ver **Tabla 3-9**). Sin embargo, en la actualidad no se han definido límites y restricciones para la composición, presión de vapor e índices de octanaje para un GLP que sea útil para la implementación como combustible automotor. La composición del combustible de las normas NTC 2303-2007 y NTC 3853-1996 están dadas para aplicaciones industriales o residenciales principalmente por una mezcla de propano y butano, limitados en la mezcla de pentanos, de la cual, no hay una especificación directa en relación con los límites de octanaje del GLP, por lo tanto, se puede inferir valores muy bajos sin tener en cuenta el rendimiento óptimo en los motores de combustión interna. En comparación a los estándares japonés e inglés se encuentra que la normatividad nacional tiene límites más estrictos en el contenido permisible de propilenos y en la presión de vapor máxima permisible, además controla directamente la composición de butano e hidrocarburos mayores. En la **Tabla 3-10** se muestra la comparación completa entre los valores de las propiedades y componentes en la normatividad nacional e internacional.

		Propano Comercial	Butano comercial
Presión de vapor manométricos (kPa)	20°C	895	103
	40°C	1482	285
	45°C	1672	345
	55°C	1980	462
Gravedad específica de líquido a 15,56 °C (Agua = 1)		0.504	0.582
Punto de ebullición a presión atmosférica, °C		-42	-9
Peso por metro cúbico de líquido a 15,56 °C, kg		504	582
Calor específico del líquido, kilojoule por kilogramo a 15,56 °C		1464	1276
Metro cúbico de vapor por litro de líquido a 15,56 °C		0.271	0.235
Metro cúbico de vapor por kilogramo de líquido a 15,56 °C		0.539	0.410
Gravedad específica de vapor a 15,56 °C (Aire = 1)		1.50	2.01
Temperatura de ignición en el aire, °C		493 – 549	482 - 538
Temperatura máxima de llama en el aire, °C		1980	2008
Límite de inflamabilidad (% mezcla Aire-Gas)	Inferior	2.15	1.55
	Superior	9.60	8.60
Calor latente de vaporización en el punto de ebullición	Kilojoule por kilogramo	428	388
	Kilojoule por litro	216	226
Valor de calentamiento total después de la vaporización	Kilojoule por metro cúbico	92430	121280
	Kilojoule por kilogramo	49920	49140
	Kilojoule por litro	25140	28100

Tabla 3-9. Especificaciones de calidad del GLP según normas Icontec., (1996).

convencionales sobre territorio colombiano

Propiedad o compuesto	Unidades	NTC 2303-2007 – ASTM D1835-97 propano para aplicaciones especiales	BS EN 589	JIS K2240-1
Numero de octano		-	>89	-
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	% molar	-	< 0.5	-
Contenido de propileno	% en vol	< 5	-	-
Contenido de H2S		Libre	Libre	-
Contenido de azufre total	mg/kg	< 123	< 100	< 200
Corrosión de lámina de cobre		Clase 1	Clase	< 1 @ 40°C y 1h
Residuo de evaporación	Mg/kg	0.005ml/100ml	< 100	-
Presión de vapor @ 40°C	kPa	< 1430	< 1550	< 1550
Presión de 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	-
Solución odorante		-	notorio al 20% del límite de inflamabilidad inferior	-
Densidad @ 15.6 °C	g/cm3	-	-	0.5 a 0.62

Tabla 3-10. Comparación entre normativa nacional e internacional sobre composición del GLP vehicular.

3.3 Reglamentación de equipos y accesorios con GLP en vehículos automotores

De acuerdo con la descripción general del sistema de GLP en los vehículos automotores del tópico 2 de este trabajo, en este nuevo capítulo se hará una revisión comparativa de la normatividad existente, tanto a nivel nacional como internacional, para los equipos y accesorios del GLP en los vehículos. Dado a lo extenso de las normas, se resaltarán los aspectos importantes de cada una de las normas de manera breve y se deja su revisión completa a los lectores.

3.3.1 Normatividad de vehículos con GLP internacional

- Norma NFPA 58:1998

Tanque de almacenamiento

Esta norma de origen americano, estandariza el diseño de los contenedores y pruebas a las que deben ser sometidos los tanques de combustible vehicular mediante las regulaciones del departamento de transporte estadounidenses (DOT), o “las reglas de construcción de contenedores a prueba de fuego” de la sección VIII, División I, del código de contenedores a presión y calderas de la ASME. Como tal, el código menciona, que los cilindros de uso vehicular deben ser diseñados y contruidos para soportar presiones de al menos 240 psi (1.6 MPa). No obstante, si el tanque de almacenamiento se encuentra confinado en un espacio cerrado del vehículo como en camionetas, buses y vehículos de múltiples propósitos, estos deben ser diseñados para soportar al menos 312.5 psi (2.1 MPa). El código, como tal, también exige que los cilindros de los vehículos deben contener toda la información específica del proveedor, capacidad total de almacenaje con agua, presión de diseño en Psi y etiquetas de advertencia que mencionen los límites de operación, entre otros (National Fire Protection Association., 1998).

Accesorios del sistema de suministro de GLP

Los accesorios del cilindro de almacenamiento deben funcionar a presiones de 125 psi (0.9 MPa), contar con la certificación de los estándares de seguridad de alivio de presión UL 132, especificando las tasas de despresurización en pies cúbicos por minuto de aire a 60 °C y medidores de presión (opcional) en zonas estratégicas del equipo. Aunque es indispensable que estos accesorios puedan soportar presiones de operación de al menos 250 psi (1.7 MPa). Los accesorios son (NFPA., 1998):

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

Vaporizadores-reguladores

Estos equipos deben cumplir con las mismas especificaciones de operación que el tanque de almacenamiento del GLP y accesorios. No obstante, mencionan que los vaporizadores deben ser fabricados para resistir cualquier efecto oxidativo del GLP, deben contener una válvula de drenaje de agua en la parte inferior del equipo, poseer un equipo de transferencia de calor que facilite la vaporización del combustible y una válvula de corte de combustible (NFPA., 1998).

Tubería y uniones

Las tuberías y uniones del sistema de suministro e inyección del GLP deben ser fabricados de hierro, acero o cobre, y como tal deben cumplir con las especificaciones de calidad ASME B36.10M (tubería de hierro), ASTM A53-A106 (tubería de acero) y ASTM B42 (tubería de cobre). Además, deben cumplir con las especificaciones de resistencia eléctrica ASTM A539, oxidación por agua ASTM B280 (tubería de cobre) y presiones de operación de al menos 250 psi (NFPA., 1998).

En relación a la instalación de componentes en el vehículo, en la norma NFPA 58 se presentan recomendaciones para la instalación de tanques de almacenamiento internos o externos (junto a los accesorios mencionados anteriormente), guiados hacia la protección contra daños y confiabilidad en el sistema de alimentación de GLP (NFPA., 1998).

▪ Norma UN/ECE R67-01

La norma UN/ECE R67-01 comparte las mismas especificaciones de diseño y operación del equipo de almacenaje del GLP y accesorios que la norma NFPA 58. No obstante, recomienda que todas las válvulas del depósito de almacenamiento y equipos de vaporización e inyección se encuentren 80% abiertas y el depósito de almacenamiento debe contener un máximo de 80% de su capacidad con GLP líquido. A continuación, se especifican los componentes adicionales que se deben tener en cuenta con respecto a la norma NFPA 58 (United Nations. 2014):

- Dispositivos de inyección de gas
- Válvulas anti-retorno
- Bomba de combustible.
- Unidad de control electrónico
- Riel de inyección
- Sensores de presión o temperatura
- Indicador de nivel para verificar el nivel de gas licuado en el depósito.
- Dispositivo de alivio de presión para evitar que el depósito estalle en caso de incendio del vehículo. Tapón fusible o válvula de alivio de presión.

Antes de su aprobación por estas normas, será preciso someter el depósito a las pruebas siguientes (United Nations. 2014):

- Pruebas de tracción y flexión del material de la carrocería.
 - Pruebas hidráulicas y de reventón.
 - Pruebas ciclo de presión ambiental y a alta temperatura en diversos medios.
 - Prueba de permeabilidad para detectar fugas lentas de gas.
 - Examen radiográfico de soldaduras.
 - Examen macroscópico de la superficie completa.
 - Prueba Bonfire.
 - Prueba de impacto (contra una cuña maciza) y prueba de caída (contra elemento / suelo de hormigón).
 - Prueba de torsión del depósito.
 - Pruebas de exposición a ambiente ácido y radiación ultravioleta.
- Norma EN 12806:2002 y EN 12979:2003

En las normas de origen europeo EN 12806 y EN 12979, se establecen los requerimientos de diseño, ubicación y ensayos de prueba, y la instalación de cada uno

de los dispositivos del GLP vehicular, incluyendo conexiones eléctricas, selectores de tipo de combustible, dispositivos de alivio de presión, válvulas, tanques, sensores, inyectores y unidad de control electrónico respectivamente, para los siguientes componentes (British Standards Institution. 2002 & British Standards Institution. 2003):

- Bomba de combustible
- Válvula anti-retorno
- 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

Adicionalmente, la norma EN 12979:2002, presenta los requerimientos mínimos para el diseño de manuales a los proveedores de kits de conversión, especificando los siguientes tópicos (BSI., 2002):

- 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

En la **Tabla 3-11** se presenta el listado de las normativas resumidas, que aplica a las tecnologías del GLP en el sector vehicular a nivel internacional.

Código	Documento	Aplicación	Comentarios
NFPA 58:1998	Código del gas licuado de petróleo	GLP vehicular, residencial y 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.
UN/ECE R67-01	Regulaciones de los componentes del GLP vehicular	GLP vehicular	Posee recomendaciones y especificaciones de dispositivos de inyección de gas, válvulas anti-retorno, bomba de combustible, unidad de control electrónico, riel de inyección y sensores de presión o temperatura
BS EN 12806:2003	Componentes de sistemas de gas licuado de petróleo vehicular – diferentes contenedores	GLP	Muestra regulación sobre componentes a partir de parámetros de diseño y requerimientos a partir de ensayos.
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.

Tabla 3-11. Normatividad internacional aplicable a tecnología vehicular del GLP (UNAL., 2014).

3.3.2 Normatividad nacional de vehículos con GLP

El GLP para su uso vehicular en Colombia está restringido por la Ley 142 de 1994 y en su modificación, por la ley 689 de 2001 (UNAL., 2014).

Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

Ley 689 de 2001: Enunciando la prohibición del uso del 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”.

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. Incluso, existe la normatividad sobre estaciones de suministro, sistemas bicomcombustible GLP-gasolina o dedicado GLP, aunque solo para vehículos con sistema de inyección carburado. Como tal, las normativas técnicas se basan en lo 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 (UNAL., 2014). Las normas técnicas colombianas relacionadas se enuncian a continuación:

NTC 3768-1:1996: *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.*

En esta norma existe un error conceptual dado a que los vehículos de gasolina pueden convertirse a dedicado GLP o a bicomcombustible GLP/gasolina (la primera es de fábrica, mientras la segunda es realizada post-compra del vehículo). Como punto positivo, se presentan los requisitos de infraestructura que deben tener los talleres de conversión de vehículos a GLP. No obstante, al comparar esta norma con la normatividad internacional EN 12979 se puede apreciar la ausencia de la instalación de sistemas de inyección de GLP y otros componentes. Por lo tanto, se recomienda involucrar a los fabricantes de sistemas de conversión, así como se presenta en la norma internacional (UNAL., 2014).

NTC 3770-1:2003: *Sistemas bicomcombustible GLP/gasolina o dedicados a GLP.*

En esta norma se estandariza los kits de conversión para vehículos con carburador, posee parámetros de funcionamiento del tanque de almacenamiento, válvulas, tuberías, mangueras, mezclador, sistema eléctrico y de control de la admisión. Por otro lado, no incluye componentes específicos en 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). Para la mejora de la normativa, se debe incluir información sobre los componentes de sistemas de GLP que se encuentran en la norma EN 12806:2003, donde se contempla requisitos para cada componente de los sistemas de carburación e inyección, además de pruebas de control sobre cada uno de ellos y requisitos sobre componentes asociados al control de la mezcla como sensores y controladores (UNAL., 2014).

NTC 3771-1:2003: *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.*

En esta norma se encuentra la normalización correspondiente a la ubicación de los accesorios del kit de conversión, adicionalmente da un paso a paso del procedimiento de conversión. La norma NFPA 58 muestra información similar disponible (UNAL., 2014).

En las **Tabla 3-12** y **Tabla 3-13** se presentan la comparación de las normativas de componentes y requerimientos de instalación para sistemas de GLP y regulados según la normatividad técnica colombiana en comparación a la normatividad técnica internacional respectivamente. En donde, las “equis” representan la presencia de regulación sobre el componente y los “guiones” representan la ausencia regulatoria en la normatividad:

Componente	NFPA 58:1998	UN/ECE R67-01	EN 12806:2003	NTC3770-1:2003 – NTC 5281-1:2004
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	X
Riel de inyección	-	X	X	-
Válvula anti-retorno	-	X	X	-
Tanque de almacenamiento	X	X	X	X

Tabla 3-12. Comparación normativa de exigencias en componentes de sistemas de GLP (UNAL., 2014).

Componente	NFPA 58:1998	BS EN 12806:2003	NTC3771-1:2003
Revisión general del vehículo	-	-	X
Recipiente de almacenamiento	X	X	X
Accesorios asociados al recipiente	X	X	X
Válvula 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	-

Tabla 3-13. Comparación normativa sobre requerimientos de instalación para sistemas de GLP (UNAL., 2014).

4. Esquema y normativa de estaciones de servicio de GLP

De acuerdo con Gasolineras la Gaviota. 2011 & EMSD. (2007), las estaciones de servicio de GLP presentan un esquema muy similar al de una estación convencional de servicio de gasolina y por lo tanto, comparten varias de sus normativas estándares. Estas poseen una zona de almacenaje y otra de suministro (ver **Figura 4-1**):

- **Zona de almacenamiento:** Los depósitos de GLP pueden disponerse tanto de manera subterránea como en la superficie. Según, Gasolineras la Gaviota. 2011, lo normal en países como España, es que se estén instalando los contenedores en superficie, ya que la implementación del combustible se realiza en estaciones de servicio existentes y resulta ser una solución menos costosa. Por lo tanto, estos depósitos se encuentran delimitados en recintos cerrados de seguridad especiales.
- **Zona de suministro:** Dado a que el suministro de GLP a los vehículos se realiza en estado líquido, los dispensadores actuales de la estación de servicio pueden ser usados sin ningún inconveniente con este propósito. Sin embargo, es necesario realizar algunas modificaciones en el sistema, tales como la adición de

accesorios con soporte a altas presiones y emplear un boquerel (boca de suministro) normalizado que sea compatible con la boca de carga del vehículo del cliente.

Para un completo entendimiento del esquema y diseño de las estaciones de servicio de suministro de GLP, es necesario enunciar algunas normativas internacionales con el propósito de conocer los códigos de prácticas y estándares internacionales que ayudaron la implementación del GLP en sus respectivos territorios.

4.1 Normativa internacional de estaciones de servicios de GLP para uso automotor

Este tópico se basa en realizar una revisión de los estándares mínimos que se deben seguir para el diseño, construcción, pruebas, operación y mantenimiento de estaciones de servicio de GLP en diversos países del mundo. He incluso tiene en cuenta los factores de salud y seguridad del trabajador en conjunto de las conductas a que se deben atener los mismos, para el manejo correcto de los equipos de la estación de servicio. En la actualidad, en estados unidos y algunos países europeos existen códigos de prácticas y diversas normas estandarizadas que en su conjunto proporcionan todos los requisitos que se deben tener en cuenta para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las estaciones de servicio de GLP, a excepción de algunos países asiáticos que poseen una reglamentación estandarizada para este propósito. Dada a la extensión de la información que puedan proporcionar estas normativas y estándares internacionales, se deja a juicio del lector su búsqueda e interpretación de las mismas, mientras que en este trabajo se decidió enunciarlos de manera apropiada y resumida (EMSD., 2007).

En estados unidos y Canadá, existen entre 2500 a 5000 estaciones de servicio de GLP que obedecen a regulaciones y leyes federales, que generalmente se aplican con propósitos comerciales y son similares en cuanto a restricciones con la comercialización del Diésel o la gasolina. Estas incluyen una adecuada delimitación del espacio para permitir el libre paso de los vehículos en las instalaciones de la estación de servicio, hasta llegar a delimitar cada uno de los aspectos técnicos de los equipos, tuberías y marcaciones de seguridad. Por consiguiente, varias ciudades en norte américa tienden a tener una legislación más estricta concerniente a la calidad del combustible, al uso y mantenimiento de los contenedores y equipamientos de GLP para permitir su uso, tanto en los vehículos como en las estaciones de servicio. Siendo las normas estandarizadas y métodos de prueba ANSI, ASME, ASTM, CGA, NFPA, API y otros, las más utilizadas con propósitos de garantizar la actividad de comercio según los estándares de calidad, seguridad, salud ocupacional. Las normas técnicas como tal, son las siguientes (EMSD., 2007 & Myers., 2009):

ASTM – American Society for Testing & Materials

- ASTM A53-07: especificaciones de tubería y recubrimientos en acero, acero al carbón y Zinc. Información sobre soldadura y detección de fisuras.
- ASTM D2784-06: Método de prueba estandarizada para la detección de sulfuro en GLP.
- ASTM D6849-02: Estándar práctico de almacenaje y método de pruebas de GLP en un recipiente cilíndrico.
- ASTM D6897-09: Método de prueba estandarizada para la medición de la presión de vapor del GLP en instrumentos de dispensación automática.

ANSI/ASME – American National Standards Institute

- Código de calderas y recipientes presurizados sección VIII de la ASME – Recipientes presurizados
- ASME B1.5 ACME: Roscas de tornillos
- ANSI B16.5-2002: Tubería y uniones tipo flange de aleación de acero-níquel y otros tipos.
- ANSI B16.9-2002: Productos manufacturados de accesorios soldados de acero forjado.

API – American Petroleum Institute

- API 607: prueba de fuego para válvulas levemente abiertas

NFPA – National Fire Protection Association

- NFPA 30A-98: Código de dispensación de combustible y reparación de vehículos automotores.
- NFPA 58-2004: Usos y almacenamiento de GLP.

CGA – Canadian Gas Association

- CAN/CGA B149.2-05: Código de instalación de propano
- OCC-1: Prácticas recomendadas de control de corrosión externa bajo tierra o de redes de tuberías metálicas.

OTROS

- Estándar Ontario-propane Branch No 9-2001 (Canadá-TSSA): Requerimientos de ubicación de estaciones de servicio de GLP, centros de almacenaje y conversión de vehículos en áreas altamente pobladas.

Además de las normas técnicas y de calidad, el gobierno estadounidense y canadiense ofrecen ciertos incentivos como es la reducción de \$0.50 US/galón si el vehículo es propulsado por una mezcla híbrida con GLP-gasolina (ley publica 114-113, 2015) y así mismo otorga un crédito de hasta \$30000 US para la conversión de los vehículos convencionales a GLP (ley publica 114-113 o código U.S 30C al 38). Además, también incentivan una exención de impuestos si los vehículos se utilizan con propósitos de fomentar la agricultura, transporte escolar u oficial federal (U.S Department of energy. 2016).

En Europa e Inglaterra, existen más de 30000 estaciones de servicio de GLP que son reguladas estrictamente bajo las normas estandarizadas y métodos de prueba BS, IP, LPGA y otros, compartiendo varias normativas de otros combustibles para uso automotor; a su vez se complementan con el establecimiento de programas detallados en estaciones de servicios, mantenimiento de equipos, capacitación de personal y registro del vehículo previamente para realizar el servicio de llenado. Las normas técnicas como tal, son las siguientes (AEGPL EUROPE., (2013), Commission, E. 1992 & EMSD., 2007):

BSI – British Standards Institution

- BS 470-1:1995: Especificaciones para inspección y acceso a recipientes presurizados.
- BS 1387:1985 (Norma equivalente a la EN 10255:2005): Especificaciones de tuberías de acero atornillado y tipo flange para redes de tubería metálicas.
- BS 1560-3:1989: Tubería circular, válvulas y uniones tipo flange.
- BS 1600:1991: Especificaciones de dimensionales para una tubería de acero de industria petrolera.
- BS 4250:2014: Especificaciones de butano y propano comercial para estaciones de servicio.
- BS 4882:1990: Especificaciones de atornillado y pega de recipientes tipo flange presurizados.
- BS 5423:1987: Especificaciones de extintores de fuego portátiles.

- PD 5500:2012: Especificaciones de recipientes de almacenaje presurizados a prueba de fuego.
- BS 6755:1987: Prueba de válvulas.
- BS 7361-1:1991: Protección catódica. Código de prácticas para aplicaciones en tierra y en mar.
- BS EN 12820:2002: Inspección y recalificación de tanques de almacenaje de GLP bajo tierra con volúmenes superiores a los 13 m3.

EN – Norme Europee

- EN 14427:2013: Diseño y construcción de tanques de almacenamiento para GLP – Transportable y estático.
- EN ISO 14245:2013: Especificaciones para tanques de almacenamiento de GLP y pruebas de válvulas – Cierre automático.
- EN ISO 15995:2013: Especificaciones para tanques de almacenamiento de GLP y pruebas de válvulas – Cierre manual.

IP – Institute of Petroleum

- Code of practice Part 1, Electrical:2010: Selección, instalación, inspección y mantenimiento dispositivos eléctricos y no eléctricos en áreas de riesgo.

LPGA – Liquefied Petroleum Gas Association

- Code of practice No.1 Part 1:2012: Diseño, instalación y mantenimiento de recipientes de almacenamiento de GLP en instalaciones fijas.
- Code of practice No.7:2012: Especificaciones de cilindros de GLP llenos y vacíos, incluyendo cartuchos de almacenaje.
- Code of practice No.14:2012: Especificaciones, instalación, inspección, pruebas y mantenimiento de mangueras de transporte de GLP.
- Code of practice No.15:2012: Especificaciones de válvulas y uniones de dispensadores de GLP.
- Code of practice No.17:2012: Especificaciones de sistemas y recipientes de purga de GLP.

- Code of practice No.19:2012: Especificaciones de sistemas de medición de volumen de GLP.
- Code of practice No.20:2012: Especificaciones de estaciones de servicio para vehículos propulsados con GLP.
- Code of practice No.22:2012: Especificaciones de diseño e instalación del sistema de tuberías para estaciones de servicio de GLP.

OTROS

- Regulaciones de estaciones de servicio de GLP y camiones cisternas (1987), Holanda.

El gobierno inglés y varios países europeos, poseen sistemas de incentivos generales para los vehículos propulsados con combustibles alternativos. Tales incentivos van desde un bajo precio del combustible subsidiado por el estado, disminución de la tasa de impuesto anual y otros reconocimientos que van a depender de la labor que cumpla el vehículo. No obstante, todos estos incentivos son regulados y vigilados por cada país, he incluso ciudades holandesas tienen ciertas regulaciones especiales (United Nations., 2011).

En Hong Kong, China, existen 67 estaciones de servicio de GLP que son reguladas bajos códigos de practica diseñadas por la HKSAR, a partir de algunas normativas estandarizadas nacionales e internacionales. Las normas técnicas como tal, son las siguientes (EMSD., 2007):

HKSAR – Hong Kong Special Administrative Region Passport

- Code of practice for Hong Kong LPG industry, Module 1 (1999): Especificaciones en la composición del GLP y cilindros de almacenaje.
- Code of practice for Hong Kong LPG industry, Module 2 (1999): Especificaciones en las tuberías de GLP bajo tierra.
- Code of practice for Hong Kong LPG industry, Module 7 (1999): Procedimientos de operación para emergencias relacionadas con el GLP y cilindros de almacenaje.
- Code of practice for the electricity (1999): Regulaciones del cableado eléctrico.
- Code of practice for fire resisting construction, minimum fire service installations and equipment (1999): Regulaciones para la construcción de edificios resistentes

al fuego y equipamiento mínimo de servicios y equipamientos para apagar incendios.

- Code of practice for inspection, Testing and Maintenance of installations and equipment (1999): Especificaciones de inspección, pruebas y mantenimiento de instalaciones y equipamientos.

Actualmente, en Hong Kong se promueve un programa de incentivo gubernamental que ofrece el cambio o conversión de vehículos de transporte liviano para el uso del GLP, Hasta la fecha, lleva más de 3100 buses pequeños convertidos y todos los taxis del área metropolitana. No obstante, el combustible no es subsidiado por el gobierno, pero su valor comercial es competitivo con combustibles convencionales (EMSD., 2016).

En Australia y Nueva Zelanda, las estaciones de servicio de GLP son reguladas bajo las normas estandarizadas AS, estas comparten varios lineamientos nacionales e internacionales. Las normas técnicas como tal, son las siguientes (EMSD., 2007):

AS – Australia Standard

- AS 1210-2010: Código de recipiente presurizado.
- AS 1596-2014: Especificaciones de almacenaje y manejo del GLP.
- AS 1596 Supplement 1-1997: Especificaciones de almacenaje y manejo del GLP en vehículos automotores.

Australia y nueva Zelanda ofrecen un programa de incentivo gubernamental de \$2000 dólares para la conversión de un vehículo convencional a GLP, incluso el combustible es subsidiado teniendo un precio aproximado de \$0.59 – 0.75 dólares/litro (Liu et al., 1997).

Al realizar comparaciones entre las distintas normativas internacionales enunciadas previamente para los distintos países que han impulsado el GLP como combustible automotor, es posible notar varios aspectos en común, estos son (Liu et al., 1997):

- Coexistencia de dispensores de GLP con dispensores de combustibles convencionales.

En todas las normativas de países y ciudades estudiadas en este trabajo se permite la coexistencia de dispensores de GLP en conjunto con los de gasolina, diésel y otros combustibles (Liu et al., 1997).

- Ubicación de tanques de almacenamiento de GLP en estaciones.

Los tanques de almacenamiento de GLP en estaciones de servicio en estados unidos, Australia y Canada deben ser ubicados en la superficie, dado a la necesidad de permitir un espacio apropiado, mantenimiento y reducción de costos de excavación y cementación. Por otro lado, Holanda no permite que los tanques de almacenamiento excedan los 80 m³ de volumen y así mismo se deben instalar bajo tierra, con el propósito de prevenir riesgos de incendio (Liu et al., 1997).

- Distancia

La mayoría de países y ciudades requieren que las estaciones de servicio de GLP sean ubicadas a las afueras de áreas pobladas. Como tal, la distancia mínima va regulada con respecto a las normativas de cada territorio y de acuerdo al tamaño y diseño del tanque de almacenamiento de GLP. Por otro lado, en países como Holanda la distancia entre áreas pobladas y las estaciones de servicios son menores ya que la reglamentación obliga a ubicar los tanques de almacenamiento bajo tierra (Liu et al., 1997).

Cabe destacar, que la distancia que debe tener la estación de servicio puede ser reducida drásticamente, siempre que se dispongan de sistemas de seguridad como aspersores de agua, equipos contraincendios y muros de fuego. Como, por ejemplo, en estados unidos las estaciones deben ser ubicadas a una distancia mínima 7.6m de cualquier edificio, y si esta posee un muro de fuego puede reducirse a 3m. En Holanda, las estaciones deben ser ubicadas a 80 m de la zona poblada (para tanques que excedan los 20 m³ de volumen), he incluso se enuncia una distancia mínima de 20 m en caso de no disponer de espacio suficiente, para la construcción de la misma. En Australia, la distancia mínima para construir una estación de servicios es acordada en 15 m de distancia con respecto a edificios públicos, hospitales, escuelas y viviendas (Liu et al., 1997).

- Mediciones y seguridad en estaciones de servicios de GLP

En todos los países y ciudades estudiadas es obligatorio el uso de medidores de presión con mecanismos de regulación en caso de emergencia, mantener etiquetado todo el equipamiento, tales como válvulas, tuberías y dispensores, por último, poseer equipos de suministro de energía auxiliar para mantener los controles automáticos de los equipos, sistemas de detección de gases, sistemas de refrigeración, sistemas de prevención de incendios y comunicaciones funcionando correctamente (Liu et al., 1997).

- Entrenamiento del personal para el manejo de equipos de GLP

La normativa general de los países enuncia que todo el personal debe estar capacitado en el uso de los equipos de trabajo y de emergencia para asegurar la seguridad de la estación de servicio y del cliente. No obstante, recalcan de manera importante la necesidad de los trabajadores de supervisar el trabajo de sus compañeros en todo momento, en especial, cuando se esté abasteciendo o descargando combustible en la estación de servicios (Liu et al., 1997).

4.2 Normativa nacional de estaciones de servicios de GLP para uso automotor

En la actualidad, Colombia cuenta con dos normativas técnicas con respecto a la infraestructura de las estaciones de servicio con suministro de GLP, la NTC 3769:1995: *Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP. Estaciones de servicio para suministro de GLP* y la NTC 3853-1:1996: *Instalación de sistemas 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, control de incendios y planes de prevención y contingencia. Como tal, la norma NTC 3769:1995 es muy similar a las características de la norma NFPA 58-95, en las que se incluyen controles 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 y protección contra incendios (UNAL., 2014). Por otro lado, las dos normativas nacionales también se basan en otras normativas para el diseño de las estaciones de servicio, algunas de ellas son (ICONTEC., 1996):

ASTM – American Society for Testing & Materials

- ASTM A53-1990: especificaciones de tubería y recubrimientos en acero, acero al carbón y Zinc. Información sobre soldadura y detección de fisuras.
- ASTM D2513-1990: especificaciones de tubería termoplástica de gas a alta presión, codos y uniones.
- ASTM A539-90a: especificaciones de tubería soldada eléctrica resistente para uso exclusivo de combustibles gaseosos.
- ASTM B43-1991: especificaciones de tubería y recubrimientos en acero, acero al carbón y Zinc. Información sobre soldadura y detección de fisuras.

NPFA – American Society for Testing & Materials

- NPFA 10:1990: Estándar de extintores portátiles.
- NFPA 54:1992: Código nacional del combustible gaseosos.
- NFPA 59:1992: Estándar de almacenamiento y manejo de GLP en plantas de gas.
- NFPA 302:1989: Estándar de protección del fuego.

NTC – Norma Técnica Colombiana

- NTC 522-1: 1995, Recipientes metálicos. Cilindros de acero con costura para gases licuados del petróleo (GLP) con capacidad desde 5 kg hasta 46 kg.
- NTC 1461: 1987, Higiene y seguridad. Colores y señales de seguridad.
- NTC 1692: 1998, Transporte. Transporte de mercancías peligrosas.
- NTC 3712: 1995, Recipientes metálicos. Recipientes para almacenamiento de gases licuados del petróleo entre 46 kg (101 lb) y 191 kg (420 lb).
- NTC 3770: 1995, Equipos para carburación dual GLP/gasolina o dedicada GLP en motores de combustión interna.
- NTC 3771: 1995, Conversión de motores de combustión interna con carburación dedicada gasolina por carburación dual GLP/gasolina o dedicada GLP.

Con el propósito de mejorar la normativa técnica colombiana, es necesario tomar como referencia el “*código de prácticas de estaciones de servicio de gas licuado de petróleo*” de la ciudad de Hong Kong en China. Esta normativa posee diseños, especificaciones y reglamentos para el establecimiento de una estación de servicio de GLP, fundamentada bajo estudios de las normativas de países como Australia, Nueva Zelanda, Reino Unido y Holanda. Además, incluye normas y recomendaciones, para garantizar el correcto suministro del combustible en los dispensadores, en conjunto de especificaciones de los sistemas de seguridad a alta presión y resistencia al fuego (EMSD. 2007).

Para el desarrollo de una nueva normatividad colombiana para el diseño, especificaciones y recomendaciones de las estaciones de servicio con suministro de GLP, se dividirá este punto en varios tópicos relaciones del documento “*código de prácticas de estaciones de servicio de gas licuado de petróleo*” de EMSD., (2007):

- Diseño general y aprobación de estación de servicio de GLP.
- Ubicación de la estación de servicio de GLP.
- Diseño específico de la estación de servicio de GLP.
- Instalación de los equipos en la estación de servicio de GLP.
- Pruebas y puesta en marcha de estación de servicio de GLP.
- Operación de la estación de servicio de GLP.

4.3 Diseño y aprobación de estación de servicio de GLP

Para el diseño y construcción de las estaciones de servicio del GLP deben ser aprobadas ciertos tópicos por una entidad de servicios y constructora de infraestructuras de gas que analice las diferentes regulaciones para el nuevo establecimiento. Los tópicos son (EMSD. 2007):

- Reporte de riesgos cuantitativos de la estación de servicio de GLP.
- Diseño y cálculos del sistema de protección eléctrico y catódico.
- Tipos, cantidad y locación de los equipos contra incendios.
- Lista de los equipos y accesorios que forman parte de las conexiones e instalaciones de la estación de servicio.
- Especificaciones de las bombas, dispensadores, detectores y válvulas de cierre acopladas para el GLP.
- Pruebas y procedimientos de puesta en marcha de las instalaciones.

- Certificados de registro o propiedad ante el comercio.
- Planos donde se perciba la elevación y vistas seccionales de la estación de servicio. Diagrama de tuberías de GLP en conjunto con el sistema neumático. Diagramas de posición de detectores de gas y botones de emergencia. Especificaciones de los contenedores de GLP.

Para la aprobación del tanque de almacenamiento del GLP, este debe estar, en los límites de diseño y operación que se especifican en la regulación 7 de la normativa de seguridad del gas EMSD/GSO/110 y EMSD/GSO/110 (EMSD. 2007).

4.4 Ubicación de estación de servicio de GLP

En general, esta sección se basa en la ubicación y distancia mínima requerida de la estación de servicio con respecto a otros edificios adyacentes, tomando en cuenta distintos puntos de riesgos. Por lo tanto, la estación de servicio debe ser ubicada en un área que guarde una considerable distancia y orientación de la estructura con respecto a áreas habitables. Además, la instalación debe ser a cielo abierto, en donde los equipos de operación y almacenamiento se encuentren muy bien ventilados. Como ejemplo, se sugiere su instalación en zonas aledañas a las autopistas, para garantizar el transporte y suministro del GLP en la estación. De lo anterior, el diseño e instalación de la estación de servicio debe considerar los siguientes aspectos (EMSD. 2007):

- Minimizar la exposición o impacto de los camiones cisternas con GLP hacia vehículos particulares cuando entran o salgan del sitio.
- Considerar la amplitud de las vías, ángulos de giro, líneas de visión, tráfico y velocidad de los vehículos en las instalaciones.
- Proveer un acceso y egreso de los camiones cisternas.
- Permitir el suministro del GLP hacia las instalaciones evitando que el camión cisterna deba dar reversa para realizar la acción. Además, un área de parqueo visible para el camión.
- Designar áreas para el suministro del GLP a los vehículos particulares.
- Proveer una adecuada iluminación en las áreas de suministro y llenado del combustible con propósitos de seguridad.

- En el mayor de los casos evitar localizar tanques de almacenamiento del GLP bajo tierra sobre el tráfico vehicular o zonas de cisternas.
- Proveer un tablero de información de las tarifas de los combustibles en venta de la estación.

Dimensiones físicas de la estación de servicio de GLP

El tamaño mínimo para una estación de servicio de GLP nueva, deberá ser de 750 m², aunque no necesariamente deba ser aplicado para estaciones de servicio existentes con otros combustibles vehiculares. Como tal, el tamaño del diseño de la estación dependerá de la localización, capacidad de almacenaje, número de dispensadores de los combustibles y otras zonas de servicio, siguiendo siempre los estándares de regulación del país. Para el caso de Hong Kong, la distancia de separación mínima requerida de la estación de servicio con respecto a otras edificaciones debe estar acorde a la cláusula 4.5 y 4.6 del estándar de planeación de la ciudad (EMSD. 2007).

Distancias de separación de estación de servicio GLP con respecto a otras edificaciones

Las estaciones de suministro de GLP y sus componentes deben cumplir con los requerimientos de separación, tal como se especifican en la **Tabla 4-1**. No obstante, en Hong Kong, los requerimientos de separación finales deben estar sujetos a un reporte de riesgos cuantificados, tal como se especifica en la cláusula 3.3 del estándar de planeación de la ciudad (EMSD. 2007).

Instalaciones de suministro del GLP	Casas de campo/zona comercial/ zona industrial/zona recreacional	Zona residencial/ Zona de instituciones
	(m)	(m)
Tanque de almacenamiento de GLP con bombas sumergibles	15	55
Conexiones de llenado del tanque de almacenamiento de GLP	15	55
Zona de descarga del camión cisterna	15	55
Dispensores del GLP	15	15

Tabla 4-1. Distancia de separación de estaciones de suministro del GLP (EMSD. 2007).

Distancias de separación de estación de servicio GLP con respecto a otras edificaciones

Las estaciones de suministro de GLP y sus componentes deben cumplir con los requerimientos de distancia mínima entre otras estaciones de suministro de gasolina/diésel, tal como se muestra en la **Tabla 4-2**. No obstante, la distancia mínima de separación puede ser reducida significativamente, si se construye un muro de radiación con materiales no inflamables, resistencia de dos horas de fuego continuo y altura mínima de 1.8 m, de acuerdo al código de prácticas de construcciones resistentes al fuego. El muro como tal, deberá ser construido en los límites de la estación de servicio (EMSD. 2007).

La distancia entre los tanques de almacenamiento de GLP y los límites de las instalaciones deberán ser de al menos 1.5 m. Además, el tanque de almacenaje deberá estar rodeado de una cámara de contención dentro de los límites de la instalación (EMSD. 2007). Un diagrama típico del diseño de una estación de suministro de GLP con los mínimos requerimientos de separación, se muestra en la **Figura 4-1**.

	Tanque de almacenamiento de GLP con bombas sumergibles	Conexiones de llenado del tanque de almacenamiento de GLP	Dispensores del GLP	Conexiones de llenado de vehículos con GLP
Tanque de almacenamiento de GLP con bombas sumergibles	-	-	3m	3m
Conexiones de llenado del tanque de almacenamiento de GLP	-	-	3m	3m
Dispensores del GLP	3m	3m	-	-
Conexiones de llenado de vehículos con GLP	3m	3m	-	-
Tanque de almacenamiento de gasolina subterráneo, o punto de llenado	1.5m	3m	3m	3m
Respiraderos del tanque de almacenamiento de gasolina	3m	3m	3m	3m
Bombas de gasolina/dispensores	3m	3m	1.5m	1.5m
Bombas de Diésel/dispensores	3m	3m	1.5m	1.5m
Límites de la instalación, edificaciones y puntos fijos de riesgo de fuego	7.6m	7.6m	4.25m	4.25

Tabla 4-2. Distancia de separación de estaciones de suministro del GLP y gasolina/diésel (EMSD. 2007).

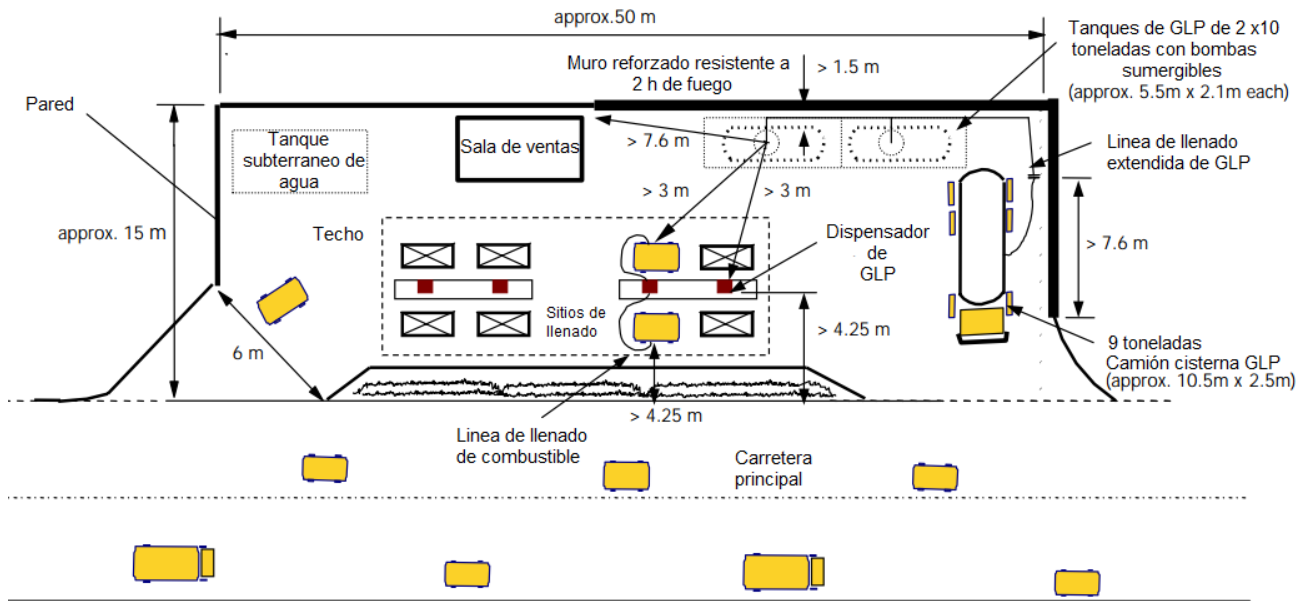


Figura 4-1. Estación de servicio de GLP (EMSD. 2007).

4.5 Diseño de estación de servicio de GLP

En general, todos los equipos de la estación de suministro de GLP deben estar adecuados para soportar rangos amplios de temperatura, presión, compatibilidad, entre otros, durante las operaciones en el día. Además, se debe garantizar su completo mantenimiento y planes contra incendios. Por otro lado, los equipos deben estar contruidos en materiales como el bronce, latón, cobre, entre otros, y sus componentes de caucho, deberán ser de un grado y calidad adecuados para el servicio de suministro del combustible. Por consiguiente, se recomienda que las partes de contención de presión en los equipos, sean contruidas con acero, hierro nodular, hierro maleable o latón y ser resistentes a la corrosión, de acuerdo a las normas BS EN 1563 o BS EN 1564 (EMSD. 2007).

El sistema de drenaje de la estación de servicio de GLP debe ser adecuadamente diseñado para prevenir derrames en el sistema de alcantarillado público. Por lo tanto, las bahías de dispensación de combustible y de cisternas de llenado de tanques, deben tener canalizaciones o desniveles que garanticen el flujo hacia el sistema de drenaje correcto (EMSD. 2007).

Otro punto importante en el diseño de la estación de servicio, es en la construcción de barreras de contención y prevención de accidentes en las ubicaciones apropiadas, para evitar accidentes y colisiones de vehículos con conexiones y tanques de almacenamiento de GLP (EMSD. 2007).

Tanque de almacenamiento de GLP

En las estaciones de servicio de GLP usualmente se construyen tanques de almacenamiento bajo tierra, operables con bombas sumergibles. Cada tanque de almacenaje debe ser pintado con recubrimientos resistentes a la corrosión, ser provistos de sistemas de protección catódica e instalados bajo cámaras de concreto envueltas con arena fina. Por otro lado, algunos diseños de estaciones de servicio, contemplan dos tanques de almacenamiento de GLP con el propósito de eliminar la interrupción del suministro del GLP, cuando alguno de los tanques se encuentre fuera de servicio. De lo anterior, se recomienda que los tanques de almacenamiento de GLP no sean instalados en sótanos, ni cerca de 7m de cualquier contenedor que posea un combustible líquido inflamable con puntos de ebullición por debajo 65 °C y a distancias entre los límites de la estación de al menos 1.5 m (EMSD. 2007).

Las conexiones para el llenado, válvulas de ensamblaje y bombas sumergibles de cualquier tanque de almacenamiento de GLP debe tener una distancia de al menos 7.6m de edificios adyacentes y límites de la estación (EMSD. 2007).

Los tanques de almacenamiento deben ser diseñados y construidos de acuerdo con la norma PD 5500 o sus equivalentes, las normas AS 1210 o Código de contenedores de presión y calderas ANSI/ASME sección VIII. Como tal, los tanques deben estar diseñados para soportar una presión y temperatura mínima de 1.725 MPa y -10 – 50 °C respectivamente. Además, deben incluir un espesor mínimo de 1 mm para permitir la corrosión durante su tiempo de uso (EMSD. 2007). Por otro lado, los tanques de almacenamiento deben tener una placa de metal con la información de seguridad pertinente, tal como se especifica a continuación (EMSD. 2007):

- Empresa que lo produce y número de serie.
- Fecha de manufactura y código de diseño.
- Capacidad de agua en kilolitros.
- Presión máxima de operación kPa.
- Temperatura mínima y máxima de operación en grados Celsius.
- Pruebas de presión y fecha de realización.
- Marca de la autoridad inspectora del producto.

Para un correcto y seguro funcionamiento, cada tanque de almacenamiento debe poseer las válvulas y uniones que se especifican a continuación (EMSD. 2007):

- Válvula de alivio de presión.
- Válvula de cierre con mecanismo de cierre y válvula de flujo en exceso por entrada de combustible en bomba.
- Válvula de cierre y válvula de flujo en exceso por bombeo desviado y retorno de líquidos en dispensador del combustible.
- Válvula de cierre y válvula de chequeo para el suministro de GLP.
- Dispositivo de nivel de presión fijo.
- Dispositivo de medición de contenido.
- Válvula de balances de vapores entre la bomba del pozo (camión cisterna) y el tanque de almacenamiento con mecanismo de cierre.
- Válvula de cierre para conexiones de drenado del tanque.

Todo tanque de almacenamiento debe contener un puerto de inspección con un diámetro mínimo de 450 mm para tanques que exceden los 5000 litros de capacidad de agua. Además, las válvulas de flujo en exceso o de chequeo deben ser instalados en todas las conexiones con combustible líquido con diámetros mayores a 3.0 mm y las de vapor en diámetros mayores a 8.0 mm con excepción de las válvulas de alivio de presión (EMSD. 2007).

Se debe evitar tener el tanque de almacenamiento de GLP lleno a temperaturas de 52.5 °C. Como regla general el tanque no debe llenarse más allá del 85% de su volumen. Además, se debe mantener los registros del tanque actualizados con las siguientes especificaciones (EMSD. 2007):

- Diseños detallados de los arreglos y uniones de las toberas.
- Certificados del metal utilizado.
- Reportes de pruebas de soldadura y certificados de aprobación.
- Certificados de manufactura y de todas las pruebas de inspección.

Cámara de concreto del tanque de almacenamiento

Cada tanque de almacenamiento de GLP subterráneo, debe ser ubicado sobre una cámara de concreto, recubierta en arena fina para proveer el equipo de protección catódica. La cámara, deberá ser diseñada para soportar el peso de los vehículos, el contenido del tanque y de toda la estructura de la estación de servicio. De lo anterior, esta deberá proveer protección contra perforaciones y tener un espesor de 200 mm

mínimo y en caso de compartir muros con otra cámara, el espesor mínimo deberá ser de 300 mm (EMSD. 2007).

El tanque de almacenamiento de GLP deberá ser cubierta de arena fina con una profundidad de 450 mm mínimo y reforzada con concreto de 150 mm de espesor mínimo. Esta protección adicional y en conjunto con la cámara de concreto, deberán prevenir el ingreso de agua y combustibles desde la superficie (EMSD. 2007).

Se recomienda que las cámaras de concreto posean tubería de ventilación y zonas de inspección que permitan el chequeo periódico del tanque de almacenamiento. Las ventanillas de ventilación se deben instalar por debajo del equipo con el propósito de permitir la rápida extracción de gases y algunos fluidos del interior de la cámara (EMSD. 2007).

Protección de equipo contra corrosión

Sobre la superficie y por encima del tanque de almacenamiento del GLP se deberá limpiar y soldar todo acceso para prevenir la entrada de grasas, polvo y compuestos que puedan ocasionar corrosión al equipo. Por eso, se recomienda que la zona inmediatamente superior del tanque sea recubierta con una capa de químicos resistentes para la corrosión (regulación 12 de seguridad del gas) la cual debe proveer (EMSD. 2007):

- Aislamiento eléctrico entre el tanque de almacenamiento y la tierra.
- Un medio inerte, libre de humedad o de alto efecto dieléctrico y lo suficientemente fuerte para resistir daños mecánicos durante la instalación.
- Ser lo suficientemente flexible para permitir cualquier daño por expansiones y contracciones del tanque de almacenamiento del GLP.

Cada tanque de almacenamiento se le debe realizar pruebas de protección catódica en puntos de pruebas especificados durante su diseño. Por ende, el diseño y construcción del sistema de protección deberá ser realizado por un especialista en corrosión, que adhiera ánodos de sacrificio u otros equipos de acuerdo a las normativas NACE RP-01-69, RP-02-85 y CGA OCC-1-1985. Por ejemplo, el tamaño y número del primero, deberá ser considerado de acuerdo a la fecha de la siguiente revalidación del equipo de almacenamiento (EMSD. 2007).

Se recomienda que la elección de los ánodos sea basada en el área superficial del tanque de combustible y resultados de las pruebas con la arena fina (PH, resistividad, etc.). Como dato importante, el potencial de superficie del tanque de almacenamiento del GLP debe ser protegido con un potencial más negativo de -0.85 voltios con un electrodo de referencia cobre/cobre sulfato (Cu/CuSO₄) o más negativo de +0.25 voltios con un electrodo de Zinc (EMSD. 2007).

Válvula de alivio de presión

Cada tanque de almacenamiento de GLP deberá tener acoplados válvulas de alivio de presión de acuerdo al código de contenedores a presión. El accesorio como tal, deberá tener estampado en una placa metálica la siguiente información (EMSD. 2007):

- Identificación del diseñador incluyendo el modelo, fecha de manufactura, etc.
- La presión de descarga a la cual la válvula empieza a realizar descargas.

Usualmente se recomienda añadir accesorios de múltiples puertos en el tanque, con el propósito de realizar pruebas o uso del servicio con otras válvulas. Además, de realizar descargas de seguridad hacia la atmosfera mediante los sistemas de ventilación del tanque de almacenamiento, ubicados a 3m sobre el nivel del suelo y 2m por encima del tanque de almacenamiento (EMSD. 2007).

Para tanques de almacenamiento del GLP bajo tierra o en superficie, se recomienda medir la capacidad de flujo total de las válvulas de alivio de acuerdo a la siguiente formula (EMSD. 2007):

$$A = 3.1965 S^{0.82}$$

Donde

S = Es la superficie total externa del tanque en m².

A = Aire que se permite salir a 15 °C a presión atmosférica m³/min.

Conexiones de suministro/llenado

Las conexiones de suministro en superficie deberán ser ubicadas en el tanque de almacenamiento de GLP de manera práctica. No obstante, cuando existan varios tanques de almacenaje, se debe diseñar un sistema de tubería con válvulas que permita

el suministro del combustible y el aislamiento de un tanque con respecto al otro (EMSD. 2007). Además, sus conexiones de suministro del GLP deberán ser protegidas de posibles daños mecánicos por camiones cisternas, mediante la inclusión de postes y barreras de concreto en puntos estratégicos (EMSD. 2007). Por otro lado, se recomiendan válvulas de doble-chequeo instaladas en las líneas de suministro para prevenir derrames del GLP líquido bajo condiciones anormales. Como, por ejemplo, la ruptura de la tubería de suministro (EMSD. 2007).

Bombas sumergibles

Las bombas sumergibles en los tanques de almacenamiento de GLP deben cumplir las especificaciones de operación del sistema de suministro y acordes al espacio disponible para no dar chance a golpes e impactos de vehículos.

Válvula de paso de bomba

Una válvula de paso debe ser instalado en la línea con el propósito de mantener el diferencial de presión generado por la bomba y el dispositivo de suministro. La descarga de presión debe ser tenida en cuenta de acuerdo a la curva de carga de la bomba para evitar el excesivo sobrecalentamiento de la bomba y presión en el sistema (EMSD. 2007).

Dispensador de GLP

El dispensador de GLP y todos sus componentes deberán ser aprueba de fuego y cumplir con los requerimientos de estándares internacionales. Además, el equipo debe incluir los siguientes dispositivos, tal como se especifica en la **Figura 4-2** (EMSD. 2007):

- Un dispositivo compensador de temperatura automático con el fin de suministrar la cantidad de GLP a los clientes sin verse afectado por la variación de la temperatura ambiente.
- Una línea de retorno de vapor para devolver el residuo de GLP cuando se termine de suministrar al vehículo del cliente.

- Un mecanismo de control de la bomba de suministro para proveer el flujo del combustible a través de la bomba sumergible.
- Un mecanismo de corte de suministro en caso de ruptura o colisión de un vehículo con el dispensador de combustible.
- Una válvula de cierre manual y de flujo en exceso para proveer un suministro del combustible continuo entre el dispensador y la boca de llenado del vehículo. Esto con el fin de prevenir el derrame del GLP bajo condiciones anormales y dispensar el combustible de manera segura.
- Componentes eliminadores de vapor del líquido para la correcta medición de suministro del combustible, diferentes válvulas, entre ellas, una de alivio de presión.

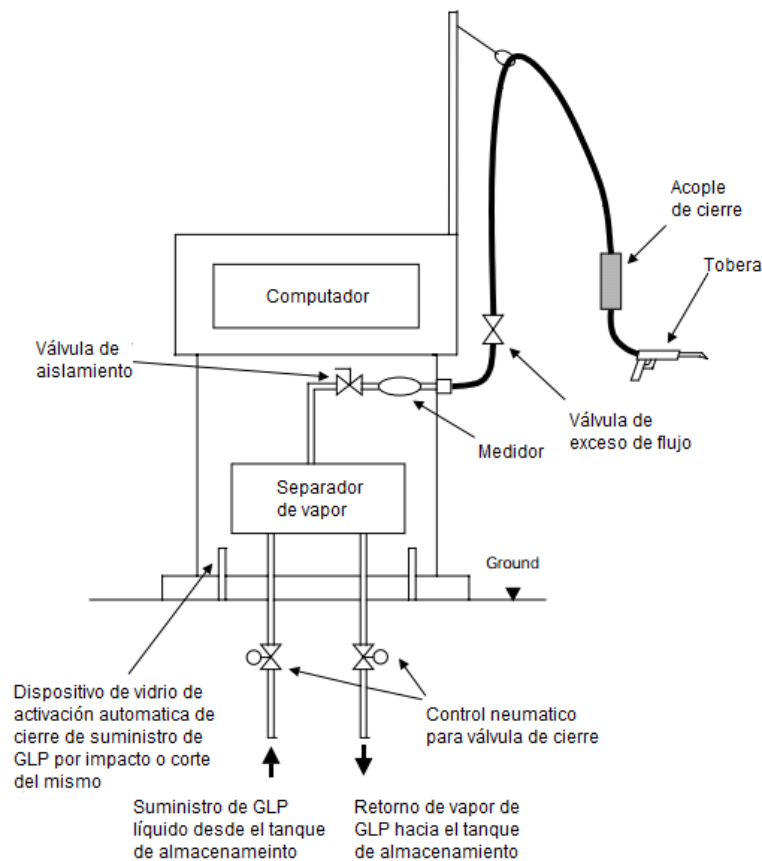


Figura 4-2. Dispensador de GLP (EMSD. 2007).

Tobera de dispensación del combustible

La tobera de dispensación del combustible debe proveer el GLP a un flujo no mayor de 4 cm³ a condiciones atmosféricas. Además, el diámetro de acople hacia el equipo dispensador debe ser de 1 $\frac{3}{4}$ de pulgada. Como norma de seguridad, este dispositivo no debe ser extraíble de manera fácil o derivativa mediante las operaciones de dispensación e incluso se les debe añadir una válvula de doble chequeo o una simple con el propósito de garantizar los cambios dinámicos de presión (EMSD. 2007).

Acople de cierre

Los acoples de cierre deben ser provisto entre la válvula de exceso de flujo en el dispensador y la tobera de dispensación para proteger el equipo en caso de derrame excesivo del líquido de GLP, cuando la tobera se encuentre aún acoplada a la boca de suministro del vehículo (EMSD. 2007).

Tubería y uniones

Las tuberías y múltiples válvulas deben encontrarse al aire libre y en la superficie, unos lejos de otras, excepto en aquellas que redirijan el flujo del combustible al tanque de almacenamiento bajo tierra. Como practica de diseño, se pretende mantener las distintas tuberías como las de conexiones eléctricas a no menos de 250 mm. Además, todas las tuberías deben encontrarse soldadas para prevenir y/o reducir el derrame de combustible (EMSD. 2007).

Se recomienda que todas las tuberías deben ser diseñadas para operaciones a alta presión y de acuerdo a las normas ASTM A53, BS 3601 o equivalente a estas. Así mismo se debe mantener al mínimo la cantidad de uniones entre tuberías, únicamente se permite en mayores cantidades las uniones de tipo "flange". En donde, estas uniones de acero o cerámica deben cumplir con la norma ANSI B 16.5, BS 1560 o equivalente y cumplir con la norma de acoplamiento a otras tuberías BS 4882 o equivalente (EMSD. 2007).

Las juntas de las tuberías deben tener un diámetro superior de 50 mm y ser de sello con soldadura (tipo flange). Como tal las uniones deben cumplir con la norma BS 1965 o equivalente. Otros tipos de juntas de enrosque o de soldadura deben encontrar acopladas a las tuberías de acuerdo a las normas BS 3799 o equivalente. En todo

momento se debe evitar la adaptación de otros tipos de juntas que no cumplan con las especificaciones a las tuberías (EMSD. 2007).

La medición de presión y de acoples de accesorios se deben realizar en puntos de pruebas estratégicamente planeados en el sistema de tubería general. Además, toda tubería que se encuentre bajo tierra debe encontrarse a un mínimo de 1000 mm de profundidad y ser marcados con etiquetas amarillas (EMSD. 2007).

Las válvulas de alivio de presión hidrostática deben ser fijadas entre las secciones de tubería, donde los líquidos del GLP puedan quedar atrapados (Ejemplo, en secciones entre las válvulas de cierre y uniones de tipo flange, bombas y zonas de succión o descarga, etc.) de manera que se permita la expansión de los líquidos por medios térmicos. Como tal, este dispositivo debe poder trabajar en un rango de 2.4 MPa (350 psig) a 2.75 MPa (400 psig) y no permitir que este rango sea mayor que el elemento o componente más débil del sistema (EMSD. 2007).

Conexión a tierra

Todas las tuberías de conducción GLP y zonas de dispensación del GLP deben encontrarse efectivamente conectadas y pegadas a tierra, para prevenir la acumulación de electricidad estática (EMSD. 2007).

Botón de apagado remoto por emergencia

En la estación de servicio de GLP deben encontrarse un número suficiente de botones de apagado de emergencia que permitan la interrupción del suministro del combustible en las zonas de llenado, tanques de almacenamiento en caso de un evento de emergencia (EMSD. 2007).

Sistemas de detección de gas

Los sistemas de detección de gas deben ser el adecuado en diferentes localizaciones de la estación de servicio de GLP. El sistema deberá generar un alarma escuchable al detectar una concentración de 20% del límite mínimo de inflamabilidad y una señal directa de fuego al centro de control al detectar una concentración de 40% del límite mínimo de inflamabilidad. Como tal, cada detector debe ser aislado individualmente para propósitos de mantenimiento y prueba de cada uno de ellos (EMSD. 2007).

4.6 Instalación de equipos de estación de servicio GLP

En general, la construcción y aprobación de la estación de servicio debe ser aprobada por la autoridad del gas en el país. En donde, se tienen en cuenta los requerimientos de los dibujos y diseños en la ubicación tentativa. Como tal, las instalaciones en el sitio deben ser realizados por personal entrenado y con experiencia.

Tanque de almacenamiento del GLP

Cada tanque de almacenamiento del GLP debe ser estable y seguro a altas presiones de operación, y estar pintados en toda su superficie con un espesor de 400 um mínimo. Por lo tanto, toda manipulación del contenedor, debe tomarse con extrema precaución durante el transporte o reparaciones. También, se debe evitar cualquier tipo de conexiones eléctricas cercanas al contenedor, para evitar que se la superficie de electricidad estática.

Protección catódica

Cada cámara de concreto en donde se encuentra el tanque de almacenamiento del GLP envuelta en arena fina, debe poseer ánodos y estar libres de contacto con otros objetos. Por lo tanto, los electrodos de referencia deben ser instalados en las terminales y ser aprueba de agua, para proveer las pruebas del sistema de protección catódica. Además, se aconseja tener cuidado durante las operaciones de llenado del tanque de almacenamiento para no dañar las conexiones eléctricas y provocar corto circuitos. Como dato adicional, al instalar el sistema de protección a tierra, se debe tener cuidado de no interferir con el sistema de protección catódica. Después de instalar el sistema de protección catódica y conexiones electricas, se deben realizar dibujos y anotaciones de los siguientes datos:

- Cantidad, tamaño y localización de los ánodos.
- Fecha de instalación.
- Tipos de materiales usados.
- Mediciones de resistividad.

Estos datos y resultados de pruebas subsiguientes se deben tener cuenta para el mantenimiento del servicio del tanque de almacenamiento del GLP.

Tubería y uniones

Las tuberías del GLP deben ser prácticas y de conexiones mediante soldaduras, así como también, las uniones deben compartir esta misma especificación y cumplir con los estándares de soldadura del código de práctica del GLP No. 22, NFPA 30^a, NFPA 58, CAN/CGA B149.2 o equivalentes. Por otro lado, las válvulas de cierre deben ser instaladas, para aislar los equipos de las tuberías de transporte del combustible. Así como también, proveerles protección para daño mecánico mediante colisiones vehiculares en superficie.

Antes de la instalación de las secciones y uniones de tubería, se debe realizar una completa inspección y limpieza de cada uno de estos para asegurar la ausencia de polvo, grasa y materia foránea. Después, durante la instalación, se deben tomar precauciones para prevenir la contaminación de estos. Por otro lado, las tuberías bajo tierra y en superficie, deben ser protegidos mediante capas de agentes anticorrosivos. Además, las tuberías de transporte del GLP deben ser pintadas de azul y etiquetadas con la palabra "líquido". También, se debe tener en cuenta durante el diseño de la tubería, la posibilidad de expansión y contracción térmica de los mismos, para proveer de los debidos soportes y distancias apropiadas de manera vertical u horizontal de acuerdo a la **Tabla 4-3**.

Tamaño nominal (mm)	Espaciamiento máximo	
	Vertical (m)	Horizontal (m)
20	3	2.5
25	3	2.5
32	3	2.7
40	3.5	3
50	3.5	3
80	4.5	3
100	4.5	3
150	4.5	3
200	4.5	3

Tabla 4-3. Espaciamiento de soportes para tubería en superficie (EMSD. 2007).

Dispensador del GLP

Los dispensadores del GLP y sus componentes deben ser instalados, ensayados y aprobados de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Como tal, deben ser acoplados en cimientos de concreto sin tener ninguna restricción en las conexiones de sus componentes y durante el mantenimiento del mismo. Además, se deben proveer válvulas de cierre remoto lo más cercano a nivel del suelo y por debajo del dispositivo de protección de cizalla. Se sugiere incluso, que el dispensador se encuentre a una altura considerable para prevenir daños significativos por colisiones de vehículos.

Instalación eléctrica

Todo equipo eléctrico debe ser instalado de acuerdo a las instrucciones del fabricante y los estatutos regulatorios. En donde, deben ser ubicados de manera razonable por fuera de áreas de riesgo, y estar diseñadas a prueba de fuego de acuerdo a la norma BS EN 60079 o equivalente. También, el equipo eléctrico usado debe ser clasificado según la zona mediante certificados de acuerdo a la norma BS EN 60079 o equivalente. Estas áreas de clasificación en las estaciones de servicio de GLP se muestran en la **Tabla 4-4**.

Localización	Extensión del área de clasificación	Área de clasificación
Tanque de almacenamiento de GLP	Dentro de 1.5 m en todas las direcciones con respecto a conexiones o coraza del tanque	Zona 1
	Por encima de 1.5 m sobre el nivel del suelo y dentro de 3 m con respecto a válvulas y conexiones de suministro	Zona 2
Válvula de alivio de presión	Dentro del camino directo de descarga	No ajustado para equipos eléctricos
	Dentro de 1.5 m en todas las direcciones con respecto a los puntos de descarga	Zona 1
	Entre 1.5 – 4.5 m en todas las direcciones con respecto a los puntos de descarga	Zona 2
Carga y descarga del camión cisterna de GLP	Dentro de 1.5 m en todas las direcciones con respecto a conexiones (conectadas o desconectadas) de transferencia de combustibles	Zona 1
	Entre 1.5 – 4.5 m en todas las direcciones con respecto a los puntos de conexión o desconexión	Zona 2
Dispensadores de GLP	Áreas dentro de la cubierta del dispensador	Definido por el fabricante
	Área cercana al dispensador	Zona 2

Dónde:

Zona 0 – Áreas en la cual la explosión de mezcla de aire-combustible está presente por largos periodos.
 Zona 1 – Áreas en la cual la explosión de mezcla de aire-combustible es probable que ocurra durante la operación normal.
 Zona 2 – Áreas en la cual la explosión de mezcla de aire-combustible no es probable que ocurra durante la operación normal

Tabla 4-4. Áreas de clasificación en las estaciones de servicio de GLP (EMSD. 2007).

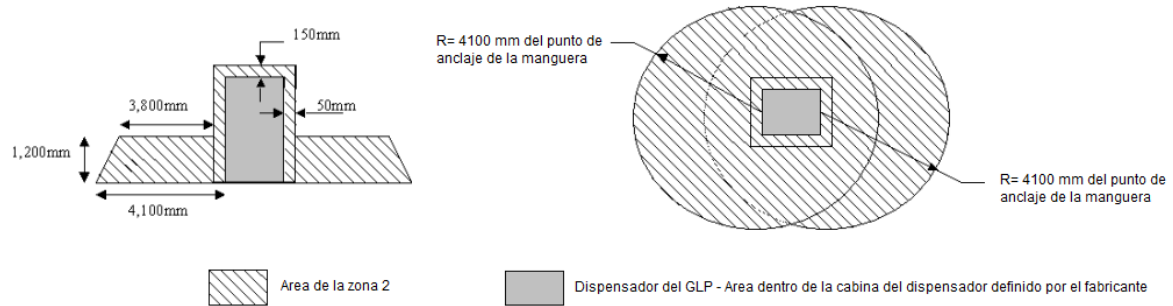


Figura 4-3. Dispensador de GLP (EMSD. 2007).

Los tanques de almacenamiento y accesorio de tuberías con sistema de protección catódica normalmente no se encuentran conectados a tierra, y a su vez las conexiones eléctricas se encuentran aisladas, corriente abajo por tuberías “flange”. No obstante, los puntos de conexión a tierra deben tener una resistencia eléctrica no mayor a 1×10^6 ohms (EMSD. 2007).

4.7 Pruebas y puesta en marcha de estación de servicio GLP

Las instalaciones de la estación de servicio de GLP deben ser ensayadas y puestas en marcha de acuerdo a los estándares, del código de práctica, diseños, especificaciones, manuales, etc. Por lo tanto, los fabricantes deben realizar reportes/catálogos y pruebas de los equipos, pero no limitadas, a la siguiente información (EMSD. 2007):

- Reporte de prueba de válvula de alivio de presión.
- Reporte de prueba de bombas sumergibles.
- Reporte de prueba de dispensadores de GLP.
- Reporte de prueba del sistema de control del GLP.
- Reporte de prueba del sistema de apagado por emergencia.
- Reporte de prueba del sistema neumático.
- Reporte de prueba de las instalaciones contra incendios, incluyendo los sistemas de detección de gas.
- Reporte de prueba de las instalaciones eléctricas incluyendo el sistema de protección eléctrico, conexiones a tierra, continuidad a tierra, arreglos de conexiones estáticas, y aislamientos de tubería “flange”.
- Reportes de prueba del sistema de protección catódico y otros componentes.

Pruebas de bomba sumergible y tanque de almacenamiento

Las siguientes pruebas se requieren para los tanques de almacenamiento del GLP (EMSD. 2007):

- Pruebas hidráulicas.
- Pruebas de inspección de espesor por ultrasonido.
- Pruebas de radiografía (tanque nuevo).
- Pruebas de partículas magnéticas.
- Pruebas de espesor de pintura.

Los tanques de almacenamiento del GLP deben ser ensayados a 1.5 veces la presión de diseño (ejemplo 2584 kPa o 375 psig) para pruebas de integridad, a menos que el fabricante especifique otros valores. Además, todas las conexiones del tanque de almacenamiento y uniones deben ser a prueba de derrames y con una presión mínima de 689 kPa (100 psig) de aire o gas inerte (EMSD. 2007).

Las bombas sumergibles de GLP y dispositivos asociados de control deben ser probados y puestos en marcha de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Al igual que las funciones y pruebas de aislamiento (EMSD. 2007).

Pruebas de tubería

Todas las tuberías deben ser ensayadas después de la construcción, antes de ser puestas en operación. Esto, con el propósito de asegurar la integridad estructural de la misma. Además, las tuberías deben ser probadas a presión de la siguiente manera (EMSD. 2007):

- A las tuberías se le realizan pruebas hidráulicas a 1.1 veces los ajustes HPRV, después de haber aislado los elementos que puedan dañar el equipo en la prueba de presión.

- Después de haber completado la prueba de hidráulica, todos los elementos aislados deben ser apropiadamente instalados y sistema entero para realizar la prueba neumática a presión mínima de 1378 kPa (200 psig).

Las pruebas de presión como tal, requieren de un tiempo para lograr la estabilización térmica del sistema. De tal manera, que sean ajustados las especificaciones con el propósito de realizar la prueba. Generalmente, el tiempo que puede tardar dependerá de la temperatura, tamaño y longitud de la tubería, llegando a ser cercano a los 15 minutos (EMSD. 2007). Esta prueba, debe ser realizada bajo diferentes fases de la siguiente manera (EMSD. 2007):

- Inicialmente, el sistema debe ser presurizado hasta los 140 kPa (20 psig) y mantenida el tiempo suficiente para asegurar la propagación correcta.
- La presión, luego se eleva en etapas hasta el requerimiento de la prueba de presión. Durante cada etapa, se debe esperar un tiempo prudente para asegurar la integridad del sistema.

Para cada prueba neumática e hidráulica, se debe esperar un periodo mínimo de 30 minutos, con el fin de detectar si existen decaimientos en la presión. Tomando en cuenta si algunas de las tuberías se quiebran y perforan. Al final, todas las pruebas y resultados en las tuberías deben ser registradas de la siguiente manera (EMSD. 2007):

- Nombre del contratista y firma de la persona competente para la supervisión de las pruebas.
- Fecha de la prueba
- Presión máxima de trabajo.
- Prueba de presión, medio y duración.
- Resultados de las pruebas.
- Especificaciones y ajustes del material de las tuberías y uniones.

Pruebas del dispensador de GLP

El dispensador de combustible y sus componentes deben ser ensayados y puestos en marcha de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Así mismo, las conexiones, uniones, sellos, bocas de dispensación, toberas y dispensadores deben realizárseles pruebas de derrame (EMSD. 2007).

Prueba del sistema de apagado de emergencia, detección de gas y protección catódica

La prueba de funcionalidad del sistema de apagado de emergencia debe ser realizado, asegurándose de primera mano, que una vez sea activado el sistema, todas las válvulas neumáticas se cierren y el sistema de suministro de GLP se apague apropiadamente (EMSD. 2007).

Así mismo, el sistema de detección de gas y de protección catódica deben ser ajustados de acuerdo al diseño del fabricante (EMSD. 2007).

Purga del sistema de suministro de GLP

El procedimiento de purga para el sistema de suministro del GLP, especialmente el tanque de almacenamiento se da de la siguiente manera (método de presión y ventilación) (EMSD. 2007):

- Después de la prueba de presión del tanque de almacenamiento, se debe inyectar una corriente de gas inerte (ejemplo N₂) para mantener el contenido de oxígeno por debajo del 11.4%.
- Trazas pequeñas de agua puede ser eliminada mediante la pulverización de pequeñas cantidades de metanol en el tanque de almacenamiento.
- Para prevenir la rápida vaporización del GLP líquida, solo el vapor del GLP será retornado al tanque de almacenamiento de manera que restaure la presión del sistema.
- Para asegurar una relación alta de GLP/gas inerte, se debe mantener un pequeño piloto de fuego en un área segura, para eliminar el gas inerte antes de que la llame se pague y termine la prueba.

El procedimiento de purga en el servicio de tubería (incluye dispensador y equipo asociado) se da de la siguiente manera (EMSD. 2007):

- Antes de introducir el GLP en la tubería, se debe purgar el gas inerte (ejemplo N₂), así el oxígeno es reducido a niveles inferiores a 11.4% por volumen. Así

mismo, el gas inerte se introduce con el propósito de ajustar la presión del regulador/vaporizador.

- Antes de introducir el GLP líquido en la tubería, el vapor del GLP debe ser introducido en la tubería para proveer la presión del sistema de almacenaje. Esto con el fin de evitar efectos de cavitación.
- Para tuberías de tamaño de 32 mm nominal, la mezcla de GLP/gas inerte debe ser dispersada bajo supervisión apropiada en un área ventilada sin ninguna fuente de ignición. Para tuberías de tamaño superior de 32 mm nominal, un fuego piloto debe estar permanentemente encendido y localizado a una distancia segura.
- Se debe tener precaución para asegurar la completa remoción del gas inerte (usar flama estable en un piloto de ignición en lugar seguro) antes de la terminación del proceso de quemado.

4.8 Operación de la estación de servicio de GLP

En general, las personas que trabajan en la estación de servicio deben seguir las siguientes instrucciones (EMSD. 2007):

- Tener un completo entrenamiento en las áreas específicas del trabajo.
- Conocer las propiedades del GLP.
- Tener el conocimiento de las regulaciones y normativa apropiadas.
- Conocer las respectivas instrucciones de seguridad en caso de emergencia.
- Conocer los límites de operación de los equipos bajo su cargo.

Operación de llenado de combustible

El operador debe seguir los siguientes procedimientos para asegurar el correcto suministro del combustible a los vehículos (EMSD. 2007):

- Abrir la tapa de alimentación del vehículo en sentido contrario a las agujas del reloj.
- Levantar la tobera del dispensador de GLP y esperar que la pantalla del mismo, se restablezca para la operación.
- Asegurarse que no existan obstáculos entre la tobera de dispensación y la boca de llenado en el vehículo.
- Ubicar el pistilo en rosca de la tobera en la boca de llenado del vehículo, en sentido de las agujas del reloj, para trabar los dispositivos apropiadamente.
- Apretar el gatillo de suministro del GLP en la tobera de dispensación, con el propósito de dejar fluir el combustible hacia el tanque de almacenamiento del vehículo. El flujo deberá detenerse automáticamente una vez se alcance un 85 % del volumen total del tanque de almacenaje.
- Para terminar la dispensación del GLP, se debe rotar la tobera de dispensación en el vehículo en sentido contrario de las agujas del reloj, con el fin de retirar de manera segura la tobera de dispensación.

Llenado de tanque de almacenamiento de GLP vehicular revalidado

La revalidación de los tanques de almacenamiento de GLP debe llevarse a cabo en un intervalo no mayor a los cinco años de acuerdo a las regulaciones de seguridad del gas. Como tal, este proceso requiere que normalmente se desacople el recipiente del vehículo para proceder a la revisión y realización de las pruebas pertinentes, en las que usualmente se lleva a cabo en estaciones de servicio de GLP por personal de taller competente para proveer este servicio. El procedimiento a seguir para el llenado de tanques de almacenamiento de GLP, se describe a continuación (EMSD. 2007):

- Cuando el cliente solicita un llenado de un tanque de almacenamiento de GLP desacoplado de un vehículo, el operador debe solicitar al primero un certificado valido de revalidación, cumpla con las pruebas y revisiones satisfactoriamente de acuerdo a las regulaciones de seguridad del gas.
- El operario de estación debe registrar con detalle el llenado del contenedor, así como el nombre del taller y el personal competente para futuras referencias.

- El operador debe realizar la inspección de las condiciones del tanque de almacenamiento desacoplado y sus soportes antes de realizar el servicio.
- El operador de estación no debe llenar el contenedor más allá del 80% del volumen total del mismo.

Operación del camión cisterna

- Para la descarga del GLP de los camiones cisterna deben estar presentes como mínimo dos operarios (regulación 39 de seguridad del gas). En la cual uno de ellos puede ser el conductor del camión.
- Las personas encargadas de la descarga del combustible deben estar adecuadamente entrenados en primeros auxilios, seguridad contra incendios, sistemas de suministro de la estación de servicio y responder a emergencias que ocurran.
- Las personas encargadas de la descarga del combustible deben usar ropa de protección adecuada, para evitar el congelamiento cuando el GLP toca la piel desprotegida.
- El reporte en cada operación debe ser obligatorio, con el fin de mantener presente los accidentes de derrame del GLP, fallas en los equipos o lesiones del personal durante la operación de descarga.

Las siguientes precauciones deben ser medidas y observadas durante cada operación de descarga del combustible (EMSD. 2007):

- La descarga de combustible de varios camiones cisterna de GLP y gasolina no es permitida.
- El conductor del camión cisterna debe posicionar el camión cisterna en las áreas específicas para el mismo, así en caso de emergencia, el conductor puede dirigir el vehículo a la salida de emergencia más cercana.
- En cada operación de descarga o de permanencia en la estación de servicio de GLP, el camión cisterna debe tener activado el freno de mano.

- El personal de la estación de servicio y el conductor del camión cisterna deben inspeccionar elementos peligrosos o fuentes de ignición ante cada operación de descarga del combustible.
- Para prevenir la ignición de fuego por electricidad estática, los camiones cisterna deben conectarse a el sistema de descarga en tierra.
- El motor del camión cisterna puede estar encendido si es necesario durante la operación de llenado. No obstante, solo es permitido después de que el equipo necesario para la descarga del combustible se encuentre acoplado apropiadamente.
- El conductor debe mantenerse atento durante la operación de descarga de combustible y realizar inspecciones a cada componente si es necesario.
- La capacidad de almacenamiento del tanque debe ser continuamente monitoreada durante la operación de descarga. El tanque no debe llenarse más allá del 85% del volumen de capacidad máximo.
- En estaciones de servicio con múltiples tanques de almacenamiento, se debe garantizar el llenado independiente de cada uno de los tanques.
- Los elementos de seguridad para extinguir el fuego, se deben encontrar en posiciones accesibles, en caso de cual emergencia (regulación 38 (1) (b) de seguridad del gas).

Procedimientos de emergencia

Las estaciones de servicio de GLP deben formular planes de emergencia, en la cual, el personal operativo debe conocerla bien. Este plan, debe contener las instrucciones de apagado de emergencia de las instalaciones, precauciones al cliente y otras personas que puedan estar circundando las instalaciones. Además, debe poseer los equipos de emergencia en vigencia y comunicación continua con el personal de la instalación (EMSD. 2007).

Bajo condiciones de seguridad, se deben tomar en cuenta las siguientes medidas para la prevención de escalamiento de cualquier situación (EMSD. 2007):

- El apagado del sistema de suministro de GLP debe poder realizarse mediante los botones de “apagado” remoto.
- El corte de la fuente principal de electricidad de la instalación.
- Eliminar o extinguir todas las fuentes de ignición.
- Activar el sistema de rociadores de agua (en caso de que no se activen automáticamente).
- Advertir a los clientes de apagar y de no encender los vehículos.
- Informar la compañía de suministro de gas vía telefónica al número de emergencia.

5. Estándar de especificaciones del GLP en caso colombiano

Antes de empezar la discusión sobre el tipo de estándar de especificaciones del GLP como combustible vehicular, es importante enunciar las refinerías, plantas y cifras que contribuyen a la cadena de producción en Colombia.

5.1 Contexto histórico nacional del GLP

La producción de GLP en Colombia empezó cerca de los años treinta con la existencia de un mercado de compradores, en el cual ECOPETROL manejaba la producción del hidrocarburo. Este tipo de mercado estaba basado en un monopolio y esencialmente se distribuía el combustible por contratos entre las empresas y ECOPETROL. En ese entonces, la poca producción del hidrocarburo estaba distribuida entre las refinerías de Barrancabermeja y Tibú en el norte de Santander, en donde éste era transportado por cilindros hasta los años cincuenta, época en que empezaron las construcciones de los primeros poliductos y propanoductos en el territorio colombiano. Al paso de los años con la llegada de la década de los sesentas, la producción y demanda del GLP y gas natural se disparó, gracias a la creación de empresas distribuidoras a causa de ofertas deficitarias y monopolio de estos hidrocarburos por parte de ECOPETROL y a la terminación de los poliductos. En ese entonces, el ministerio de minas y energía en su labor de regular el mercado del GLP, estableció un sistema de cupos por el cual se le asignaba a cada distribuidor un volumen mensual y una zona exclusiva para su distribución. Ya en el año 1994, se creó la ley 142 en la cual se elimina el sistema de cupos y establece un mercado nacional mayorista para propiciar la venta y producción de estos hidrocarburos con alta demanda tanto para fines domésticos como industrial (Rubio., 2013 & Unidad de planeación minero energética., 2013).

Actualmente la refinería de Barrancabermeja es la principal fuente de abastecimiento de GLP para el mercado nacional con participaciones que han variado entre el 80 y el 90% a través de los años, produciendo el producto a través de la ruptura catalítica del petróleo. A su vez la refinería de Cartagena juega un papel primordial en el abastecimiento de este energético, debido a su ubicación estratégica que le permite manejar los volúmenes de importación y a su vez flexibilizar el manejo de la producción dependiendo de las necesidades operativas o demanda nacional, funcionando como unidad de apoyo debido a momentos en el año de restricciones operativas o tope de operación en la refinería de Barrancabermeja; por lo tanto su producción varió de entre 5 – 9% durante los últimos 10 años. Por otro lado, en el municipio de Apiay existe otra refinería de donde se obtiene el GLP a partir del procesamiento de separación del gas natural, contando con un promedio de producción de 4,5% durante los últimos 10 años (Unidad de planeación minero energética. 2005). De manera general, Colombia cuenta con un promedio de producción de GLP de entre 19000 - 20000 BPD y las distintas fuentes de suministro se pueden visualizar en la Tabla 5-1 (UPME. 2013).

Año	Ecopetrol					Canacol	Interoil	Vetra	Perenco	Petrominerales	Termoyopal	Otros	Total
	Barranca	Cartagena	Apiay	Cusiana I	Dina	R. Hermoso	Toquí T.	La Punta	La Gloria	Corcel	Pauto-Flor.	Productores	Producción
	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	%	BPD
2002	19.906	3.552	1.201									0%	24.660
2003	19.271	2.587	1.071									0%	22.929
2004	18.293	2.589	983									0%	21.864
2005	18.329	2.586	969			39						0%	21.923
2006	18.718	2.750	893			184	12					1%	22.558
2007	18.623	2.898	628			207	14	4				1%	22.374
2008	17.043	3.209	667			91	11	36				1%	21.056
2009	15.363	2.697	724			110	4	116	17			1%	19.030
2010	14.154	2.734	760		190	253	4	62	21	81		2%	18.261
2011	13.031	3.437	755	264	305	161	23	168	42	279		4%	18.464
2012	11.438	2.166	723	4.008	340	100	39	8	42	245		2%	19.110
2013	9.983	3.112	705	4.420	264	75	38	18	16	83	881	6%	19.597

Tabla 5-1. Producción de GLP por fuentes de suministro (Unidad de planeación minero energética. 2013).

La composición química del GLP obtenido en Colombia a través de equipos de procesos de separación de los líquidos del gas natural, se muestra en la **Tabla 5-2** de la planta de Gas Licuado de petróleo en Cusiana. Este complejo se ubica en el departamento del Casanare cerca del yacimiento de petróleo volátil Cusiana y pertenece a la compañía Ecopetrol, con una producción diaria de gas natural y GLP de 270000 pies³ y 6800 barriles (2400 barriles más que en el año anterior) diarios respectivamente; siendo este último con un alto contenido de propano. La planta como tal, abastece aproximadamente el 30% de la demanda domiciliaria nacional actual en los mercados del centro y oriente del país, y, además, esta fue diseñada con el propósito de reducir las importaciones del combustible en el país (Leal., 2014). Por otro lado, el GLP obtenido en Colombia a través de rompimiento catalítico del petróleo y posterior alquilación de las olefinas, se muestra en la **Tabla 5-3**. La refinería de Barrancabermeja produce 10000 barriles diarios con una baja composición de componentes livianos y un contenido de alquenos superior al 40% molar (Guzmán., 2006). No obstante, la refinería hasta el año 2013 se caracterizó por proveer un GLP con alto contenido de butano con una composición superior al 80% en peso (incluyendo olefinas) y 49% en contenido de olefinas. Como dato adicional, la planta abastece aproximadamente el 42.5% de la demanda domiciliaria nacional actual en los mercados del centro, occidente y parte del norte del país (UPME., 2013).

	GLP líquido			GLP gaseoso	
	Componente	% Mol	% Peso	% Mol	% Peso
CO2	Dióxido de carbono	0.01	0.01	0.00	0.00
N2	Nitrógeno	0.01	0.00	0.01	0.01
C1	Metano	0.00	0.00	0.00	0.00
C2	Etano	0.39	0.23	1.00	0.62
C3	Propano	49.84	43.05	65.39	59.23
IC4	i-Butano	22.71	25.86	17.44	20.82
NC4	n-Butano	26.92	30.68	16.12	19.26
IC5	i-Pentano	0.11	0.16	0.04	0.06
NC5	n-Pentano	0.00	0.01	0.00	0.00
C6	Hexano	0.00	0.00	0.00	0.00
C7	Heptano	0.00	0.00	0.00	0.00
C8	Octano	0.00	0.00	0.00	0.00
C9	Nonano	0.00	0.00	0.00	0.00
C10	Decano	0.00	0.00	0.00	0.00
C11	Undecano	0.00	0.00	0.00	0.00
C12+	Dodecano plus	0.00	0.00	0.00	0.00
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Nota: 0.00 significa menos que 0.005

*Condiciones de muestreo de GLP líquido 50.0 psig @ 65.8 °F

Tabla 5-2. Cromatografía del GLP de campo Cusiana (Leal., 2014).

Componente	% Mol
Etano	0.68
Etileno	0.09
Propano	15.94
Propileno	18.07
Iso-Butano	19.19
n-Butano	16.92
1, Buteno	6.41
Iso-Buteno	8.14
Trans-2-Buteno	7.93
Cis-2-Buteno	5.44
1,3 Butadieno	0.26
Pentanos y pesados	0.93

Tabla 5-3. Cromatografía del GLP producido en Barrancabermeja (Guzmán., 2006).

Tomando como esquema general, la calidad del GLP colombiano de acuerdo a los datos obtenidos más recientes de UNAL., (2014), en relación a la composición y propiedades del GLP en las diferentes refinerías del país, se encontró un análisis poco completo de las especificaciones del combustible, tal como se puede ver en la **Tabla 5-4**. Lo anterior, no ayuda mucho en la estandarización de un combustible para uso vehicular. No obstante, se debe apreciar que los datos incluyen los valores de capacidad calórica y composiciones porcentuales generales del GLP obtenidos de las diferentes refinerías.

Año	Barrancabermeja		Apiay		Cusiana		Cartagena	
	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/cm ³)	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

Tabla 5-4. Calidad del GLP en Colombia entre el año 2011-2012 (UNAL., 2014).

Desde la década del cincuenta, el transporte del hidrocarburo se ha dado por propanoductos o poliductos desde las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja hasta los centros de almacenamiento y de ahí se han movilizad en carro tanques hacia las plantas de almacenamiento y/o envasado para luego comercializarse en el territorio nacional. La red de transporte existente, propiedad de ECOPETROL, cuenta con una extensión aproximada de 865 kilómetros (**Figura 5-1**) y fue construida en la década de los 70. Donde existen líneas dedicadas exclusivamente para el producto entre la refinería de Barrancabermeja y puerto salgar con una longitud cercana a los 245 kilómetros y una capacidad de 20000 barriles por día, por otro lado, existe otra línea entre Salgar-Bogotá, con 106 kilómetros y capacidad para transportar 12000 barriles por día. Mientras que, entre Facatativá y Mosquera se extiende un propano ducto de 27 kilómetros de 6 pulgadas de diámetro. Atendiendo fundamentalmente la demanda del centro del país, mientras que el abastecimiento para la región de Antioquia se realiza desde Sebastopol o desde el Terminal de Puerto Salgar (UPME., 2005).

El otro sistema de transporte está conformado por la red de poliductos dentro de los cuales se cuenta el poliducto Salgar-Cartago-Yumbo (Odeca), cuya longitud es de 358 kilómetros con diámetros entre 6 y 8 pulgadas y capacidad de transporte de 14.000 barriles diarios y cuenta con un anillo que cubre la ruta Sebastopol-Medellín-Cartago-Yumbo. GEI poliducto Galán- Bucaramanga, con 95 kilómetros y 4, 6 y 10 pulgadas de diámetro, tiene una capacidad máxima de 16.000 barriles diarios y permite una operación flexible en cuanto al tiempo de entrega del producto con menos exigencias de almacenamiento de GLP de reserva. Adicionalmente, el país cuenta con una red fluvial entre Barranca y Cartagena para el transporte de GLP hacia el interior del país, que en condiciones óptimas de navegabilidad del río Magdalena permite transportar hasta 40.000 barriles mensuales. Las refinерías de Cartagena y Apiay entregan el producto directamente al Terminal, en donde se encuentran concentradas las empresas comercializadoras mayoristas de GLP encargadas de abastecer la zona y poblaciones vecinas a través de los distribuidores minoristas, cuya capacidad de transporte en modo terrestre varía ampliamente dependiendo de la ubicación geográfica y cercanía a las plantas de almacenamiento. A lo largo de la red de transporte por ducto, ECOPETROL dispone de once terminales de entrega del GLP para su distribución por todo el territorio nacional (UPME., 2005).



Figura 5-1. Infraestructura de transporte del GLP (UPME., 2005).

Teniendo en cuenta que los actuales estándares de emisión son más drásticos en los últimos años, se hace necesario un combustible como el GLP que logre reducir el impacto negativo, y que a su vez logre una relación de mezcla de GLP/potencia mejorada que aumente las prestaciones actuales de los motores de combustión interna. En los últimos 5 años, se ha hablado de la implementación de este combustible para su uso automotor en nuestro país, debido a la baja contaminación producida durante el proceso de combustión y su excelente desempeño comparado con combustibles convencionales. Sin embargo, el mayor obstáculo para su inicio en los vehículos, es debido al espacio y el peso que ocupan los tanques de reserva que contienen el GLP y la baja disponibilidad de estaciones de servicio con la capacidad de suministrar el combustible. A final de cuentas, el GLP puede ser implementado en soluciones automotrices mediante el ajuste de parámetros del motor y nuevos accesorios que permitan obtener un alto rendimiento y eficiencia en el ciclo termodinámico del motor. De esta manera sería posible disminuir el consumo de combustibles como la gasolina y el diésel, además de la reducción de emisiones de dióxido de carbono y de hidrocarburos sin quemar hasta en un 40% al ambiente (Snelgrove et al., 1996).

5.2 Estándar de especificaciones de calidad del GLP para uso automotor en Colombia

De la anterior comparación entre la normativa colombiana actual e internacional, es posible definir un estándar de calidad vehicular colombiano basado en parámetros críticos y no críticos propuestos por ALPGA., (2000) en la definición del estándar del GLP vehicular australiano, tal como se muestra en la **Tabla 5-5**.

Parámetros críticos	Parámetros no críticos
Numero de mínimo de octanaje de motor (MON)	Corrosión al cobre
Presión de vapor	Contenido de agua
Limites residuales	Solución odorante
Limites en el contenido de azufre	Contenido de sulfuro de hidrogeno
	Contenido de metanol

Tabla 5-5. Parámetros críticos y no críticos para la definición de la calidad del GLP vehicular.

- Número mínimo de octanaje de motor (MON)

La nueva generación de sistemas de alimentación del GLP en vehículos no permite la caída de temperatura cuando el combustible se mezcla con el aire (tal como si ocurre con la gasolina cuando es inyectada y evaporada), dado a que esto puede ocasionar una pronta detonación en los pistones. De lo anterior, esto quizás sea menos significativo en las regiones frías del país, debido a que no se experimentan altas temperaturas en el ambiente durante el transcurso del año, tal como si puede pasar en las regiones más cálidas, lo cual permitiría una reducción del MOM (Federal Office of Road Safety., 1997).

La actual especificación NTC 2303-1:2007, se ajusta a un número mínimo de octanaje de motor de 95.0. Este valor en la actualidad, puede repercutir en problemáticas en el proceso de refinación, debido a la necesidad de refinar aún más el GLP con alto contenido de olefinas producido por “crackeo” catalítico, a causa de que estos ocasionan una reducción del MON significativamente, dejando al estándar actual con un valor sobreestimado.

Efecto de emisiones

En relación con las emisiones urbanas, existen dos factores las cuales impactan en la formación del smog. El primero, es que las olefinas típicamente producen más óxidos de nitrógeno (NOx) durante la combustión que las parafinas, y, por lo tanto, un aumento en la proporción de olefinas en la mezcla es generalmente asociado con una alta producción de NOx, tal como lo menciona ALPGA., (2000). Lo segundo, es que las olefinas no quemadas emitidas por el tubo de escape del vehículo son más reactivos con los NOx, ocasionando la generación de smog en comparación de las parafinas no quemadas. Por lo tanto, al limitar el contenido de olefinas ajustando un mínimo MON impacta directamente en las emisiones urbanas.

En relación con las emisiones de efecto invernadero el ajuste del mínimo MON impacta indirectamente a estas. Esto ocurre debido a que las parafinas poseen una alta relación de hidrocarburos saturados con respecto a las olefinas, por lo tanto, cuando es quemado se produce relativamente poco contenido de CO₂ y mayor cantidad de agua con la misma energía de salida ALPGA., (2000).

Restricción en el contenido de olefinas en el GLP

Las olefinas son compuestos químicos oxidativos y térmicamente inestables, pudiendo ocasionar la formación de gomas y depósitos en los inyectores del motor del vehículo, que pueden incrementar significativamente las emisiones de CO, HC (hidrocarburos) y NOx hacia la atmosfera. Estudios en EEUU revelan que un 5% en volumen máximo de propilenos puede garantizar un aumento entre 2 – 3 en el índice de octanaje, y que por lo tanto se ajusta un mínimo de octanaje de 95, en comparación con la normativa europea, en donde el índice máximo permitido es de 89.0 con un máximo de 55% de relación de propilenos/propano (Environment Australia., 2000).

Estudios recientes, han revelado que los GLP con alto contenido de olefinas (30% en volumen) rinden de manera similar y levemente peor que la gasolina (AEGPL., 2000). No obstante, el mercado actual de GLP en Colombia maneja variaciones importantes en el contenido de estas (0-49% en volumen) (UPME., 2013), pero, por otro lado, el límite de

las olefinas debe ser impuesto para evitar serias complicaciones de funcionamiento y emisiones ambientales en los vehículos.

En conclusión, un mínimo valor de MON para establecer en Colombia puede ser de 92.0, con el propósito de permitir una buena flexibilidad en el contenido de hidrocarburos, sin repercutir en el rendimiento y bienestar del motor, calculando el MOM de una mezcla de GLP con una correlación lineal que propone la norma europea EN 589:2000 en la Tabla 3-5. Con respecto al contenido de olefinas, estas pueden ser ajustadas a un valor máximo de 10% en volumen de propilenos y 2% en volumen de butilenos respectivamente, tal como lo propone la normativa de california para el control de emisiones ambientales. Un ejemplo de la medición del MON utilizando la correlación europea EN 589:2000, en conjunto con la australiana se puede observar en la Figura 5-2, dando una idea de las posibles composiciones a tomar en cuenta para su uso vehicular en Colombia.

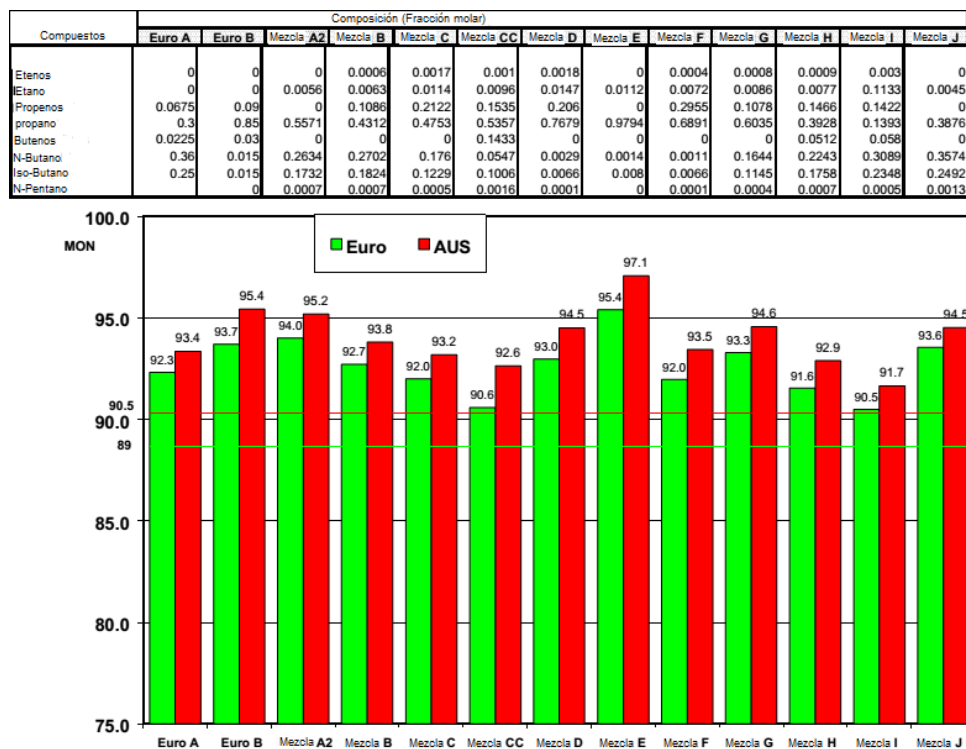


Figura 5-2. Cálculos del MOM a distintas mezclas de GLP utilizando norma europea EN 589 (Watson, H.C., Fowdie, R.R., 2000).

- Presión de vapor

La presión de vapor se encuentra indirectamente relacionado con las condiciones de cambio climático, debido a la necesidad de encontrar una relación de C3:C4 apropiada para uso vehicular, tal como lo muestra la Figura 5-3. Por lo cual, la normativa colombiana presenta un máximo de 1430 kPa a 40 °C, en donde otras normativas como la australiana presenta un mínimo de 800 kPa y un máximo de 1550 kPa. Por otro lado,

la normativa europea presenta un mínimo de presión de vapor de 150 kPa a distintas temperaturas bajas, sin especificar las composiciones de los combustibles que denominan con grado A, B, C y D (NEN., 2000).

Aunque existen diferencias remarcables en las normativas europea y americana (Muy similar a la colombiana), ambas normativas adoptan un control sobre el contenido de C4, restringiendo de manera sistemática la presión de vapor permitida en los contenedores comerciales. No obstante, la normativa americana establece una composición máxima de 5% en volumen de butano, en cambio la europea adjudica una composición de butano entre 20 – 100%.

Impacto en el rendimiento del motor

En términos de la operatividad del vehículo, el límite de la presión de vapor es especificado para controlar la capacidad de arranque y variación de la presión; la cual en casos específicos puede conducir a problemas para el suministro del combustible durante el cambio de combustibles con altas presiones de vapor con respecto a uno de baja presión. En general, es equivocado pensar que un GLP con muy alta presión de vapor (>700 kPa es mejor que uno de baja presión (<700 kPa), ya que un GLP con un mayor contenido de butano puede proveer de un mejor control del consumo del combustible aumentando la autonomía del vehículo e incluso evitando problemas en el llenado en regiones calientes de Colombia. Este último problema ocurre a causa de la diferencia de presión excesivamente grande que existe entre el dispensador de GLP y el contenedor en el vehículo. Siendo típico, durante el llenado del vehículo con alguna mezcla de GLP cuando previamente el vehículo se ha llenado con propano puro. Como ejemplo, se tiene el contenedor de GLP de un vehículo con un combustible de 100% de propano a 50 °C, este requiere de un dispensador que desarrolle un exceso de 1300 kPa para poder llenar el vehículo con una mezcla de GLP de 70% de butano a 30 °C, lo cual este tipo de operación es costosa energéticamente para el proveedor y a la larga poco rentable (AEGPL., 2000).

De lo anterior, la reducción del contenido de C4 en el mercado de GLP puede ayudar en la reducción de la problemática de suministro en los vehículos en las regiones calientes del país (Pero no resolver el problema del todo). No obstante, al reducir el contenido de C4, puede incurrir en un exceso indeseable en el mercado de butano, dejándolo como opción para ser quemado en chimeneas. Siendo esto inaceptable en un mercado colombiano que debe aprovechar todos sus recursos naturales para generar mercados. Por lo que para implementar un GLP con un contenido de C4 aceptable en el mercado, se debe imponer una restricción de encendido en las especificaciones de la presión de vapor a una temperatura de -2 °C o inferior para garantizar que regiones frías del país no posean problemas de rendimiento en sus vehículos. De lo anterior, varios proveedores del combustible concluyen que una relación C3:C4 de 50:50 (por peso) contribuye a un

buen índice de emisiones y presión de vapor comparado con el petróleo, he incluso insinuando que el aprovechamiento en la economía de acuerdo a esta mezcla del GLP no disminuiría tan rápido las reservas de uno de los hidrocarburos a largo plazo (AEGPL., 2000).

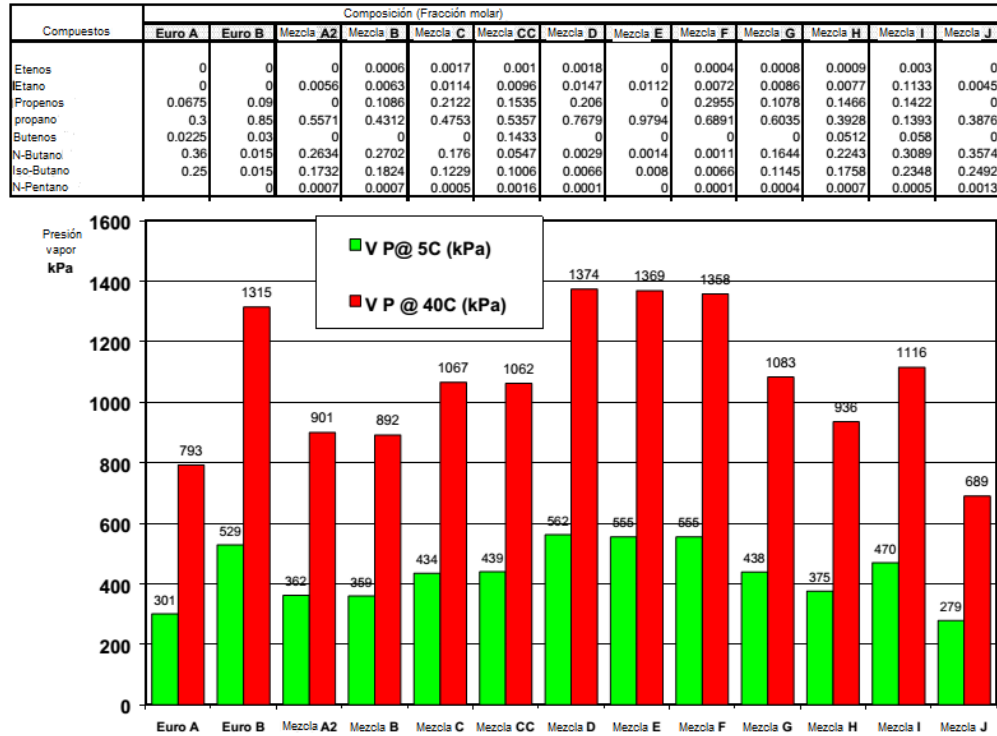


Figura 5-3. Presiones de vapor a distintas mezclas de GLP (Watson, H.C., Fowdie, R.R., 2000).

Efecto en las emisiones

Estudios de emisiones realizados en Australia por Environment Australia., (2001) con distintas mezclas de GLP (100:0, 70:30, 50:50 y 40:60 de propano: butano) en dos vehículos (V6 Holden Commodore y V8 Ford Fairlane) cada uno con diferentes kits de conversión para usar el combustible, demostraron que la mejor relación hidrocarburos de C3:C4 es la de 50:50. Con reducciones de CO₂ cercanas al 10 – 16% con respecto a las otras mezclas, incluso comparada con la gasolina regular. Indicando que, de acuerdo al aumento del contenido de butano del combustible, se incrementa levemente la emisión de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) de los vehículos, mientras que la emisión de óxidos nitrosos disminuye significativamente. Sin embargo, un estudio más reciente realizado por SAE International., (1999) en EEUU, la cual examino las emisiones del tubo de escape de los vehículos mediante el uso de mezclas de butano: propano (HD5 (95% de propano), 20:80, 30:70, 50:50), encontró contradicciones con respecto al estudio de emisiones anterior para el total de hidrocarburos, CO y NO_x emitidos, ya que falla en los valores indicados entre las diferentes mezclas. Dado a que las diferencias entre el potencial de formación de ozono (OFP) no es estadísticamente significativo. No,

obstante, la emisión por contenido de butadienos incrementa notablemente con el aumento del contenido de butano, mientras que las emisiones de compuesto tóxicos se reducen notablemente.

En conclusión, aunque se conoce que el incremento del contenido de C4 aumenta las emisiones de CO, y disminuye las emisiones de NOx. Es difícil reconciliar un límite para el contenido del mismo en el mercado del GLP vehicular basado en el total de las emisiones. Por lo tanto, el autor de esta tesis considera una presión de vapor mínima y máxima a 40 °C de 800 y 1430 kPa respectivamente, y presión de vapor mínima de 150 kPa a 5 °C (muy similar a la normativa europea), siendo límites adecuados desde los puntos de vista económico, rendimiento y de emisiones en los vehículos mencionadas anteriormente.

- **Limites residuales**

El estándar actual de la norma ICONTEC., (1998) que controla el contenido de residuos es de vital importancia, dado a que estos pueden ocasionar serios problemas en los reguladores y vaporizadores del kit de conversión a GLP. Pudiendo ocasionar el apagado del vehículo y en casos extremos, pequeños incendios de estos materiales. El impacto de los residuos según la European IFP test programmes indican que la evaporación de estos residuos no tiene influencia en las emisiones. No obstante, estudios europeos en la cantidad y calidad de estos residuos evaporados demostraron que estos pueden afectar el rendimiento de los vehículos con GLP (AEGPL., 2000).

En la actualidad la norma colombiana contempla límites en la evaporación de 100 ml del combustible, siendo permitido o aceptado siempre que del procedimiento se obtengan 0.05 ml o menos del producto, pero, por otro lado, no contempla la composición total de Dienos como la normativa europea EN 589. Desde este punto, debe ser notado que este tópico es un parámetro de rendimiento para la capacidad de arranque de los vehículos, siendo un factor limitante para la composición de hidrocarburos más pesados que el butano (C5s).

Residuos volátiles

El límite de residuos volátiles de hidrocarburos pesados (C5+) en el GLP, es importante dado que en cierta forma controla la cantidad de hidrocarburos hacia los inyectores, y por lo tanto, la capacidad de arranque de los vehículos en condiciones frías. No obstante, la norma colombiana se ajusta perfectamente a esta problemática, ya que otras soluciones como la normativa australiana incluyen un límite de 2.0% molar máximo, pero no se tiene una idea clara de cómo juega en el papel la mezcla completa como tal durante la operación en el vehículo (AEGPL., 2000). En conclusión, la normativa de residuos volátiles actual colombiana debe seguir siendo usada.

Dienos

El estándar australiano de la ALPGA indica un límite de 0.3% molar máximo, mientras que la europea establece un límite de 0.5% molar máximo de estos compuestos para reducir los problemas de bloqueos por residuos de butadienos en reguladores y vaporizadores. La adopción de este límite en la norma colombiana es importante dado en que, en conjunto con el procedimiento de evaporación actual, complementaria la elaboración de combustible más limpio (AEGPL., 2000). En conclusión, la norma colombiana debe ser actualizada con el límite europeo de Dienos por 0.5% molar máximo.

- Límites en el contenido de azufre

Aunque el límite del contenido de sulfuros es un parámetro importante para la eficiente función de la tecnología del vehículo, es necesario notar que el GLP es uno de los combustibles con más bajo contenido de estos que cualquier otro producto derivado del petróleo. Como tal, el límite es interpuesto para minimizar las emisiones y corrosión de los gases del tubo de escape. En Australia y Europa el límite es ajustado una vez se haya añadido la solución odorante (Etil-mercaptano) reglamentaría. En donde la normativa europea (Norma EN 589:2000) establece un máximo de 50 ppm en peso, la australiana de 100 ppm y la colombiana de 123 ppm (AEGPL., 2000).

En conclusión, en la búsqueda de un combustible con bajo contenido de sulfuros se debe establecer un límite de estos en 100 ppm tal como la normativa australiana. Esto con el propósito de no ser estrictos como la norma europea, pero si considerando emisiones más limpias de los tubos de escape.

- Corrosión de cobre

La normativa colombiana actual comparte la misma medición de corrosión del cobre de la americana y europea. La cual argumenta que no debe experimentarse deterioro del cobre de las tuberías, conexiones y contenedor del vehículo. El límite incluso asegura de que el GLP no contenga H₂S en tales cantidades que presente problemas en la salud de las personas y seguridad del vehículo. En conclusión, el límite de “clase 1” para la corrosión del cobre se debe seguir utilizando.

- Contenido de agua

La normativa colombiana actual especifica un GLP libre de contenido de agua bajo inspección visual a 0°C, al igual que la normativa americana ASTM D2713-91 y europea EN 589:2000. El propósito de controlar el contenido de agua es para asegurarse de que

los reguladores o equipos similares operen de manera consistente y sin problemas de congelamiento por agua. En conclusión, se debe verificar el contenido de humedad y agua libre mediante la norma actual ASTM D2713-91.

- Solución odorante

La norma colombiana ICONTEC., (1998), no establece directamente (marca reglamentación nacional) un límite en la inflamabilidad en las soluciones odorantes, detectable a concentraciones en el aire, mientras que la normativa australiana y europea EN 589 lo establece en un límite de inflamabilidad menor a 20%. Esto es necesario con propósitos de seguridad, la cual puede asegurar un nivel de odorización lo suficientemente alto para detectar fugas en lugares confinados (Ejemplo: parqueaderos subterráneos) (AEGPL., 2000). En conclusión, la norma colombiana del GLP debe adoptar el límite de inflamabilidad menor a 20% en las mezclas suministradas en los vehículos.

- Sulfuro de hidrogeno H₂S

El sulfuro de hidrogeno es un contaminante natural del GLP proveniente del gas extraído de pozos. Actualmente, la normativa colombiana toma el procedimiento ASTM D2420 para asegurarse de que el GLP no contenga trazas, pudiendo examinarse de igual manera con el parámetro limitante de corrosión del cobre. No obstante, muchas normativas establecen necesaria la especificación del límite para este compuesto con propósitos de seguridad y salud de las personas (AEGPL., 2000). En conclusión, se mantiene el mismo procedimiento de la norma colombiana para medir este compuesto.

- Metanol

Bajo las condiciones frías de varias regiones colombianas, los hidrocarburos pueden asociarse con el agua y hielo, pudiéndose generar un bloqueo en el regulador y vaporizador del vehículo. En Europa, la normativa exige que los vehículos deben usar metanol hasta un límite de 2000 ppm a cusa de la problemática anterior, dado a que este disminuye el punto de rocío del agua en la mezcla del GLP (AEGPL., 2000).

Este punto es importante, debido a que los equipos de suministro del combustible de GLP en el vehículo con el tiempo tienden a tener fugas apreciables que permitan la entrada de humedad a estos. En conclusión, en regiones frías colombianas debe añadirse metanol con un factor limitante de 2000 ppm, tal como lo establece la norma EN 589 (ALPGA., 1998).

A continuación, en la **Tabla 5-6**, se presenta un resumen de una recomendación de estándar técnico de calidad para el GLP de uso vehicular en Colombia que recopila todas las consideraciones normativas y efectos estudiados durante la realización de este trabajo.

▪ Resumen de recomendación de normativa del GLP vehicular para Colombia

		Gas Licuado de Petróleo Vehicular (GLPV)	Métodos de pruebas internacionales	Métodos de pruebas Colombia
Presión de vapor manométricos a 100 °F (37.8 °C)	Max	208 psig (1434 kPa) ^A	ASTM D1267-02 o ASTM D2598-02 ^B	NTC 2562:1989 o ASTM D2598-02
	Min	116 psig (800 kPa)		
Presión de vapor manométricos a 41 °F (5.0 °C)	Min	21,7 psig (150 kPa)	ASTM D1267-02 o ASTM D2598-02	NTC 2562:1989 o ASTM D2598-02
Residuos volátiles	Temperatura de evaporación, 95% máximo	36 °F (2.2 °C)	ASTM D1837-02A	NTC 2563:1989
	Volumen de propenos, vol max %	10.0	ASTM D2163-91	NTC 2518:1997
	Volumen de butilenos, vol max %	2.0	ASTM D2163-91	NTC 2518:1997
	Volumen de dienos, vol max %	0.5	ASTM D2163-91	NTC 2518:1997
	Volumen de pentano y elementos pesados, vol max %	2.0	ASTM D2163-91	NTC 2518:1997
Residuos Materiales	Residuo durante evaporación 100ml, max, ml	0.05	ASTM D2158-91	NTC 2517:1986
	Observación mancha de aceite	Aprobado ^C	ASTM D2158-91	NTC 2517:1986
Numero de octano, Min		92.0	EN 27941:2003 o ASTM D2598-02	EN 27941:2003 o ASTM D2598-02
Corrosión a la lámina de cobre		No. 1	ASTM D1838-64 ^D	ASTM D2515-66 ^D
Solución odorante (L.I.I)		20%	--	--
Concentración de azufre, ppm (masa)		100.0 ^E	ASTM D2784-98	ASTM D2784-98
Concentración de metanol, ppm (masa)		2000.0	--	--
Sulfuro de hidrogeno		Aprobado	ASTM D2420-91	ASTM D2420-91
Contenido de humedad		Aprobado	ASTM D2713-86	ASTM D2420-91
Libre de contenido de agua		Ninguna ^F	--	--
Densidad relativa a 60 °F		<i>G</i>	D1657-94 o D2598-02	NTC2517:1986 o ASTM D2598-02

A: Presión de vapor del producto permisible como mezcla comercial sin exceder los 208 psig (1430 kPa) y adicionalmente no debe exceder la siguiente relación: Presión de vapor, max= 1167 – 1880 (densidad relativa a 60 °F).

B: En caso de disputas acerca de la presión de vapor del producto, el valor actual determinado por el método de prueba D1267 debería prevalecer sobre el valor hallado del método de prueba D2598.

C: Un producto aceptable no debería mostrar una mancha persistente de aceite cuando una solución de 0.3 ml en un papel filtro con incrementos de 0.1 ml y examinando cada 2 minutos como se describe en el método de prueba D2158.

D: Este método de prueba no es preciso para determinar presencia de compuestos reactivos (H_2S y S) si el GLP posee agentes inhibidores u otros químicos durante la prueba de la lámina de cobre.

E: El límite total de sulfuros en estas especificaciones debe incluir los compuestos fétidos adicionales según ley.

F: La presencia o ausencia de agua debe ser determinada por inspección visual en las muestras.

G: Aunque no es un requerimiento específico, la densidad relativa debe ser determinada y reportada. Adicionalmente, la densidad relativa de la mezcla de uso vehicular debe encontrarse en un rango permisible de presión de vapor.

Tabla 5-6. Nueva reglamentación del gas licuado de petróleo vehicular para Colombia.

Conclusiones

El nuevo estándar técnico diseñado en este trabajo toma en cuenta las distintas recomendaciones planteadas en países americanos (ASTM D1835-97), europeas (EN 589:2000) y asiáticos (ALPGA., 2000), en la cual se argumenta la necesidad de emisiones más limpias en vehículos durante el proceso de combustión y un mayor control de calidad del combustible producido en plantas de gas y refinerías. Por lo tanto, el estándar permite definir apropiadamente las características composicionales y pruebas técnicas que estaban definidas indirecta o parcialmente en la normativa actual colombiana para su uso vehicular.

Este nuevo estándar permite tener en cuenta las implicaciones ambientales, rendimiento y autonomía en un uso regular del vehículo en los distintos climas del país, e incluso considera comparaciones de estos parámetros con respecto a otros tipos de combustibles.

Las novedades presentes en este nuevo estándar técnico son:

- Presión de vapor mínima del GLP a 37.8 °C.
- Presión de vapor mínima del GLP a 5.0 °C.
- Mayor restricción de límite %v/v de olefinas con respecto a normativa americana.
- Número de octanaje mínimo determinado con normativa europea.
- Concentración de metanol, límite de inflamabilidad inferior.
- Concentración de butilenos y dienos.

Por otro lado, es necesario destacar algunas otras menciones aprendidas durante el desarrollo de este trabajo:

Conclusiones revisión bibliográfica

- Para propósitos generales y geográficos se sugiere el uso de un sistema de inyección de generación II o III de GLP en el motor de los vehículos del territorio colombiano, debido a que el suministro se da en fase gaseosa y permite la inyección directa del combustible en las cámaras de combustión. Además, de que es una solución mucho más económica que inyectarlo en forma líquida (sistema de inyección de generación IV).
- La implementación o conversión de los vehículos convencionales a GLP requiere adicionar elementos claves como: Tanque de GLP, vaporizador, regulador/controlador, mezclador de aire-combustible, sistema de control ECU y un botón de selección de combustible.
- Los vehículos con GLP son un 73.9%, 84.5%, 74.2% y 62,9% menos emisores de NOx, CO y HC a velocidades de 10, 30, 50 y 70 km/h respectivamente que los que usan Diesel.
- Un vehículo con GLP durante el proceso de combustión en el motor puede tener hasta un 20% de torque y potencia con respecto al mismo vehículo usando gasolina. Sin embargo, al incrementar la temperatura del combustible en un rango de 27 – 62 °C, la potencia puede llegar a disminuir en un 1.85% a causa de una disminución de la eficiencia volumétrica, pudiendo llegar a ser mayor de acuerdo a la geometría y condiciones ambientales de cada motor.
- El GLP posee aproximadamente 3.2 veces mayor autonomía vehicular (kilómetros recorridos con tanque lleno) que el gas natural vehicular en un vehículo Chevrolet Captiva y Chevrolet Spark modelos 2015. No obstante, la gasolina se mantiene en un margen discreto de 37% superior autonomía que el GLP para ambos vehículos.

Recomendaciones

- Desarrollar proyectos de investigación y desarrollo de tecnologías que mejoren la eficiencia del sistema de inyección y combustión del GLP en los vehículos. Entre las que incluye, el desarrollo de kits de conversión con sistemas de inyección de combustible independiente y dinámico en cada cilindro del motor.
- Promover mezclas de propano-butano de acuerdo a la nueva normativa de especificaciones realizada en esta tesis, teniendo en cuenta un mayor número de octanaje, mayor autonomía y menos emisiones al ambiente.
- Incentivar a la población mediante bonos de gobierno para conversión de sus vehículos hacia tecnologías de combustibles más limpios.
- Implementar la masificación de redes de distribución de GLP para uso automotor, en conjunto, de toda la reglamentación y especificaciones que esta demanda. Tal como estaciones de servicio, desarrollo de personal y tecnologías en conversión de vehículos a gasolina.
- En una etapa inicial de implementación de la tecnología del GLP vehicular en nuestro país, se debe primero incentivar en el transporte público de las ciudades principales, para la reducción del material particulado, compuestos orgánicos volátiles y emisiones de NOx.

A. Determinación de las propiedades del GLP en laboratorio

- Composición

La distribución de los componentes de los gases licuados del petróleo y de propilenos concentrados, según las normas NTC 2518-1:1999 y ASTM D2163-91, se requieren con frecuencia como un análisis de las especificaciones para la venta de estos productos. Los datos de la distribución de los componentes pueden ser usados para calcular con un alto grado de precisión, las propiedades físicas tales como su densidad, presión de vapor y número de octano motor, entre otros (véase la norma ASTM D2598-02) (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método

Los componentes en una muestra de GLP en fase gaseosa se separan físicamente por cromatografía de gases y se comparan con los componentes correspondientes separados bajo condiciones de operación idénticas, obtenidos a partir de una mezcla estándar de referencia de composición conocida. El cromatograma de la muestra se interpreta comparando las alturas o áreas de los picos, con aquellos obtenidos de la mezcla estándar de referencia (Pinzon, N., 2010).

Importancia y usos

Conocer la distribución de los componentes hidrocarburos de gas licuados del petróleo y mezclas de propano es necesario para la venta y uso de este material. Se requieren datos precisos para garantizar la composición uniforme y calidad. Algunas impurezas de hidrocarburos relaciones presentes en GLP puede tener efectos adversos en su uso y transformación (Pinzon, N., 2010).

- Presión de vapor

La determinación manométrica de la presión de vapor del GLP, según normas NTC 2562:2005 y ASTM D1267-02, se puede considerar como una medición semicuantitativa de la cantidad del material volátil presente en el combustible en condiciones de baja temperatura, en la las cuales se espera que haya una vaporización inicial o incluso, también, puede ser utilizado como una forma de predecir las presiones máximas que se pueden experimentar con las temperaturas del tanque de combustible. Esta propiedad se hace más precisa y certera cuando se le relaciona con la volatilidad (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

El equipo de ensayo, consiste en dos cámaras interconectadas y equipadas con un manómetro apropiado, al comenzar la prueba, se purga con una porción de la muestra que luego es desechada. Posteriormente, el equipo se llena completamente con la porción de la muestra que se va a ensayar. Inmediatamente se retira entre el treinta y tres (33,3 %) por ciento y cuarenta (40%) por ciento del volumen de la muestra contenida en el equipo para dejar espacio libre adecuado para la expansión del producto. Después, el equipo se sumerge en un baño de agua que se mantiene a una temperatura de treinta y ocho grados Celsius (37.8°C) (100°F) u, opcionalmente, a una temperatura superior de ensayo, máximo de setenta Celsius (70°C) (158 °F). La presión manométrica observada, en estado de equilibrio, después de la corrección para el error del manómetro y para la presión barométrica a condiciones estándar, se reporta como la presión de vapor del GLP a la temperatura de ensayo seleccionada. Luego, se invierte el aparato, agitando vigorosamente, para después, colocarlo a su posición normal y sumergirlo (incluyendo la válvula de purga de enganche) en agua manteniendo la temperatura. Durante la prueba, la temperatura del agua deberá revisarse periódicamente por medio del termómetro de la bañera. A temperaturas de ensayo de 50°C (122°F) o menos, se debe mantener el baño a $+ 0 - 0,1^{\circ}\text{C}$ (0,2°F). A temperaturas de ensayo por encima de 50°C (122°F), hasta 70°C (158°F), se mantiene el baño a $+ 0 - 0,3^{\circ}\text{C}$ (0,5°F), observando que no haya fugas en el dispositivo. Después de cinco (5) minutos, retirar el aparato de del agua, invertirlo, agitarlo con fuerza, y, a continuación, devolverlo a la bañera. Realice la operación moviendo rápidamente para evitar el enfriamiento excesivo de los aparatos y de su contenido. Posteriormente, a intervalos de no menos de 2 minutos, retirar el aparato del baño, invertir, agitar vigorosamente, y, a continuación, devolverlo a la bañera. Antes de cada salida del dispositivo del baño, toque el medidor y observe la lectura de la presión. Estas operaciones normalmente requieren de veinte a treinta (20 a 30) minutos para asegurar el equilibrio. Después de este tiempo, si las lecturas del medidor observados son constantes, se registra la lectura de presión del GLP no corregida, presión de vapor del de la muestra a la temperatura de prueba. Si se utiliza un manómetro de presión que no esté calibrado frente al probador de peso muerto, es necesario determinar una corrección para aplicar la lectura del medidor de presión. Sin quitar el manómetro de presión del sistema o de la bañera, colocar un manómetro de prueba, previamente calibrado contra un probador de peso muerto, a la salida de la válvula de purga; y abrir la válvula de purga. Al final de 5 min, comparar las lecturas de los dos calibres. Registrar cualquier corrección medida por la corrección de Gage. Alternativamente, si un calibrador de presión es usado y ha sido calibrado con un probador de peso muerto, la corrección Gage es cero (Pinzon, N., 2010).

Corrección Gage de la Presión de Vapor: Convertir la corrección de la presión de vapor.

Presión De Vapor = Lectura Del Medidor De Prueba + Corrección Gage.

Calculado a un nivel la presión barométrica de 760 mm (29.92 pulgadas) de Hg por medio de la siguiente ecuación:

Presión de Vapor del GLP

- Presión de vapor corregida, en kPa $-(760 - P1) 0,1333$. (1)
- Presión de vapor corregido, PSI $-(760 - P1) 0,0193$. (2)

Dónde:

P1= Presión Barométrica Observada, mm Hg.

- Presión de vapor de corregida, en kPa $-(29.92 - P2) 3,3864$. (3)
- Presión de vapor corregido, PSI $-(29,92 - P2) 0,4912$. (4)

Donde:

P2= Presión Barométrica Observada, in Hg.

Factores de conversión:

- $1\text{KPa}=7,50064 \text{ mmHg} = 0,295301 \text{ in Hg}$. (5)
- $1\text{psi}=51,7151 \text{ mmHg} = 2,03603 \text{ in Hg}$. (6)

Importancia y uso.

En la selección del diseño de tanques de almacenamiento, contenedores de transporte, y la utilización de equipos para garantizar el manejo seguro de estos productos. Es importante por razones de seguridad para garantizar que la presión máxima de operación de almacenamiento, manipulación, y los sistemas de combustible no se sobrepase su funcionamiento normal, condiciones de temperatura. La presión de vapor es una medida indirecta de las más extremas condiciones de baja temperatura, en que la vaporización inicial se produce. Se puede considerar una medida cuantitativa de la cantidad del presente material más volátil en el producto (Pinzon, N., 2010).

Equipo experimental: En la **Figura 5-4** se muestra el equipo para la determinación de la presión de vapor del GLP.



Figura 5-4. Equipo típico para medir la presión de vapor del GLP (Pinzon, N., 2010).

- Contenido de humedad

La prueba de contenido de humedad limita el porcentaje de saturación de agua en el producto. Esta medición es realizada en el GLP usando el método de prueba NTC 5469:2007 o ASTM D2713-91, el cual deben estar sub-saturado con agua a temperaturas superiores a menos veintiséis Celsius (-26°C). El propósito del control del contenido de humedad es asegurar que los reguladores/vaporizadores de presión y equipo similar funcionen de manera consistente, sin problemas de congelamiento causados por la separación del agua disuelta en el producto. La presencia de un agente anticongelante, tal como el alcohol de metilo que evita que el agua separada se congele, puede facilitar el uso de propano que contenga exceso de agua disuelta en muchas aplicaciones (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

Se hace fluir una muestra del producto que se va a ensayar, en fase líquida, a través de la válvula de prueba en presencia de agua disuelta en el GLP, para enfriar el cuerpo de la válvula. Después del enfriamiento, la válvula de ensayo se cierra parcialmente hasta una baja velocidad de flujo preestablecida y se registra el tiempo requerido para que la válvula se congele e interrumpa el flujo normal. El tiempo promedio observado para varios ensayos sucesivos se registra como el tiempo de congelamiento observado. El método de congelamiento de la válvula está diseñado para ser aplicado fuera del laboratorio. Si el ensayo no se puede llevar a cabo conectando el aparato directamente al suministro de GLP a granel, se puede tomar una muestra en un cilindro especial, que tenga una capacidad mínima de 11.4 litros (3 galones) (Pinzon, N., 2010).

Procedimiento

La presión de la muestra, en la entrada de la válvula de prueba, no debe ser mayor de 100 psi (690kPa) por encima de la presión de vapor del producto a la temperatura de la muestra. Cuando la muestra tiene la presión por encima de este límite, se usa la presión de gas propano líquido, como regulador para mantener la presión a la entrada de la válvula de prueba, dentro de este límite. Conectar el propano a la válvula de agua de prueba a la línea de líquido del cilindro de la muestra, de modo que el cuerpo de la válvula esté en posición horizontal y la apertura de salida se dirige verticalmente hacia arriba. La válvula se coloca de modo que la superficie interna de la apertura este claramente visible para el operador. Abra la válvula principal en el origen de la muestra y fije la válvula en el aparato de prueba en posición de purga. Purgue la línea de la muestra y el aparato durante 15 s. Cierre la válvula de prueba de 2 o 3 s, ábralo durante 2 o 3 s, cerrar durante 2 o 3 s, y continuar con esta apertura y cierre intermitente hasta que se presente una cubierta de hielo uniforme acumulada en torno a la salida de la válvula de prueba. Ajustar la válvula en posición de la prueba y al mismo tiempo iniciar el cronómetro. Parar el cronómetro en el instante en que el propano líquido deja de fluir a través de la válvula. Abra la válvula de prueba con la purga posición por cerca de 15 s para asegurar la eliminación de hielo de la apertura. Repetir las operaciones descritas en las pruebas de funcionamiento hasta que se presenten tres congelaciones sucesivas en un tiempo de 62s cada cierre. Si la congelación al cierre se presenta en tres pruebas consecutivas en un tiempo de 3min o más, la prueba del producto puede ser interrumpido y la congelación al cierre registrada de más de 3 min. Para la congelación al cierre de menos de 3 minutos, el registro del tiempo promedio de tres pruebas consecutivas en el momento de congelamiento, será el segundo entero más próximo (Pinzon, N., 2010).

Importancia y uso

Esta prueba es funcional en que el contenido de agua se relaciona con las características del comportamiento del producto en un sistema de reducción de la presión de diseño para llegar a una medida de aceptabilidad del producto en aplicaciones de uso común. La experiencia ha demostrado que el contenido excesivo de agua (agua disuelta) provocará la congelación dificultando la reducción de la presión de los sistemas.

Equipo experimental: En la **Figura 5-5** se muestra la válvula usada en la determinación de la humedad del GLP.



Figura 5-5. Válvula para indicar contenido de humedad en el GLP (Pinzon, N., 2010).

- Corrosión de la lámina de cobre

El límite en la corrosión de la lámina de cobre, tiene el propósito de asegurar que no habrá dificultades debido al deterioro de los accesorios y conexiones de cobre y de aleaciones de cobre que se utilizan comúnmente en muchos tipos de equipo de servicio, almacenamiento y transporte. El ensayo de corrosión de la lámina de cobre, según norma NTC 2515:2004 y ASTM D1838-07, detecta la presencia de sulfuro de hidrógeno que es altamente tóxico y asegura que el GLP no lo contenga en cantidades que representen un peligro para la seguridad y la salud. Además, el método de ensayo de la NTC 5470:2007 se recomienda como un ensayo de campo rápido que garantiza que el GLP no contenga cantidades detectables de sulfuro de hidrógeno (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

Una lámina pulida de cobre se sumerge en aproximadamente 100 mL de la muestra de GLP y se expone a una temperatura de 37.8 °C (100°F) por espacio de una hora en un cilindro presurizado. Al final de este periodo la lámina de cobre, es removida y comparada con una de las cuatro clasificaciones de “ASTM Copper Corrosión Standards” (Pinzon, N., 2010).

Procedimiento

Con la válvula B (**Figura 5-6**), abierta, con aproximadamente 1 ml de agua destilada en una probeta de ensayo limpia; agitar para humedecer las paredes; permitir que el resto salga del cilindro, inserte la lámina de cobre recién pulida suspendida del gancho del tubo de inmersión asegurándose de que la parte inferior de la tira es por lo menos 6,4mm (1/4pulgadas) de la parte inferior del cilindro. Después del montaje, cierre la válvula A (**Figura 5-6**), cierre del ensamble con el tubo y la válvula B. Manteniendo la posición vertical del cilindro de prueba para no mojar la lámina de cobre con agua, coloque la muestra para la prueba en el cilindro en la válvula A (**Figura 5-6**) por medio de una manguera flexible, inerte, que se ha purgado con la muestra. Admitir parte de la muestra en el cilindro abriendo la válvula a la fuente de origen de la muestra y luego la válvula A. Cierre la válvula A sin desconectar el cilindro de ensayo de la muestra. Invertir el cilindro

de ensayo y abrir la válvula B, para purgar el aire del cilindro de prueba. Regresa el cilindro de ensayo a la posición vertical y drenar cualquier líquido residual a través de la válvula B. Cierre la válvula B, con el cilindro de prueba ahora en pie, abra la válvula A y llene el cilindro de prueba con la muestra. Cuando se llene el cilindro de prueba completo, cierre la válvula de A, la válvula de en el origen de la muestra, y desconecte el tubo. Tan pronto como la manguera flexible inerte se desconecta, y con el cilindro en posición vertical, abra un poco la válvula B de modo que retire el líquido que se encuentra por encima del tubo de prueba Cuando el primer vapor emerge por la válvula Con un retraso mínimo, y tan pronto como sea posible después del llenado, y la ventilación del cilindro de prueba, sumergir el cilindro de ensayo en un baño de agua a $37,8 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{F}$). Dejar al cilindro de prueba en el baño durante 1 hora ± 5 min. Al terminar la prueba retirar el cilindro del baño, sostener la botella en posición vertical, abierto la válvula inferior a una unidad de eliminación adecuados hasta que todos los líquidos y la mayor parte del vapor salga. Cuando sólo queda una ligera presión en el cilindro, desarmar de inmediato y comparar la lámina de cobre que ha estado expuesta a los gases licuados del petróleo con la norma ASTM Corrosión la lámina de cobre ASTM. Manipular la lámina sólo con unas pinzas de acero inoxidable Sujete la tira de prueba y la norma de tal de manera que la luz reflejada llegue en un ángulo de aproximadamente 45° y observe. En el manejo de la tira de prueba durante la la inspección y la comparación, las marcas o manchas se puede evitar si se inserta en un tubo de ensayo que es tapado con un algodón absorbente. 23 El añadido de agua destilada con frecuencia causas aisladas manchas marrones en la lámina de cobre. La presencia de estas manchas debe tenerse en cuenta o la prueba debe repetirse. Si la lámina de cobre muestra cualquier decoloración apreciable, el interior del cilindro debe ser pulido con lana de acero y se lava con solvente con el fin de estar limpio para otra prueba (Pinzon, N., 2010).

Equipo experimental: En la **Figura 5-6** se muestra el cilindro de prueba usado en el ensayo de corrosión de lámina de cobre.

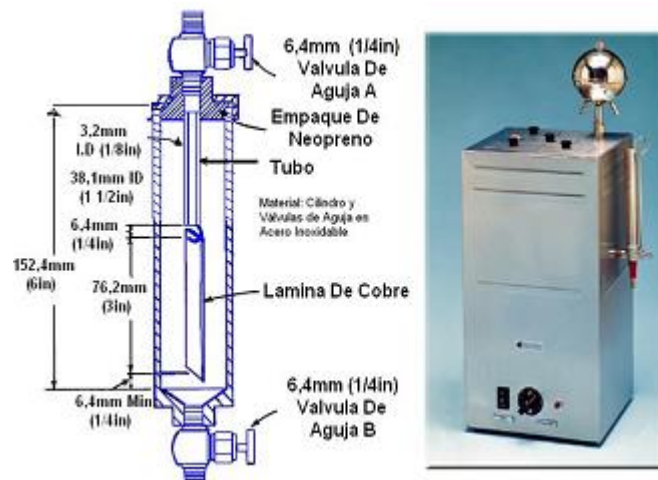


Figura 5-6. Cilindro de prueba y baño para la prueba de corrosión del cobre (Pinzon, N., 2010).

- Densidad relativa

Por sí sola esta prueba tiene poco significado. Adquiere valor únicamente cuando se relaciona con la presión de vapor y la volatilidad del GLP. Debido a que la densidad relativa es importante para cumplir los requisitos de transporte y almacenamiento, ésta siempre se determina para todos los productos de gas licuado de petróleo. Se realiza según la norma ASTM D1657 (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

El dispositivo es purgado con una porción de la muestra antes de llenarlo con la porción que se usará para la prueba. El cilindro presurizado se llena hasta un nivel en el cual el hidrómetro flota libremente, y el cilindro es luego ubicado en un baño a temperatura constante. Cuando la temperatura alcanza el equilibrio, se registra la lectura del hidrómetro y la temperatura (Pinzon, N., 2010).

Procedimiento

Conectar la fuente de suministro del líquido a ensayar a la válvula de entrada del cilindro. Cerciorarse de que las conexiones están libres de fugas. Abra la toma de corriente y válvulas de ventilación, purgar las conexiones de toma de muestras mediante la apertura ligera de la válvula de entrada, permitiendo que el producto fluya a través de la válvula de salida en la parte inferior del cilindro y la válvula de ventilación en la parte superior del cilindro. Cuando las conexiones se han purgado, abra la válvula de entrada, permitiendo el líquido entrar en el cilindro hasta que esté lleno. Si es necesario, la válvula ventilación puede abrirse un poco para permitir el llenado completo del cilindro, tras lo cual se dará por concluido. En ningún momento la presión en el cilindro se permite a elevarse por encima de un calibrador de presión de 1,4 MPa (200 psi). Cuando el cilindro se ha llenado, cierre la válvula de entrada y abra las válvulas de salida y ventilación, que permite el contenido del cilindro salga por completo y la presión del interior del cilindro convertida a presión atmosférica. Cerrar la toma de corriente y válvulas de ventilación; y abrir la entrada de válvula de llenado del cilindro a un nivel en el que el hidrómetro flote libremente. Cerrar todas las válvulas, para verificar que no haya fugas. Si se detectan fugas, desechar la muestra, reducir la presión atmosférica y reparar las fugas. Repita el procedimiento de muestreo. Una vez certificado el dispositivo, cuidadosamente limpiar y secar el hidrómetro y las paredes del cilindro de presión. Insertar el hidrómetro en el cilindro de presión y adjuntar el termómetro y la cubierta. Conecte la fuente de suministro del líquido de referencia a la válvula de entrada y asegurarse de que las conexiones están libres de fugas. Rellene el hidrómetro con uno de los fluidos de referencia. Desconectar el cilindro del hidrómetro de la fuente de suministro de líquido y colocarla en baño a temperatura constante manteniendo a 0,2°C de temperatura la prueba hasta llegar al equilibrio. Para acelerar el ajuste térmico se debe retirar el cilindro del hidrómetro del baño ocasionalmente, inclinar horizontalmente, y rotar suavemente varias veces para garantizar la mezcla. Actuar con diligencia para evitar daños al hidrómetro y termómetro. Una vez alcanzado el equilibrio tomar lectura del hidrómetro, Observando un punto

ligeramente por debajo del plano del líquido la superficie y luego subir la línea de visión hasta que la superficie, sea vista como una línea recta. Leer y registrar la temperatura del líquido a $0,2^{\circ}\text{C}$, inmediatamente antes y después de leer el hidrómetro. Si la temperatura difiere en más de $0,4^{\circ}\text{C}$ introducir el cilindro del hidrómetro en el baño para restaurar equilibrio y repetir las lecturas (Pinzon, N., 2010).

Equipo experimental: En la **Figura 5-7** se muestra el cilindro de prueba usado en el ensayo de densidad relativa.

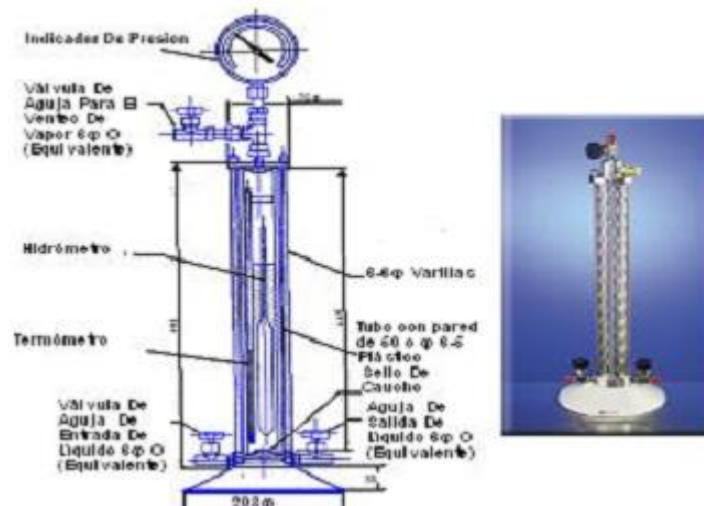


Figura 5-7. Cilindro presurizado para el hidrómetro (Pinzon, N., 2010).

- Residuo en el gas licuado del petróleo

Medición de la concentración de sustancias de hidrocarburos solubles presentes en el producto que, esencialmente, son menos volátiles que el GLP del cual se está tomando la muestra. El control del contenido de residuos, según las normas NTC 2517:2004 y ASTM D2158, es importante en las aplicaciones en donde se utiliza el combustible en sistemas de alimentación líquida o de vapor (cuando los vapores del combustible se extraen de la parte superior de un contenedor de almacenamiento de GLP). En cualquiera de los casos, exceder el límite de la concentración permitida de sustancias residuales puede producir depósitos indeseables o daño en el equipo de regulación o ambos (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

Se evapora una muestra de 100 ml de gas licuado del petróleo en un tubo de centrífuga de 100 ml. Se mide y registra el volumen del residuo que permanece después de

alcanzar una temperatura de 38 °C, así como la apariencia del papel filtro al cual se le ha añadido el residuo en incrementos medidos (Pinzon, N., 2010).

Procedimiento

Añadir 10 ml de muestra de disolvente al tubo centrífuga. Marque el centro de un papel de filtro con un lápiz. Llène la jeringa con una parte del residuo extraída del tubo de centrífuga y 0,1 ml de residuo a la marca en el papel. El residuo se añade en incrementos de 0,1 ml, formando un anillo de residuo de unos 30 a 35 mm de diámetro. Conecte el serpentín de refrigeración a la muestra de GLP, enfriar la bobina por debajo del punto de ebullición de la muestra, lave la bobina y la línea de muestras. Enfriar el tubo de centrífuga y luego llene hasta la marca de 100 ml con una muestra representativa de GLP. Insertar el alambre de cobre a través de un corcho con ranuras, colocar el corcho en la boca del tubo de centrífuga. Si más de 10mL de la muestra se pierde debido al choque, obtener una nueva muestra y repetir la prueba. Adicionar calor artificial a la muestra que esta por fuera. Si la temperatura ambiente o el tipo de muestra lo requieren. Cuando la turbulencia haya cesado y el tubo alcanza la temperatura ambiente, quedan residuos visibles, coloque la punta del tubo en un baño de agua a 38°C durante 5 min. Anotar el volumen del residuo que queda a una precisión de 0,05 ml, y la presencia de cuerpos extraños, si se observa. Realizar la observación de la mancha de aceite, incluso si no hay residuos aparente o visible en el tubo centrífuga. La experiencia ha demostrado que no hay presencia de una fina película de aceite en la superficie del interior del tubo de centrífuga. Observación de las Manchas de aceite: Añadir disolvente suficiente en el tubo de centrífuga para restaurar el volumen a 10 ml. Añadir el disolvente a la 27 botella de lavado y lavar cuidadosamente por los lados del tubo. Revuelva bien para que cualquier residuo en el parte inferior del tubo se disuelva de manera uniforme en el disolvente. Esta mezcla se denomina mezcla de residuos en disolventes. A continuación, marque el centro de un papel filtro blanco. Llène la jeringa o dosificador con la mezcla de residuos con disolvente; y deposite 1,5ml de la mezcla en el centro del papel de manera que el círculo mojado tenga alrededor de 30 a 35 mm de diámetro. Esperar por dos minutos (2mn) la aparición de un anillo de petróleo al sostener el papel filtro en la luz, si este no aparece reportar los resultados. Si el anillo se aprecia, determinar el volumen de la mezcla de residuos en un filtro nuevo e incrementar de 0,1ml la mezcla en el papel, esperar 2mn y revisar los anillos. Registre el volumen adicionado para encontrar una mancha persistente. Si después de 0,3ml de mezcla adicionada no persiste la mancha se clasifica como "Paso". Si dicha mancha aparece el proceso "Fracaso" (Pinzon, N., 2010).

Equipo experimental: En la **Figura 5-8** se muestra el tubo de centrífuga en forma cónica y el equipo de enfriamiento usado en el ensayo de residuo en GLP.

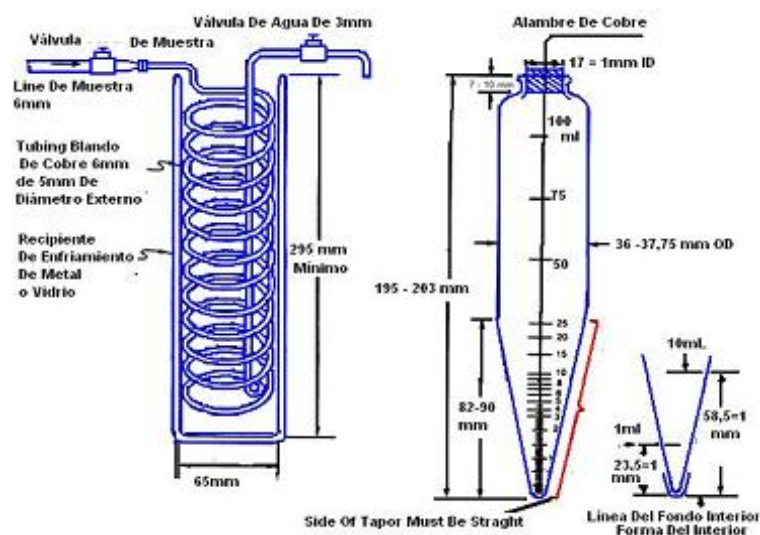


Figura 5-8. Equipo de pre enfriamiento y tubo de centrifuga en forma cónica (Pinzon, N., 2010).

▪ Volatilidad del GLP

La prueba de la volatilidad del GLP se expresa en términos de la temperatura cuando el 95 % del producto es evaporado. Como tal, se basa en una medida de la cantidad de componentes combustibles menos volátiles presentes en el producto, que en conjunto con una presión de vapor limite, sirve para garantizar productos que tienen esencialmente uno o dos componentes, como en los casos del propano, butano y mezcla comercial. Detallando en muchos casos la calidad del combustible con respecto a las olefinas contenidas en el mismo. Esta prueba se realiza bajo las normas NTC 2563:2004 y ASTM D1837-02A (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

Se debe refrigerar la muestra por medio de un serpentín de enfriamiento y recolectar 100 mL de líquido en un tubo de evaporación. La muestra se evapora a presión ambiente bajo condiciones especificadas que se aproximan a un solo plato de destilación. Corregir la temperatura observada, cuando permanecen 5 mL líquido, por presión barométrica y por error del termómetro en el punto de congelamiento, y luego reportarla como la temperatura de evaporación al 95 % (Pinzon, N., 2010).

Procedimiento

Colocar el Termómetro. Agregar 5 ml de agua. Añadir dos granos de carbón. Insertar el termómetro blindado tan bajo como sea posible en tubo evaporador. Observe y registre el nivel del agua en el tubo. Retire y deseche el agua, el carbón limpio y seco. Conectar la entrada del serpentín de enfriamiento a la muestra con una conexión de línea corta de 6,4 mm (1/4pulgadas) de tubería, con una válvula de toma de muestra lo suficientemente

grande como para prevenir vaporización del material debido a la caída de presión a través del asiento de la válvula. Purga de la línea de muestreo y serpentín de refrigeración por la apertura de la válvula de toma de muestras y la válvula de aguja de 3,2 mm (1/8pulgadas) en el extremo inferior del serpentín de enfriamiento. Llene el tubo con la muestra que fluye a través del serpentín de refrigeración. Vaciar esta primera muestra, añadir dos granos de carbón y luego llenar el tubo evaporador hasta la marca de 100 ml con la muestra de líquido fresco que pasa por el serpentín de refrigeración. Inserte cuidadosamente en el equipo de pre enfriado el termómetro blindado en el tubo de centrifuga, y el centro en el tubo por medio de un tapón de corcho con ranuras. Tome todas las lecturas de residuos. Si el equipo de pre-enfriamiento es inadecuado la muestra se traducirá en exceso de la vaporización y la pérdida de los componentes de la muestra recogida en el tubo evaporador. Esto da como resultado un elevado punto de ebullición de los componentes de la muestra con el fin de recoger 100 ml de líquido (Pinzon, N., 2010).

Prueba de evaporización de Butano con una mezcla de propano-butano: Cuando la temperatura de la muestra este por debajo de -12°C (10°F), deje que la temperatura llegue a -12°C (10°F). En este punto, colocar el tubo con el termómetro blindados todavía en su lugar, en el baño de agua en posición vertical, sumergiendo a la marca 1 1/2-mL, por un tiempo (Pinzon, N., 2010).

Evaporización de Propano: Permitir a la muestra estar en la atmósfera, teniendo cuidado de no producir hielo en el tubo de tanto como sea posible. Un alcohol o acetona en algodón se pueden utilizar para retirar el hielo para permitir la lectura de la temperatura. Lectura de la temperatura: Cuando el nivel d líquido en el tubo a la intemperie, con el termómetro blindado todavía en su lugar, corresponde con el nivel determinado previamente, leer y registrar la temperatura de la muestra. Corrección de la temperatura: con la temperatura final de lectura anterior, retire el termómetro de blindados del tubo de la intemperie y colóquelo en un baño de hielo finamente molido, hasta el punto de inmersión. Observe la lectura del termómetro cuando se obtiene una lectura constante. Si la lectura es inferior a 0°C (32°F), agregue la fracción de grado a la lectura de la prueba final. Si la lectura del termómetro se más de 0°C (32°F), restar la fracción de un grado la lectura de la prueba final. Si la lectura del termómetro varía en más de $0,5^{\circ}\text{C}$ (1°F), el resultado de la prueba no es válido. Repita el procedimiento, utilizando un termómetro preciso (Pinzon, N., 2010).

Equipo experimental: En la **Figura 5-9** se muestra el tubo de evaporación y el equipo de enfriamiento usado en el ensayo de volatilidad del GLP.

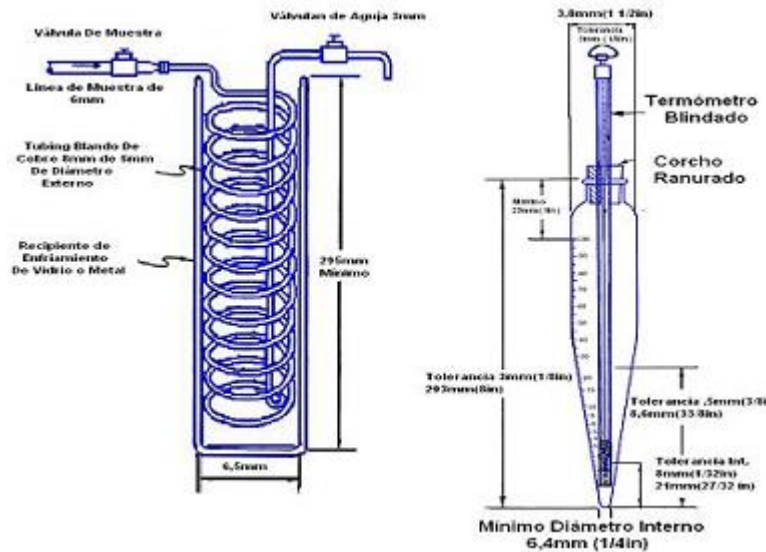


Figura 5-9. Equipo de pre enfriamiento y tubo de evaporación (Pinzon, N., 2010).

▪ Sulfuro de hidrógeno

Los gases licuados del petróleo y sus productos de combustión no deben ser demasiado corrosivos a los materiales con los cuales entran en contacto. Los peligros potenciales de exposición del personal al H₂S hacen que sea importante la medición y detección del sulfuro de hidrógeno, según normas NTC 5470:2007 y ASTM D1835-97, aun a bajas concentraciones. Además, en algunos casos el olor de los gases no debe ser desagradable (ver la especificación D 1835-97 y GPA 2140:1997) (Pinzon, N., 2010).

Resumen del método de ensayo

El GLP vaporizado se pasa a través de un papel de acetato de plomo húmedo bajo condiciones controladas. El sulfuro de hidrógeno reacciona con el acetato de plomo para formar sulfuro de plomo el cual produce una coloración sobre el papel que varía de amarillo a negro, dependiendo de la cantidad de sulfuro de hidrógeno presente (Pinzon, N., 2010).

Equipos y materiales

El papel de prueba puede ser preparado por inmersión de las tiras de papel filtro sin problemas en una solución acuosa de acetato de plomo del 5%, para eliminar el exceso de solución se pasa por papel secante limpio. Las tiras de papel serán de aproximadamente 50mm de largo y 10mm de ancho; con un agujero de 3mm cerca del final del papel para que cuelgue verticalmente en el aparato de prueba (Pinzon, N., 2010).

El indicador de flujo: medidor de prueba húmeda o un rotámetro, que mide los caudales en un rango de 2 a 3 litros de gas/min.

Tubería de alta presión: tubo de conexión para conectar el aparato de prueba hasta que sea recogida las muestras.

Equipo experimental: En la **Figura 5-10** se muestra el aparato para detectar sulfuro de hidrógeno en GLP.

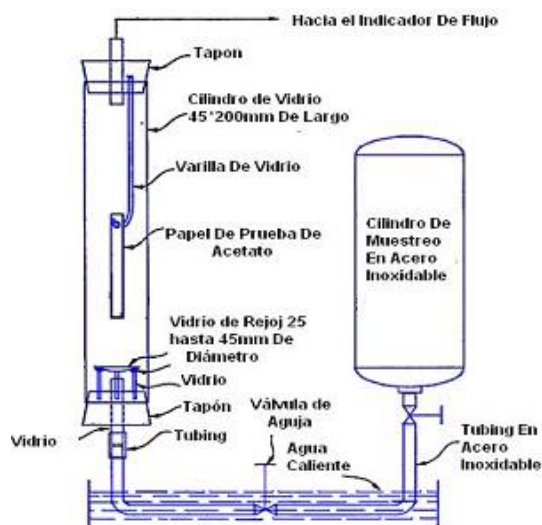


Figura 5-10. Aparato experimental para detectar H₂S en el GLP (Pinzon, N., 2010).

Bibliografía

Achtnicht, M., Bühler, G., & Hermeling, C. (2012). The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(3), 262–269. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2011.12.005>

Acogas. (1994). *Normativa técnica del gas en Colombia*.

AEGPL. (2000). *AEGPL Strategy Paper - on LPG Passenger Cars and Light Duty Vehicles*.

AEGPL EUROPE. (2013). *European Lpg Association Annual Review*. Retrieved from http://aegpl.com/media/91770/aegpl_annual_review_2013.pdf

American gas association. (1965). *Gas Engineers handbook*. Industrial Press Inc.

American National Standard. (1997). *Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases*. Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/astm.d1835.1997.html>

American Society for Testing Methods - ASTM. (1989). *Manual on significance of tests for petroleum products*. ASTM International, 5, 1.

American Society for Testing Methods - ASTM (1997). *ASTM D1835: Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases*, 552.

American Society for Testing Methods - ASTM. (1999). *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure*, 22. Retrieved from <http://www.chemyiqi.com/pdf/astmd86-99a.pdf>

Australian Liquefied Petroleum Gas Association - ALPGA. (1998). *Liquefied Petroleum Gas as an Automotive Fuel - An Enviromental and Technical Perspective*.

Australian Liquefied Petroleum Gas Association - ALPGA. (2000). *Wide Fuel Range Trial - A report on the impact of autogas composition on emissions and other performance of vehicles manufactured in Australia*.

Brasil, T. (1998). *Proposed amendments to the specification for LPG used in Motor Vehicles*. California Air Resource Board (CARB).

Baquero, M., & Avila, O. (2008). Automatización y diseño del sistema mezclador de combustible en vehículos con equipos de conversión a gas natural. Universidad de la Salle.

British Standards Institution. (2002). BS EN 12979:2002 Automotive LPG systems. Installation requirements.

British Standards Institution. (2003). BS EN 12806:2003 Automotive liquefied petroleum gas components. Other than containers. Internal Combustion Engines for Road Vehicles.

Cannon, R. (1996). Liquefied Petroleum Gas Quality/Quality control. Gas Processors Association.

Cannon, R. (1999). Liquefied Petroleum Gas Quality/Quality control. Gas Processors Association, 30.

Ceviz, M. a., & Yüksel, F. (2006). Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine. Renewable Energy, 31, 1950–1960. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.016>

Ceviz, M. A., Kaleli, A., & Güner, E. (2015). Controlling LPG temperature for SI engine applications. Applied Thermal Engineering, 82, 298–305. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.059>

Commission, E. (1992). INSTITUTE FOR SYSTEMS ENGINEERING COMMUNITY DOCUMENTATION CENTRE ON INDUSTRIAL RISK Comparison of selected LPG related codes and standards JOINT.

Dennis, S. (2002). Plant Engineer' s Reference Book Second edition, 915.

ECOPETROL. (2014). Gasolines. Bogota. Retrieved from http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/web_es/ecopetrol-web/products-and-services/international-trade/imports/gasolines!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09DQy9DQJDDQ0cjQzNPJ3CHINCjMz0C7ldFQHKECA-/

Eslava, A. (2014). Generación eléctrica a partir de la operación de un motor de combustión interna en modo dual con gas licuado de petróleo e hidrógeno. Universidad Nacional de Colombia.

EMSD. (2007). Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong, (2), 66. Retrieved from [http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/sgi/LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_\(11-2008\).pdf](http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/sgi/LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_(11-2008).pdf)

EMSD. (2016). LPG Vehicle Scheme. Retrieved from http://www.emsd.gov.hk/en/gas_safety/lpg_vehicle_scheme/

Environment Australia. (2000). Setting National Fuel Quality Standards - Proposed Model for Standards Implementation. Department of the Environment and Heritage.

Environment Australia. (2001). Proposed Standards for Liquefied Petroleum Gas (Autogas). Setting National Fuel Quality Standards, (October).

Environment Protection Agency. (1994). Standards for emission from Natural Gas-Fuelled, and Liquefied Petrol Gas-Fuelled Motor Vehicles and Motor Vehicle Engines, and Certification Procedures.

Fahim, A. Moahmed; Al-Sahhaf, Taher A.; Elkilani, A. (2010). Fundamentals of Petroleum Refining. Elsevier B.V.

Faiz, A., Weaver, C., & Walsh, M. (1996). Air Pollution from Motor Vehicles. The World Bank, 266.

Federal Office of Road Safety, FORS. (1997). Motor Vehicle Pollution in Australia, supplementary report No.1 In-Service Vehicle Emissions Study. Environment Australia.

Fisher Controls. (2003). Plain facts about freezing regulators. Technical Bulletin LP-24.
Fondonorma. (1998). Norma Venezolana 904-98. Productos derivados del petróleo. GLP. Retrieved from <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/904-98.pdf>

García Lenis, J. C., & Vergara Castañeda, L. I. (1997). Control de calidad del gas natural y los gases licuados del petróleo. Universidad Nacional de Colombia.

Gasolineras la Gaviota. (2011). Gas Licuado del Petróleo (GLP) - El Autogás. Retrieved from <http://www.gasolineraslagaviota.com/wp-content/uploads/2012/11/Licuado.pdf>

Gonzales, J. M. M. (2010). Modelado de la combustión de mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna, 264.

GoTek ENergy. (2013). The engine value proposition. Retrieved from <http://75.103.81.24/wp-content/uploads/2013/06/Piston-Engine-Phantom.jpg>

Guzman, J. (2006). Caracterización experimental de la composición del GLP en procesos de abastecimiento a partir de cilindros. Universidad Nacional de Colombia.

Hewitt, J. (1998). Finding a Premium for Propane. Propane Vehicle, 17.

Hewitt, J. (1998). Quality Begins with an H. Propane Vehicle, 17.

ICONTEC. (1996). Equipo, accesorios, manejo y transporte de G.L.P. Retrieved from <http://web.mintransporte.gov.co/consultas/mercapeli/Reglamento/Anexos/NTC3853.pdf>

ICONTEC. (1998). Petróleo y sus derivados. Especificaciones para gases licuados del petróleo, 1–10. Retrieved from <http://es.scribd.com/doc/219065825/NTC2303#scribd>

Indian Auto LPG Coalition. (2008). Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles, (January). Retrieved from http://www.iac.org.in/download.docs.php?type=publications&file=RTO_Booklet.pdf

International Energy Outlook. (2012). Climate-Global-Energy-Needs. Canada: IEA. Retrieved from <http://www.capp.ca/environmentCommunity/Climate/Pages/World-Energy.aspx>

International Energy Agency. (2014). Key World Energy Statistics. Paris. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>

Japan LP Gas Association. (1969). LPG Quality Standards in Japan.

Leal, V. S. (2014). Estudio y evaluación del comportamiento energético del motor de un conjunto motogenerador operando con Gas Licuado de Petróleo (GLP) de alto butano. Universidad Nacional de Colombia.

Liu, E., Yue, S.Y, & Lee, J. (1997). A study on LPG as a fuel for vehicles. Research and Library Services Division Legislative Council Secretariat, 30. Retrieved from <http://www.legco.gov.hk/yr97-98/english/sec/library/967rp05.pdf>

Masi, M. (2012). Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas). *Energy*, 41(1), 252–260. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.029>

Metric, V. (2011). LPG Frac Flow Back Guide. Well Testing, (January). Retrieved from <http://www.gasfrac.com/assets/files/LPGVantageFracFlowbackGuidev9finalJan2011.pdf>

Montenegro, S., Calzada, Á., & López García, L. (1994). Análisis del THT en el gas natural, 105–109. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2909005>

Myers, D. N. (2009). Propane Container Filling Laws and Standards The Safety Reasons Supporting Accountability, (July). Retrieved from http://calpsc.org/mobius/cpsc-content/uploads/2015/03/NPGA_Container_Law_White_Paper_July_2009.pdf

Myung, C. L., Kim, J., Choi, K., Hwang, I. G., & Park, S. (2012). Comparative study of engine control strategies for particulate emissions from direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase liquefied petroleum gas (LPG). *Fuel*, 94, 348–355. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.041>

- NEN. (2000). EN 589 - Automotive fuels - LPG Requirements and test methods. NEN.
- National Fire Protection Association. (1998). NFPA 58, Liquefied Petroleum Gas Code. Retrieved from <https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/58/58-98-PDF.pdf>
- New Zealand Institute of chemistry. (2008). The processing of natural gas at kapuni. Kapuni Natural Gas, 1–7. Retrieved from <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/energy/7C.pdf>
- Ning, Z., & Chan, T. L. (2007). On-road remote sensing of liquefied petroleum gas (LPG) vehicle emissions measurement and emission factors estimation. *Atmospheric Environment*, 41(39), 9099–9110. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.006>
- Onursal, B., & Gautam, S. (1997). Vehicular air pollution: Experiences from seven Latin American urban centers. *World Bank Technical Papers*, 23, 259 – 260. <http://doi.org/10.1596/0-8213-4016-6>
- Pinzón, N. (2010). Diseño conceptual, protocolo y normas específicas para la utilización de los laboratorios de gases licuados del petróleo. Universidad industrial de Santander.
- Propane101. (1998). Grades of Propane - Gas Purity and Quality. Retrieved from <http://www.propane101.com/propanegradesandquality.htm>
- Rubio, L. F. (2013). Propuesta de un modelo de mercado de gas natural y su impacto en el mercado de energía. Universidad pontificia bolivariana. Retrieved from <http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1133/1/TESIS PROPUESTA DE UN MODELO DE MERCADO DE GAS NATURAL Y SU IMPACTO EN EL MERCADO DE ENERG%C3%8DA.pdf>
- SAE International. (1999). Butane/propane mixtures as fleet fuels. *Sae Technical Paper*, (Diciembre).
- SAE International. (2004). *Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and perspectives*. (R. van Basshuysen & F. Schafer, Eds.). Warrendale.
- Shipman, R. (2013). Liquefied Petroleum Gas. *Liquefied Petroleum Gas Industry Technical*, 321–334.
- Snelgrove, D., Dupont, P., & Bonetto, R. (1996). An investigation into the influence of LPG (Autogas) composition on the exhaust emissions and fuel consumption of 3 Bi - fuelled Renault vehicles. *International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition*.
- Sutton, C., & Cannon, R. (1977). The evolution of LP-Gas specifications. *Gas Processing Association and Propane Gas Association of Canada*, 2.

Totten, G. E., Westbrook, S. R., & Shah, R. J. (2003). Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing Section Editors.

United Nations. (2011). Natural Gas as Automotive Fuel for Europe? Retrieved from http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/wpgas/21wpg_2011/18Jan2011/Seidinger_rt.pdf

United Nations. (2014). UN-ECE R67-01 LPG regulation, (March 1958).

Unidad de planeación minero energética, UPME. (2005). La cadena del Gas Licuado del Petróleo en Colombia. Teresa Huertas Molina, 58. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/Glp_web.pdf

Unidad de planeación minero energética, UPME. (2013). Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Oliver Diaz Iglesias, 99. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3577/files/cadena_glp_2013.pdf

Universidad Nacional de Colombia - UNAL. (2014). Estudio de tecnologías disponibles para incentivar el uso del gas combustible en el sector transporte. Retrieved from http://www.upme.gov.co/sp_SecccionHidrocarburos/Estudios_de_Tecnologias/Tomo_I/Informe_Final-Tomo_I_C005-2014_V3.pdf

U.S Department of energy. (2016). Federal Laws and Incentives for Propane. Alternative Fuels Data Center, 5. Retrieved from <http://www.afdc.energy.gov/fuels/laws/LPG/US>

U.S Department of energy. (2015). 2015 Chevrolet Captiva FWD Mileage. Retrieved from <https://www.fueleconomy.gov/feg/noframes/35042.shtml>

Wang, X., & Economides, M. (2009). Advanced Natural Gas Engineering. Houston: Gulf Publishing Company. <http://doi.org/10.1016/B978-1-933762-38-8.50009-5>

Watson, H., & Gowdie, R. (2000). The systematic Evaluation of Twelve LPG fuels for Emissions and Fuel Consumption. Sae Technical Paper, (1867).

Wines, R., & Brown, J. (1994). Recent development in liquid/gas separation technology. Laurance Reid Gas Conditioning Conference.

Wu, C. (2007). Thermodynamics and heat powered cycles: A cognitive engineering approach. New York: Nova science publisher.