

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE GLP
COMO COMBUSTIBLE PARA EL SECTOR DE TRANSPORTE**

ERICK FABIAN TRUJILLO AGUILAR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACION EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE GLP
COMO COMBUSTIBLE PARA EL SECTOR DE TRANSPORTE**

ERICK FABIAN TRUJILLO AGUILAR

**Monografía para obtener el título de
Especialista en ingeniería en gas**

**DIRECTOR
INGENIERO JULIO CÉSAR PÉREZ
Especialista en ingeniería de gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACION EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA**

2017

Dedicatoria

A mi padre Diomedes Trujillo por ser mi ejemplo a seguir y por demostrarme la fuerza y el valor que se tiene para seguir una vida llena de adversidades.

A mi madre por su infinito amor y alegría demostrando cada día lo orgullosa que se siente de mí.

A mis hermanos fuente inagotable de sabiduría y comprensión.

A mi hermana Wendy Sthephania Trujillo Aguilar por ser el ángel que guía mi camino desde un mejor lugar.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarme la vida y hacer que sus planes se cumplan.

A mis compañeros de especialización por trabajar mano a mano en este camino
tan grato.

A Estibaliz, por su apoyo, y por hacerme ver las cosas tal y como son y aun así no
dejarme caer al vislumbrar el abismo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	16
1. GENERALIDADES.....	18
1.1 COMPOSICIÓN GAS LICUADO DE PETROLEO	18
1.2 OBTENCION DEL GLP.....	19
1.2.1 Obtención del GLP por rompimiento catalítico del petróleo.	20
1.2.2 Obtención del GLP por condensación de los líquidos del gas natural.	23
1.2.2 Obtención del GLP por condensación de los líquidos del gas natural.	23
2. CONVERSION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA CON GASOLINA COMO CARBURANTE A UN MOTOR CON GLP COMO CARBURANTE	29
2.1 HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	29
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	29
2.2.1 Combustión y ciclo termodinámico	30
2.3 COMBUSTIBLE	32
2.3.1 Densidad.....	32
2.3.2 Calidad antidetonante.	32
2.3.3 Presión de vapor.....	33
2.3.4 Contenido de benceno.....	33
2.3.5 Contenido de sulfuros.....	33
2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL GLP EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES	34
2.4.1 Depósito de GLP y accesorios.....	37
2.4.2 Sistema de suministro de GLP.....	40
2.4.3 Sistema de control de GLP vehicular.....	40
2.5 VENTAJAS DEL GLP UTILIZADO EN VEHICULOS.....	42
3. ESTÁNDAR DE ESPECIFICACIONES DEL GLP EN CASO COLOMBIANO	47
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO NACIONAL DEL GLP	47

3.2	CALIDAD DEL GLP	51
3.2.1	Composición. Según la norma ASTM D1835-97,	52
3.2.2	Presión de vapor.....	53
3.2.3	Gravedad específica.	55
3.2.4	Poder calorífico	56
3.3	CALIDAD DEL GLP EN COLOMBIA.....	56
3.4	ESTÁNDAR DE ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL GLP PARA USO AUTOMOTOR EN COLOMBIA.....	60
3.4.1	Restricción en el contenido de olefinas en el GLP.....	61
3.4.2	Presión de vapor.....	62
3.4.3	Impacto en el rendimiento del motor.....	62
3.4.4	Efecto en las emisiones.	63
3.4.5	Contenido de agua.....	65
3.4.6	Solución odorante.	65
3.4.7	Sulfuro de hidrogeno H ₂ S.....	67
4.	DISTRIBUCION DE GLP EN COLOMBIA	68
4.1	ESTACIONES DE SERVICIO DE GLP.....	69
4.2	NORMATIVA INTERNACIONAL DE ESTACIONES DE SERVICIOS DE GLP PARA USO AUTOMOTOR	70
4.3	NORMATIVA NACIONAL DE LAS ESTACIONES DE SERVICIO DE GLP PARA USO AUTOMOTOR	73
4.4	DISEÑO Y APROBACIÓN DE ESTACIÓN DE SERVICIO DE GLP	75
4.4.1	Ubicación de estación de servicio de GLP.....	75
4.4.2	Dimensiones físicas de la estación de servicio de GLP.....	76
4.4.3	Instalación de equipos de estación de servicio GLP.....	77
5.	CALCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN MOTOR FUNCIONANDO CON GLP.....	79
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
5.1.1	Influencia de la composición del gas combustible (GC) sobre el poder calorífico de la mezcla.	83
5.1.2	Influencia de la composición del GC sobre el exceso de oxígeno.	84

5.1.3 Eficiencia del proceso.....	85
6. EVALUACION FINANCIERA DE LA CONVERSION A GLP	87
7. CONCLUSIONES	94
8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	95
BIBLIOGRAFIA.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hidrocarburos típicos.	20
Tabla 2. Sección de cortes del crudo por destilación.....	21
Tabla 3. Especificación de calidad del gas natural.	25
Tabla 4. Resultados de las pruebas de uso de combustibles alternativos en la ciudad de Santiago de Chile.	44
Tabla 5. Comparación de emisiones y consumo de combustible para 5 vehículos bi-valentes europeos operando con gasolina y GLP.....	45
Tabla 6. Polución para vehículos funcionando con GLP en California.....	46
Tabla 7. Producción de GLP por fuentes de suministro.	49
Tabla 8. Valores típicos de poderes caloríficos.....	56
Tabla 9. Calidad del GLP - Cusiana.....	57
Tabla 10. Calidad de GLP campo Apiay	58
Tabla 11. Calidad de GLP campo TOQUI-TOQUI	58
Tabla 12. Calidad de GLP refinería de Barrancabermeja.	59
Tabla 13. Calidad del GLP de la Refinería de Cartagena.	60
Tabla 14. Resumen de recomendación de normativa del GLP vehicular para Colombia	66
Tabla 15. Distancias de separación con respecto a otras edificaciones.	77
Tabla 16. Composición de los flujos de aire y GLP.....	80
Tabla 17. Parámetros para el cálculo de la eficiencia energética.	82
Tabla 18. Reacciones estequiometrica.	83

Tabla 19. Poder calorífico de los 5 GLP tomados para el análisis energético.	84
Tabla 20. Precios máximos regulados GLP marzo 2017	88
Tabla 21. Costo, beneficios y valor presente de la conversión	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mayores constituyentes del GLP.	19
Figura 2. Diagrama simplificado de proceso de una refinería	22
Figura 3. Diagrama de procesos de obtención del GLP a partir de los productos del rompimiento catalítico del petróleo.....	24
Figura 4. Diagrama de planta de procesos de separación del GLP a partir del gas natural.....	27
Figura 5. Diagrama de presión vs volumen del ciclo otto.....	31
Figura 6. Instalación de GLP diagrama esquemático.	36
Figura 7. Esquema de un circuito de alimentación de autogas - bivalente (GLP-Gasolina)	37
Figura 8. Diseño del depósito de GLP tipo tóricos.....	38
Figura 9. Esquema de instalación de GLP para motor de inyección multipunto. ...	41
Figura 10. Instalación típica de un sistema bi-fuel en un vehículo	42
Figura 11. Producción de GLP por fuente de suministro (BPD).....	50
Figura 12. Exploración offshore por parte de ECOPEPETROL.....	51
Figura 13. Curvas de presión de vapor con respecto a la temperatura para propano y butano comercial.....	55
Figura 14. Infraestructura para el transporte de hidrocarburos	69
Figura 15. Estación de servicio de GLP	70
Figura 16. Representación esquemática del motor de combustión interna.	80
Figura 17. Flujo de energías típicas en motor de combustión interna.....	81

Figura 18. Modelo de un MCI en Aspen Hysys.....	82
Figura 19. Consumo de aire para combustión completa del GLP.....	85
Figura 20. Eficiencia del GLP por suministro.	86
Figura 21. Costos comparativos de varios carburantes, calculadora de ahorro AOGLP	89
Figura 22. Comparativo de precios de carburantes.	89
Figura 23. Consumos medios y costes por cada 100 km	90

RESUMEN

TITULO DEL PROYECTO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DEL USO DE GLP COMO COMBUSTIBLE PARA EL SECTOR DE TRANSPORTE¹.

AUTOR: ERICK FABIAN TRUJILLO AGUILAR²

PALABRAS CLAVES: GLP uso vehicular, GLP combustible automotor, autogas, gas licuado de petróleo.

DESCRIPCIÓN:

La gasolina ha sido el combustible más usado para el transporte. En la actualidad es catalogado como el mayor emisor de gases de efecto invernadero, países de todo el mundo han tomado la iniciativa de contrarrestar dichas emisiones, con cambios en los hábitos de sus poblaciones, reducción de emisiones por parte de la industria, protocolos de colaboración internacional y por supuesto fuentes de energía renovables, la constante necesidad de cuidar el planeta ha despertado el afán de encontrar la manera de reducir las emisiones a la atmosfera, dicho de otro modo se busca mitigar los mayores contaminantes. En la última década los combustibles usados para la automoción han tenido una evolución constantes, usandose, Biodiesel y Gas natural para disminuir los efectos nocivos que estos generan, se apuesta a un combustible derivado del petróleo y gas, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) se convierte en un aliado estratégico para innovar en la industria de los combustibles, este posee las características necesarias para reducir la demanda de gasolina usada en el transporte y aportar a la disminución de emisión de contaminantes al ambiente.

En Colombia se ha intensificado la promoción de combustibles amigables con el ambiente como lo son el GNV y los productos derivados de los ingenios, si bien hoy en día en Colombia no existe un auge en la utilización del GLP es debido al desconocimiento de los beneficios que tiene, es por esto que surge la necesidad de realizar proyectos e investigación en donde se abarquen generalidades.

A continuación, se realiza un análisis de la factibilidad del GLP como combustible automotor en el sector de transporte en Colombia, teniendo en cuenta las diferentes normativas internacionales, los costos de conversión de países vecinos y las eficiencias energéticas de los motores de combustión interna.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Ingeniería del Gas Director(a): Julio Cesar Pérez Angulo, Especialista en ingeniería del gas.

ABSTRACT

PROJECT: Analysis of the technical and financial feasibility of use of petroleum liquefied gas (LPG) to the transport sector ¹.

AUTOR: ERICK FABIAN TRUJILLO AGUILAR²

PALABRAS CLAVES: LPG vehicle fuel, LPG motor fuel, Natural Gas, petroleum liquefied gas (LPG).

The gasoline has been the most used fuel for the different means of transportation. Nowadays it is classified as the largest emitter of greenhouse gases, countries around the world have taken the initiative to reduce damage to the ozone layer counteract that emissions, and some examples are changes in the habits of their populations, reduction of emissions by industry, protocols of International collaboration and of course, renewable energy sources, the constant need to care for the planet has aroused the desire to find ways for reduce emissions to the atmosphere, in other words it seeks to mitigate the biggest pollutants.

In the last decade, the fuels used for the automobile have been constantly evolving, reaching the point of using Biodiesel and natural gas to reduce the harmful effects they generate, countries like Japan, Spain, Chile and Peru, aim a derived fuel Oil refining processes and the withdrawal of natural gas liquids, Petroleum Liquefied Gas (LPG) becomes a strategic ally to innovate in the fuel industry, it has the necessary characteristics to reduce the demand for Gasoline used in transport and contribute to the emission of pollutants to the environment.

Colombia has intensified the promotion of Eco friendly fuels such as NGV and products derived from mills, although today in Colombia there is no boom in the use of LPG is due to the lack of awareness of the benefits that it Has, For this reason is important to carry out projects and research in which generalities are covered.

An analysis of the feasibility of petroleum liquefied gas (LPG) as an automotive fuel in the Colombian transport sector is made in this paper , taking into account the different international regulations, conversion costs of neighboring countries and the energy efficiency of internal combustion engines.

¹ Bachelor Thesis

² Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Gas Engineering Specialization. Director: Julio cesar Pérez Angulo, Specialist in gas engineering.

INTRODUCCION

Las necesidades energéticas para recorrer gran distancia en el diario vivir, ha hecho que las personas deseen emplear cada vez más medios de transportes, aumentando la demanda de estos en el mundo, con el aumento desproporcionado de la población a lo largo de los últimos años y la utilización de hidrocarburos como combustible para el funcionamiento de los transportes, la influencia negativa de estos al medio ambiente, generan grandes preocupaciones sobre la salud del planeta. Aunque con una tendencia más limpia como apoyo, las fuentes de energía solar, nuclear, eólica, hidráulica y otras alternativas renovables aún son jóvenes para reemplazar la demanda de hidrocarburos y tener la influencia necesaria de generar un cambio.

El combustible de los sistemas de transporte que se produce en el mundo hace parte del 60% de la producción del petróleo, la combustión de dichos combustibles y el uso poco eficiente de estos afectan cada vez más al medio ambiente. Por tal motivo, el petróleo ha llegado a catalogarse como el segundo emisor de gases de efecto invernadero en el mundo después del carbón. No obstante, estas fuentes de hidrocarburos comienzan a tener escasos y su estabilidad para el futuro es incierta, si a esto sumamos que los grandes yacimientos de petróleo se encuentran ahora mismo en países asiáticos y americanos, generando una tendencia de monopolio, como es el caso de La Organización de los países exportadores de petróleo (OPEP) prevé que a mediados de 2030 poseerán un 70% del petróleo disponible y un 45% total del mercado³

A partir de la situación en la que se encuentra el planeta, se han intensificado temas como son el cambio climático y la disminución de emisiones por parte de los hidrocarburos, si bien el petróleo es una fuente de emisión de gases invernaderos, también es sabio que algunos subproductos, como lo es el gas natural (metano) y el gas licuado de petróleo (GLP, propano y butano) son más amigables con el ambiente, este último ha incursionado de manera exitosa en países como Corea del Sur, Japón y China convirtiéndose en el sustituto de la gasolina en materia de combustibles para el sistema de transporte, las ventajas de este combustible es que su composición (C3-C4), permite que se mantenga líquido a temperatura ambiente aplicando presiones moderadas, lo que lo hace más llamativo que el gas natural por autonomía y almacenamiento, además el GLP puede obtenerse del refinado del petróleo o bien de los yacimientos de gas natural⁴. También cabe destacar la reducción de concentraciones de compuestos

³ ACHTNICHT, Martin; BÜHLER, Georg y HERMELING, Claudia. The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17(3) Elsevier Ltd., 2012. P. 262–269.

⁴ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. P 10.

aromáticos y azufrados que, en la gasolina comercial, generan concentraciones altas de contaminantes al ser quemados como combustible, por lo cual, el uso de este tipo de combustible puede ser vital para el proceso de transición a combustibles amigables con el medio ambiente en los sistemas de transporte actuales.

1. GENERALIDADES

Desde la última década se ha venido usando el GLP en Europa y Asia como combustible principal de vehículos con motores de combustión interna transformándolos de gasolina/GLP o Diésel/GLP haciendo más amigables estos combustibles con el ambiente. El ahorro económico al usar un vehículo que funciona con GLP es significativo tanto así que se prefiere tener el GLP antes de un cambio a Diésel, En Colombia el Plan Nacional de Desarrollo le dio vía libre al Ministerio de Minas y Energía para que expida la reglamentación que permita el uso de gas licuado de petróleo (GLP) como carburante en motores de combustión interna y en transporte automotor (autogas). Esto le permitirá al país entrar en sintonía con el mundo, al avalar la alternativa más utilizada para el transporte terrestre después de la gasolina y el diésel, pero aún está en estudio para 2016.

Lo anteriormente mencionado se debe a que en Colombia no existe una legislación para el GLP lo que no permite esclarecer las características del mismo además que no se ha seguido un modelo de transformación para los vehículos que funcionan con combustibles convencionales (gasolina y diésel) que permita mejorar la eficiencia de combustión y hacer incursionar al GLP además se carece de la infraestructura necesaria para hacer viable el uso de GLP alrededor del país para el área de transporte

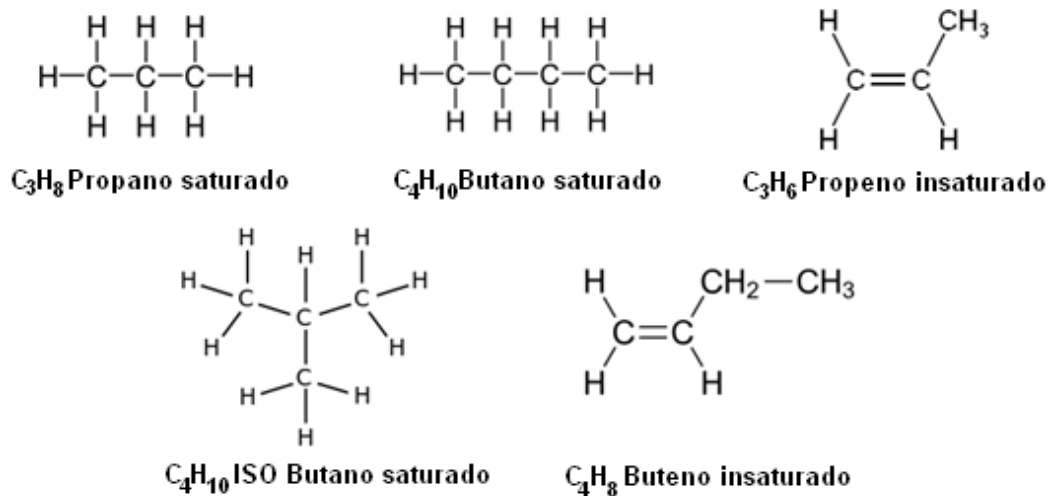
De seguir así, las características del GLP y su funcionamiento en el país llevarán a estructurar una legislación inapropiada y un uso inadecuado del mismo haciendo poco viable el GLP. Adicionalmente no tener en cuenta la influencia del GLP en los motores Diésel acortará el campo de acción del GLP demorando la construcción de infraestructura y haciendo poco atractivo al combustible para vehículos Diésel, el impacto ambiental seguirá creciendo ocasionando una contaminación acelerada en las grandes ciudades.

1.1 COMPOSICIÓN GAS LICUADO DE PETROLEO

El GLP tiene un comportamiento a temperatura ambiente y presiones moderadas (cerca de los 100 psi) que le permiten estar condensado, por esta razón el GLP puede ser almacenado y transportado con mayor facilidad 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). El butano, a diferencia del propano, tiene un punto de ebullición más cercano a los 0°C , razón por la cual un GLP con alto contenido de butanos tendrá una capacidad de vaporización menor a un GLP rico

en propanos, lo cual genera impedimentos y obstáculos especialmente en las regiones frías del país, impactando en particular a las industrias y afectando las estrategias de penetración en ese mercado⁵, 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 butenos⁶.

Figura 1. Mayores constituyentes del GLP.



Fuente: DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition

Además de lo anterior, hay que tener en cuenta que la composición del GLP varía también con el tipo de proceso que se usa para su obtención, ya sea por el rompimiento catalítico del petróleo, o del proceso de separación continua del gas natural, a esto también debemos sumar los componentes que puedan agregarse al gas natural cuando este se ve afectado por la contaminación, el almacenamiento y los diferentes agentes externos con los que este en contacto, agregándole a su composición residuos de hidrocarburos pesados, sulfuros, vapor de agua y amoníaco.

1.2 OBTENCION DEL GLP

⁵ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. 63p.

⁶ DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition, Gran Bretaña: MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002, 915p.

Como se dijo anteriormente, el GLP se puede obtener ya sea por el rompimiento catalítico del petróleo, o del proceso de separación continua de los líquidos del gas natural, si bien se puede obtener de otras maneras, pero estas dos son las más comunes y de las cuales se deriva la mayoría del GLP usado para automoción.

1.2.1 Obtención del GLP por rompimiento catalítico del petróleo. La estructura química encontrados en el proceso de refinería, va desde enlaces simples (parafinas) y enlaces dobles (olefinas) entre los átomos de hidrógenos y carbono (cuando todos los enlaces de carbono-carbono son simple, se llama saturado, cuando hay enlaces dobles es insaturado) hasta encontrar en algunos hidrocarburos enlaces con elementos como azufre, nitrógeno, oxígeno y metales, así como trazas de otros elementos, estos enlaces pueden tener un aporte negativo a la calidad de dichos productos⁷, en la Tabla 1 se encuentran Los cuatro tipos de hidrocarburos, basados en las características anteriores.

Tabla 1. Hidrocarburos típicos.

NOMBRE	CADENA/ANILLO	SATURADO/INSATURADO	EJEMPLO
Parafina	Cadena	Saturado	Hexano propano/butano
Olefina	Cadena	Insaturado	Iso propano/butano
Naptenicos	Anillo	Saturado	Ciclo Hexano
aromáticos	Anillo	Insaturado	Benceno

Fuente: TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing.

De forma general, la Figura 2 muestra un diagrama simplificado de los procesos de una refinería, en la cual se puede evidenciar la gran mayoría de equipos que se utilizan para generar productos a diario en las refinерías 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 ambiente⁸. Generalmente, en este equipo de proceso se alcanzan temperaturas que van desde los -160°C (separación de gases C1-C4) a 340-410°C, mediante el

⁷ TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003. P 22.

⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METHODS - ASTM. ASTM D86-16a, Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure, ASTM International, West Conshohocken: Clearance Center., 1999. P. 22.

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 , 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% 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 calidad, debido a que la remoción de compuestos de sulfuros, 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, gas natural y GLP, entre otros.

Tabla 2. Sección de cortes del crudo por destilación.

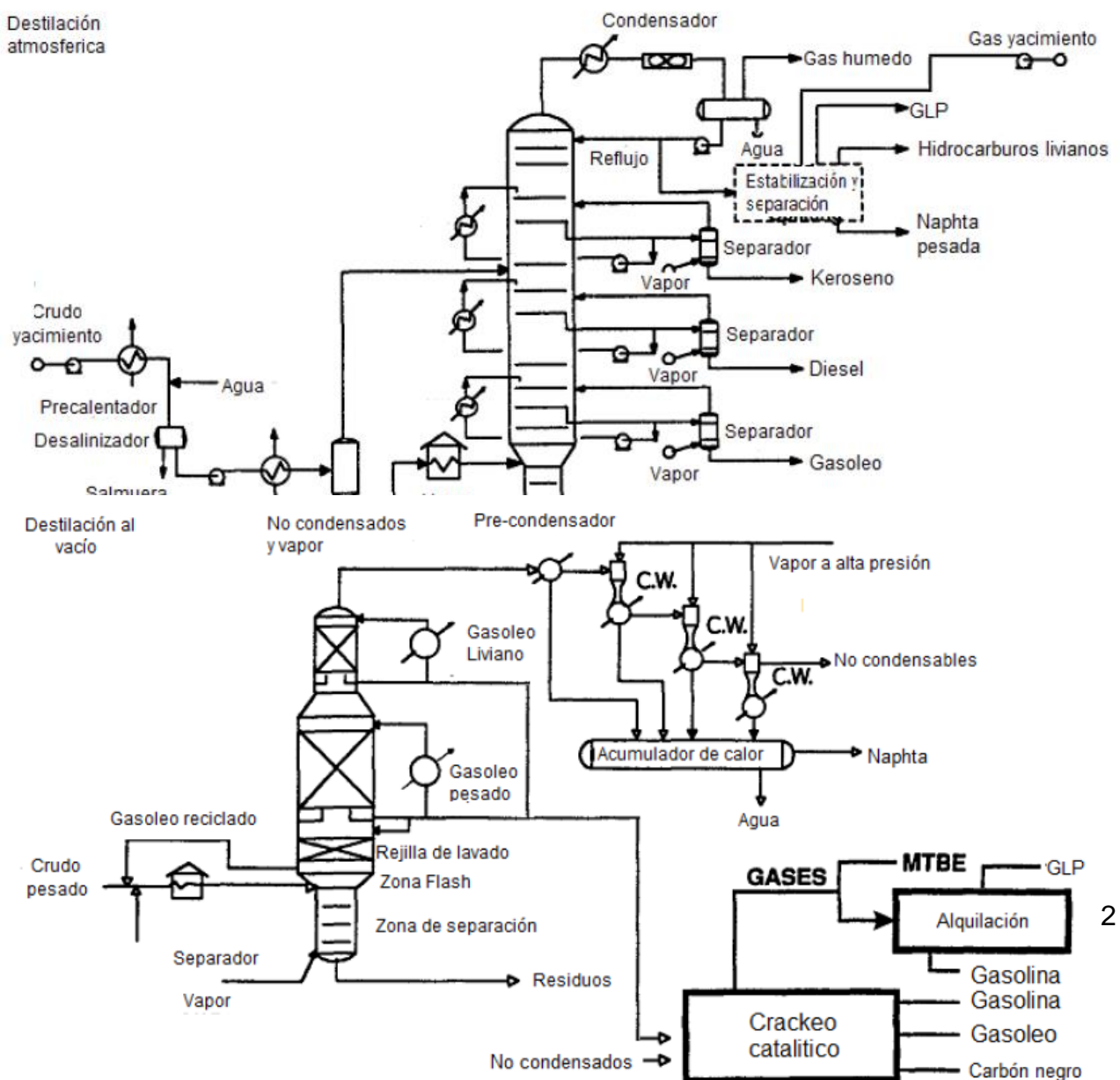
Nombre	Numero de carbono	Rango aproximado de punto de ebullición [°C]
Gases		
	C1-C4	-160 – 0
Hidrocarburos livianos de gasolina		
Nafta liviana	C5-C6	25 – 90
Gasolina liviana		
Gas condensado		
Hidrocarburos pesados de nafta		
Nafta pesada	C6-C10	85-190
Nafta		
Nafta reformada		
Keroseno		
Combustible de jet	C9-C15	160 – 275
Gasóleo liviano atmosférico		
Crudo de horno	C13-C18	250 – 340
Diésel		
Gasóleo pesado atmosférico		
Gasóleo de automoción	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		
Residuos de cadena corta	C40+	500 – 575+
Residuos de vacío del crudo		
Asfalto		

Fuente: TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing

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 refinería 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.

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

Figura 2. Diagrama simplificado de proceso de una refinería



Fuente: TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing

del formando productos de hidrocarburos y coque rápidamente debido a la polimerización de las olefinas y compuestos aromáticos, de donde se obtienen diferentes productos, 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 3. 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 producto⁹.

1.2.2 Obtención del GLP por condensación de los líquidos del gas natural. Al extraer el petróleo y/o gas de un yacimiento y analizar su composición se encuentra una gran variación de esta dependiendo el área geológica, el tipo de depósito de roca, profundidad y localización. Luego, para que este gas pueda ser transportado por la red nacional hacia los sitios de comercialización o procesamiento debe cumplir con ciertos estándares de calidad especificados en el Reglamento Único de Transporte (RUT).

El Gas Natural entregado al Transportador por el Agente, en el Punto de Entrada del Sistema de Transporte y por el Transportador en el Punto de Salida, deberá cumplir con la siguiente especificación de calidad:

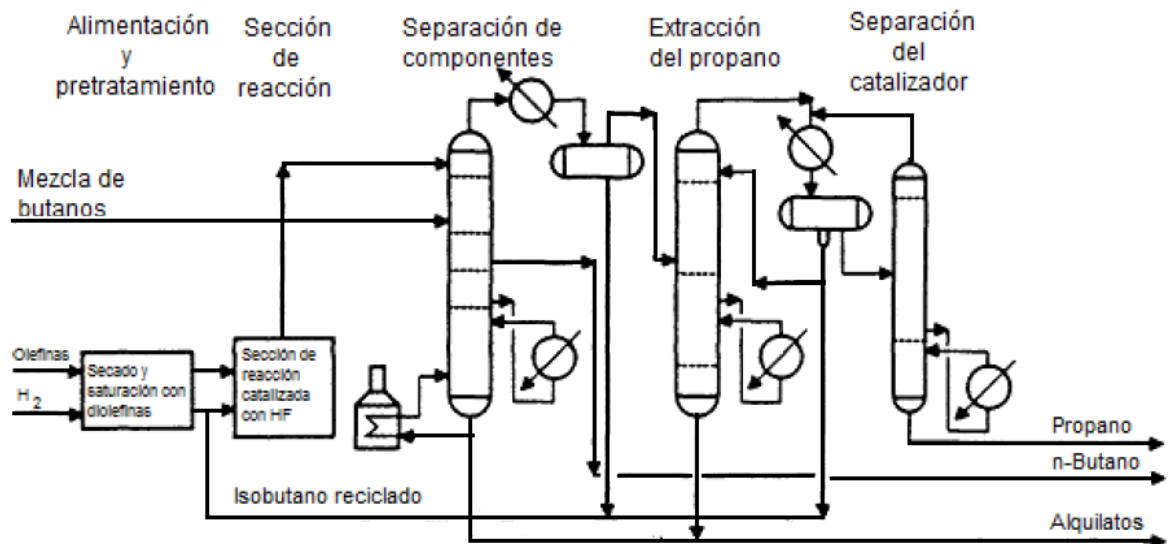
Además se pueden encontrar normativas y estándares de calidad internacionales, tal como lo especifica¹⁰:

⁹ TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003. P 10.

¹⁰ WANG, Xiuli y ECONOMIDES, Michael. Advanced Natural Gas Engineering. Houston: Gulf Publishing Company, 2009. 333p.

- Deben cumplir con un rango específico de capacidad calórica. Por ejemplo, en estados unidos, estos deben ser cercanos a 1.035 ± 50 BTU/STCF.
- Estos deben ser entregados a un punto de rocío aceptable. La cual no produzca 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.

Figura 3. Diagrama de procesos de obtención del GLP a partir de los productos del rompimiento catalítico del petróleo.



Fuente: TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing

Las anteriores especificaciones de calidad, le dan al productor una guía para los procesos que debe llevar a cabo para el cumplimiento de los estándares y normativa. 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 GLP¹¹. De lo anterior, la producción del GLP a partir de gas natural, constituye uno de los

¹¹ WANG, Xiuli y ECONOMIDES, Michael. Advanced Natural Gas Engineering. Houston: Gulf Publishing Company, 2009. 333p.

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 4 y se compone de cuatro etapas fundamentalmente:

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:

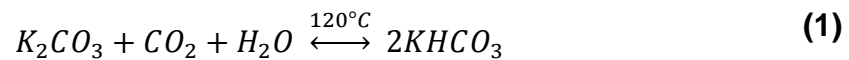


Tabla 3. Especificación de calidad del gas natural.

ESPECIFICACIÓN	Sistema internacional	Sistema ingles
Máximo poder calorífico bruto (GHV)	42.8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)	35.4 MJ/ m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de liquido	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100 PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100 PCS
Contenido de CO ₂ , máximo en % de volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % de volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % de volumen	5%	5%
Contenido de oxigeno máximo en % de volumen	0.1%	0.1%
Contenido de agua máximo	97 mg/m ³	6.0 lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120 °F
Temperatura de entrega mínimo	4.5 °C	40 °F

Contenido máximo de polvo y material de suspensión

1.6 mg/m³

0.7 grano/1000 PC

Fuente: numeral 6.3 del Reglamento Unico de Transporte (RUT)

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 consecuentemente¹².

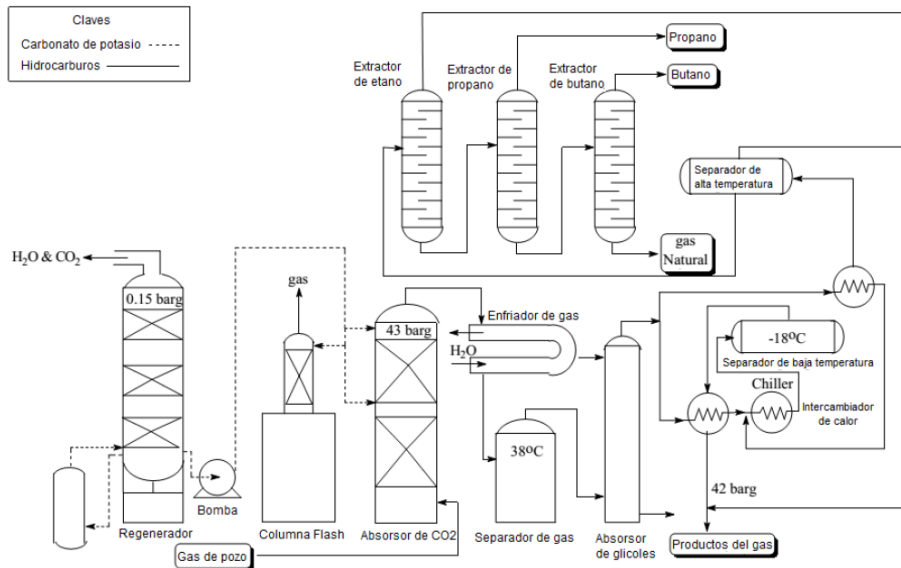
Regeneración del carbonato: La solución de carbonato de potasio es regenerada después de su uso en la torre de adsorción y los productos químicos como el CO₂ y H₂S son ventilados a otras secciones de tratamiento en la planta. Este proceso se lleva a cabo mediante el ingreso de la solución caliente de 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 manera¹³:



¹² NEW ZEALAND INSTITUTE OF CHEMISTRY. The processing of natural gas at kapuni. Kapuni Natural Gas, Nueva Zelanda. 2008. P. 1

¹³ Ibid., P. 2

Figura 4. Diagrama de planta de procesos de separación del GLP a partir del gas natural.



Fuente: NEW ZEALAND INSTITUTE OF CHEMISTRY. The processing of natural gas at kapuni. Kapuni Natural Gas

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 calentamiento¹⁴.

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

¹⁴ NEW ZEALAND INSTITUTE OF CHEMISTRY. The processing of natural gas at kapuni. Kapuni Natural Gas, Nueva Zelanda. 2008. P. 3

butano pueden ser mezcladas en relaciones molares apropiadas para su uso vehicular¹⁵.

¹⁵ Ibid., p 5

2. CONVERSION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA CON GASOLINA COMO CARBURANTE A UN MOTOR CON GLP COMO CARBURANTE

Diariamente miles de personas necesitan movilizarse desde sus viviendas a sus lugares de trabajo, existen cientos de maneras para hacerlo pero en los últimos años una de las más utilizada ha sido el automóvil, desde su creación este medio de transporte ha tomado gran importancia en la vida diaria, debido a su autonomía para recorrer grandes distancias, su precio cada vez más asequible para la mayoría de personas y su confort se ha convertido en el transporte favorito de millones de personas. Así mismo la responsabilidad social y ecológica es una temática diaria, para lo cual se hace necesario buscar maneras de reducir contaminantes ambientales.

2.1 HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

En 1895, Karl Benz fabricó el primer automóvil con motor de explosión. Pocos años más tarde, Rudolf Diesel patentó un motor de combustión interna mucho más eficiente que los existentes en esa época, el cual se alimentaba con aceite vegetal. Dicha invención supuso un hito para el desarrollo del sector de automoción. Desde entonces, los vehículos han experimentado cambios tecnológicos constantes que han implicado, además del desarrollo del propio motor, una evolución constante de los combustibles, los lubricantes y los procesos asociados con su producción. Las demandas continuas de innovación han implicado tener que enfrentarse a retos tecnológicos no resueltos hasta ese momento, buscando soluciones económicamente aceptables para la sociedad.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Las características de un motor de combustión interna dependerán de varios factores, entre estos se encuentran el proceso de combustión del motor, el combustible utilizado para su movimiento, los ciclos de trabajo, el sistema de mezclado del combustible, los sistemas de control de gases de combustión y su diseño de fabricación.

Los motores de combustión interna aprovechan la energía que el combustible desprende al ser mezclado con aire y generando su combustión, esta energía se transforma por medio de sistemas de bielas y manivelas en energía rotacional que es la que genera el movimiento.

2.2.1 Combustión y ciclo termodinámico Dentro de los ciclos termodinámicos que se encargan de la combustión interna en el motor podemos diferenciar dos tipos, una gran mayoría de automóviles se componen de Motores encendidos por chispa (ciclo Otto) y Motores encendidos por compresión (ciclo Diésel).

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 5 el procedimiento como tal consiste:

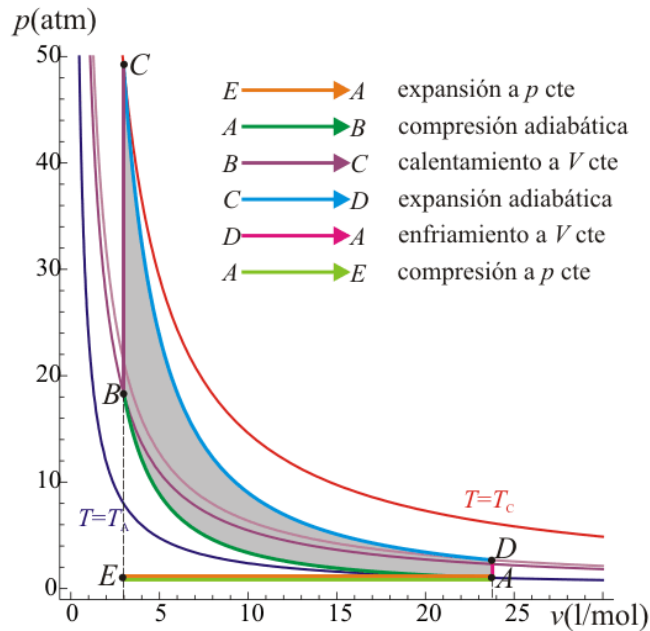
Tiempo de admisión: En el primer tiempo, una mezcla de gasolina y aire entra en la cámara de combustión del cilindro. Para ello el pistón baja del punto superior del cilindro al inferior, mientras que las válvulas de admisión se abren y dejan entrar esa la mezcla en la cámara del cilindro, para cerrarse posteriormente¹⁶. Este tiempo se observa en la etapa E-A-B del ciclo termodinámico en la Figura 5.

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. Este tiempo se observa en la etapa B-C del ciclo termodinámico en la Figura 5 la gasolina y el aire se comprimen dentro de la cámara de combustión debido a que se reduce el volumen de la mezcla, además las moléculas chocan entre sí con una mayor frecuencia (espacio reducido y mayor presión) aumentando con esto la temperatura de la mezcla y preparándola para el siguiente tiempo).

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. Este tiempo se observa en la etapa C-D del ciclo termodinámico en la Figura 5 Es en este preciso momento, con la mezcla comprimida y a una alta temperatura, es cuando la bujía genera una chispa que genera un frente de llama y con este se va consumiendo la mezcla y creando la explosión, 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.

¹⁶ WU, Chih. Thermodynamics and heat powered cycles: A cognitive engineering approach. New York: Nova science publisher. 2007. P 157-178.

Figura 5. Diagrama de presión vs volumen del ciclo otto.



Fuente: <http://laplace.us.es/index.php/Archivo:Ciclo-otto-exacto.png>

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 aire¹⁷ Este tiempo se observa en la etapa D-E-A del ciclo termodinámico en la Figura 5.

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. La apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape se sincroniza por medio de levas conectadas al cigüeñal esto para asegurar que la apertura de la válvula de escape sea en el tiempo de escape de los gases de combustión.

Para el funcionamiento de los motores de combustión interna se pueden usar diferentes 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

¹⁷ WU, Chih. Thermodynamics and heat powered cycles: A cognitive engineering approach. New York: Nova science publisher. 2007. 659p.

(GLP), por otro lado, entre los combustibles gaseosos se encuentran el metano, propano (GLP), butano (GLP), hidrogeno, entre otros.

2.3 COMBUSTIBLE

Según la norma europea, DIN EN 228 los principales factores que se deben tener en cuenta para un buen combustible son la densidad, la calidad antidetonante (número de octanaje), presión de vapor, contenido de benceno y de sulfuros. La importancia de los dos últimos factores radica en que al reducir estos se aporta al cuidado del medio ambiente disminuyendo 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.

2.3.1 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. 2004¹⁸, 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.

2.3.2 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. Dependiendo del diseño y composición del combustible, la flama provocada en un motor de combustión interna puede tener una velocidad de propagación (frente de llama) 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.

¹⁸ SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, SAE INTERNATIONAL. Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and perspectives. Warrendale: R. van Basshuysen & F. Schafer, 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.

2.3.3 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).

2.3.4 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 tuvieran 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. 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/v¹⁹

2.3.5 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

¹⁹ SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, SAE INTERNATIONAL. Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and perspectives. Warrendale: R. van Basshuysen & F. Schafer, 2004.

calidad DIN EN 228, los combustibles de hidrocarburos líquidos no deben poseer más de 150 mg/kg de compuestos de sulfuros.

2.4 IMPLEMENTACIÓN DEL GLP EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES

El GLP actualmente es el combustible gaseoso con mayor extensión en el mundo, potencia millones de vehículos en varios países, en particular Australia, Canadá, Italia, Japón, Corea, Países Bajos, Nueva Zelanda, Tailandia, Estados Unidos, España y Argentina entre otros. Como combustible para encendido en motores de combustión interna ciclo Otto, tiene muchas de las mismas ventajas que el gas natural con una adicional, es más fácil de llevar en el vehículo. El planteamiento anterior, se debe a que en las investigaciones realizadas en motores de combustión interna por Faiz²⁰, 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.

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 (760 kg/m³ gasolina y 2.261 kg/m³ GLP @ 15°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%²¹.

El funcionamiento de un vehículo con GLP dependerá del sistema de suministro de combustible (líquido o gaseoso), la fabricación del vehículo (si posee o no

²⁰ FAIZ, Asif; WEAVER, Christopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles. Washington D.C.: The World Bank. 1996. 266p.

²¹ESLAVA SARMIENTO, Andres Felipe. Generación eléctrica a partir de la operación de un motor de combustión interna en modo dual con gas licuado de petróleo e hidrógeno. Tesis de magister en ingeniería mecánica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingenierías. 2014. 114p

carburador) y la tecnología que se desee utilizar en este, al pasar de los años estos sistemas han tenido diferentes características, las cuales se pueden organizar en las siguientes 4 generaciones:

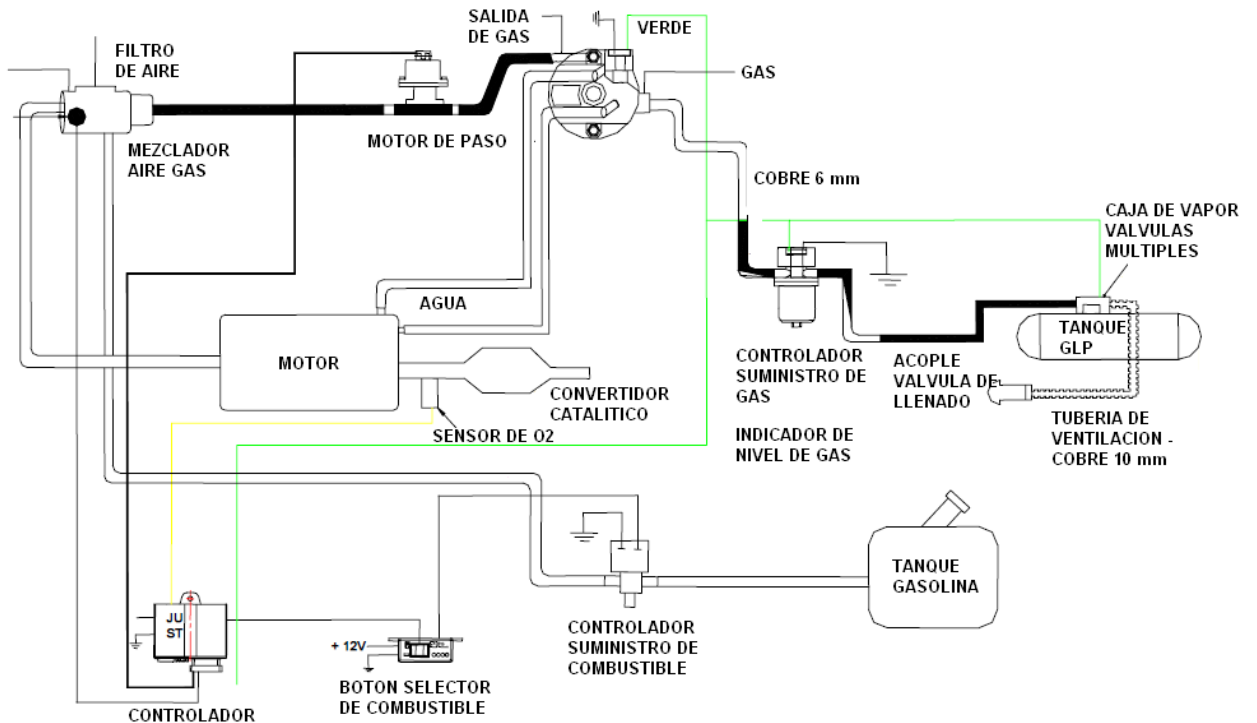
Generación I: Es el primer sistema de GLP implementado en un vehículo, la cual no cuenta con un control de oxígeno mediante un sensor de señales en el tubo de escape del vehículo. Este sistema no garantiza la relación estequiométrica de la combustión del GLP en el motor, y por lo tanto, los vehículos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

Generación II: Son aquellos sistemas de inyección, que 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.

Figura 6. Instalación de GLP diagrama esquemático.



Fuente: INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles.

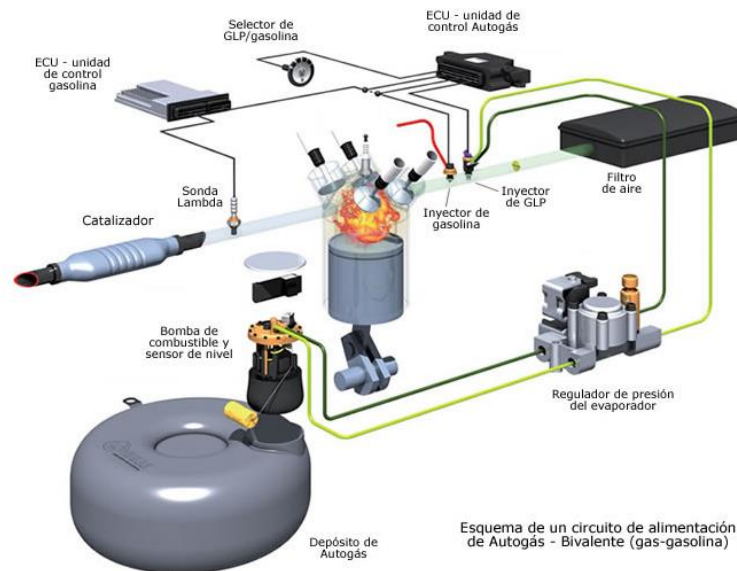
Para algunas de estas generaciones es deseable tener el fluido líquido en todo momento, lo cual puede ser particularmente difícil de proveer de acuerdo a las altas temperaturas de algunas regiones del país. Especialmente, durante las caídas de presión en el flujo del combustible hacia el motor en la 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 figura 16 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.

El mecanismo de funcionamiento general del sistema de inyección del GLP, es muy similar al usado cuando se suministra 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). 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.

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), Por último, el motor de cuatro tiempos sigue el funcionamiento explicado anteriormente, mientras los sistemas de control del GLP almacenan y procesan la información del rendimiento, consumo y emisiones del vehículo en tiempo real. Una breve descripción general de los equipos y accesorios del Kit de conversión se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Esquema de un circuito de alimentación de autogas - bivalente (GLP-Gasolina)



Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.com/images%20GLP/autogas-bivalente-esquema.jpg>

2.4.1 Depósito de GLP y accesorios. El depósito de combustible es un recipiente donde se almacena el GLP en estado líquido, el GLP se almacena en una cavidad, denominado depósito, que se encuentra ubicado bajo el compartimento de carga del vehículo (cilindro ubicado en el maletero del vehículo), o bien, en el hueco reservado para la rueda de repuesto (depósitos tóricos como se muestra en la Figura 8) este último obliga a dotar al vehículo de un Kit antipinchazos en sustitución de la rueda de repuesto. Para efectuar la correspondiente carga del depósito, se ha previsto una boca de llenado para Gas GLP, la cual se encuentra ubicada en el lateral del vehículo. Mediante dicha boca de carga pasa el combustible por una tubería hacia el depósito. Éste, a su vez, dispone de una válvula de llenado con corte automático al 80% de su capacidad

teórica (lleno de agua). Según Indian Auto LPG Coalition²², 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.

Figura 8. Diseño del depósito de GLP tipo tóricos.



Fuente: INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles

A diferencia de los cilindros de GLP para usos domiciliarios, 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. Actualmente estos se ensamblan con otros mecanismos de seguridad para el montaje, llenado y suministro de GLP en el vehículo, estos son²³:

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. Conectado a la válvula de llenado se instala una unidad de llenado a distancia, que permite rellenar el depósito desde el exterior y que incorpora una válvula que evita el retroceso de flujo. Existe un indicador, que permite visualizar el nivel del líquido existente en el depósito, tanto en un reloj ubicado en el depósito, como en un indicador incluido en el conmutador de cambio de combustible. El depósito tiene una válvula de seguridad con apertura por exceso de presión y tarada a la presión que marca la reglamentación.

²² INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles. India. Enero, 2008. 36p.

²³ INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles. India. Enero, 2008. 36p.

Válvula de servicio: Este dispositivo provee el suministro/corte de GLP hacia el motor según la posición de la llave de encendido del vehículo, con un dispositivo de seguridad para evitar el exceso de flujo de gas hacia el motor. Este dispositivo asegura que en caso improbable de rotura de la tubería de conducción de gas, se interrumpa automáticamente la salida de GLP del depósito. La apertura de esta válvula es eléctrica y se acciona mediante el conmutador que selecciona el combustible. Dicha válvula se cierra automáticamente cuando el motor no gire (cualquiera que sea la posición del interruptor de encendido), permaneciendo cerrada mientras el motor siga sin girar.

Por medio de la tubería de gas se transporta el GAS hasta el compartimiento del motor, donde va instalado el reductor de presión, que reduce la presión del gas hasta 90 kPa que es la presión a la que trabajan los inyectores de gas. El calor necesario para la gasificación del GLP en estado líquido se consigue haciendo circular el agua del circuito de refrigeración del motor a través de una cámara diseñada a tal efecto en el reductor- evaporador.

Fijada al reductor de presión directamente se instala una electroválvula de corte de gas, accionada a distancia. Siendo su funcionamiento, de tal forma que la alimentación de GLP al motor se corta:

- Cuando el encendido se interrumpe.
- Cuando el motor se para.
- Cuando se selecciona el sistema de alimentación por otro combustible (gasolina).
- Cuando disminuye la presión del gas.

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.

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 22.2 kg/cm^2

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.

Indicador de contenido: Es un dispositivo de indicador visual que permite conocer el nivel o cantidad de GLP almacenado en el depósito del vehículo.

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.

2.4.2 Sistema de suministro de GLP. En la Figura 9 se muestra el esquema de instalación de GLP para un motor de inyección de multipunto, si bien en la actualidad ya existen motores que provienen de fábrica para ser usados con combustible GLP, en este esquema se muestra un sistema bivalente para el uso tanto de GLP y gasolina en un mismo vehículo la muestra la instalación típica en un automóvil.

Regulador-vaporizador: Este es un componente que se encuentra conectado al sistema de refrigeración del automóvil. En el 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.

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.

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.

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 GLP²⁴.

2.4.3 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

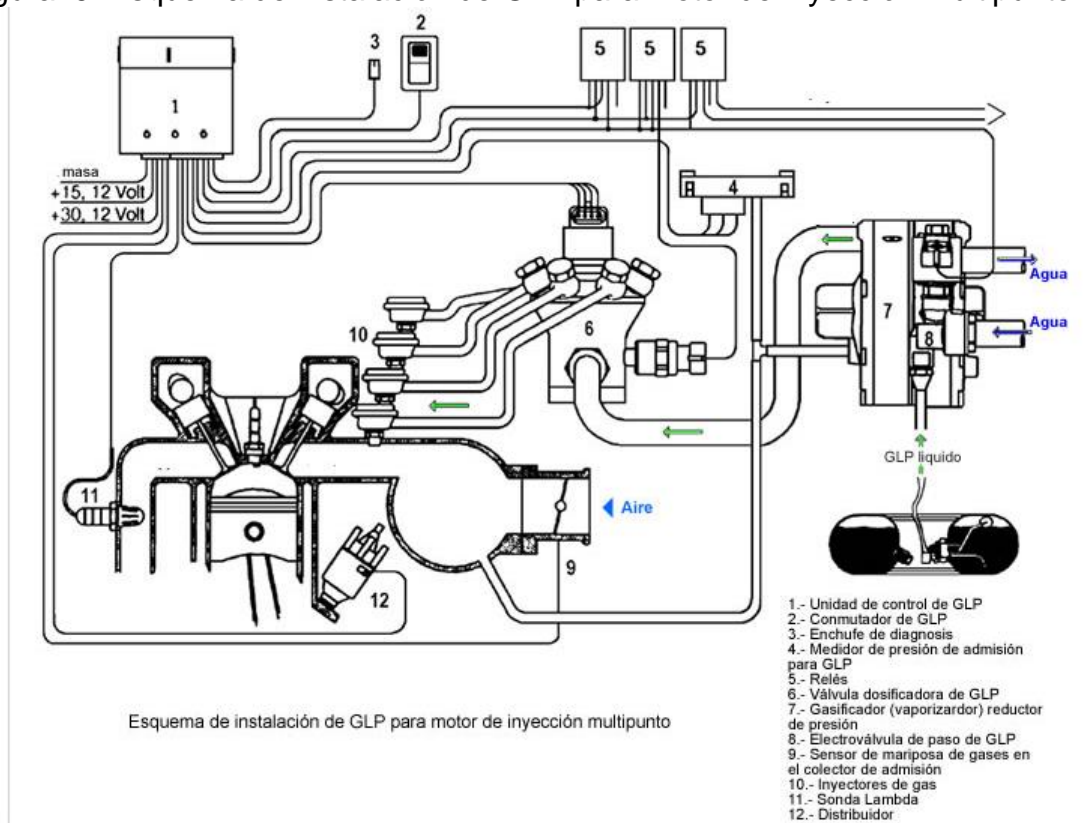
²⁴ INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles. India. Enero, 2008. 36p.

es obtenida mediante señales de presión de vacío antes de entrar a los cilindros del motor²⁵.

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

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.

Figura 9. Esquema de instalación de GLP para motor de inyección multipunto.



Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.com/images%20GLP/glp-multipunto.jpg>

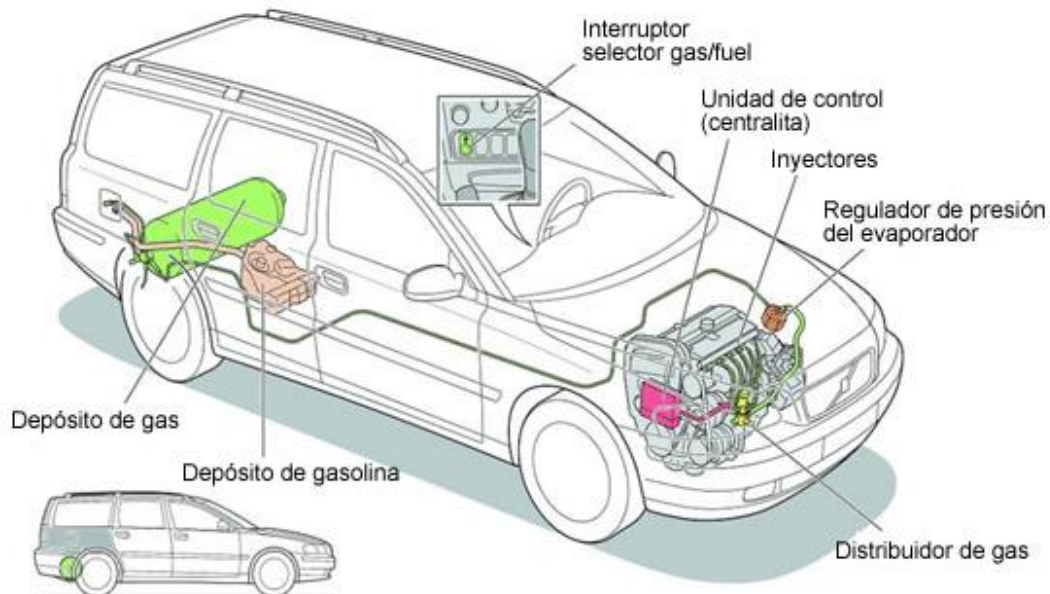
Sistema de control LAMBDA (ECU): Este dispositivo realiza las mediciones de contenido de oxígeno en el escape del motor y envía señales hacia el controlador de aceleración del motor para controlar el flujo de GLP de entrada. El acelerador y sistema de control LAMBDA del motor son componentes esenciales del sistema

²⁵ Ibid., p. 25

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/gasolina²⁶.

En la Figura 10 se muestra la instalación típica del kit de conversión para un vehículo bivalente (gasolina y GLP), muchos dueños de vehículos prefieren esta configuración, la autonomía del vehículo aumenta debido a la facilidad de llenar los tanques de gasolina en caso tal que la cobertura de GLP no sea suficiente, además la instalación del equipo de GLP no modificamos en nada la estructura interna del vehículo; solo le añadimos un nuevo equipo. La instalación del equipo es tan sencilla que no dura más de 8 horas.

Figura 10. Instalación típica de un sistema bi-fuel en un vehículo



Instalación de un sistema Bi-Fuel en un vehículo

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.com>

2.5 VENTAJAS DEL GLP UTILIZADO EN VEHICULOS.

Desde el uso de gasolina como combustible automotor y el descubrimiento de los daños causados por los gases de combustión, se ha buscado la manera de mitigar el impacto ambiental, pasando desde mejoras en la gasolina hasta casos en los

²⁶ INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles. India. Enero, 2008. 36p.

cuales se ponen a prueba nuevos combustibles derivados de hidrocarburos o de energías alternativas. 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” en la ciudad de Santiago de Chile²⁷. El experimento tomo 6 meses y 13 vehículos, 11 de ellos de una flota representativa y 2 completamente nuevos como elementos de control nueve buses fueron de similares prestaciones funcionando siete de ellos con combustible Diésel y dos con gasolina convencional respectivamente. 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, 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 4, como los tres buses con alimentación de GLP son los que más emisiones de CO y NOx producen con respecto a los que usaron gasolina, Diésel 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 experimento²⁸.

El GLP tiene muchas de las mismas características de emisión que tiene el gas natural. Sobre una base energética, el GLP tiene un Menor contenido de carbono que la gasolina o el diésel. Cuando se utiliza en motores de encendido por chispa, el GLP produce emisiones de material particulado cercanas a cero, muy poco CO y HC moderado. Variaciones en la concentración de diferentes hidrocarburos en el GLP pueden afectar la composición específica y la reactividad de las emisiones de escape de HC. Como olefinas (como el propeno y el buteno) son mucho más reactivos y contribuyen a la formación de ozono que las parafinas (tales como el propano y los butanos), un aumento en el contenido de olefina en el GLP es probable que dé lugar a una mayor formación de ozono potencial en las emisiones de escape. Debido a la estanqueidad del gas y los sellos requeridos en el sistema de combustible, Las emisiones son insignificantes. Las emisiones de GLP durante el llenado son insignificantes, y los códigos estadounidenses requieren una ventilación de vapor en el tanque que se va a abrir para evitar el

²⁷ COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, CNE. “Contaminación Atmosférica: Análisis de Alternativas de uso de Petroleo Diesel en Vehículos de Locomoción Colective de Santiago.” Santiago, Chile., 1988. P. 5-9

²⁸ FAIZ, Asif; WEAVER, Chistopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles. Washington D.C.: The World Bank. 1996. 266p.

sobrellenado. Las emisiones de escape de NMHC y CO son más bajas con GLP que con gasolina. Las emisiones de dióxido de carbono También son algo más bajos que los de la gasolina debido a la menor relación carbono-energía y a la mayor calidad de octano De GLP. Las emisiones de NOx son similares a las de la gasolina usada en los vehículos, y se puede controlar con eficacia usando catalizadores de tres vías. En general, el GLP proporciona menos beneficios en la calidad del aire comparado con el GNC principalmente porque las emisiones de hidrocarburos son fotoquímicamente más reactivas y las emisiones de monóxido de carbono son mayores. Los modelos europeos modernos logran resultados impresionantes en la reducción de emisiones. El promedio de emisiones y consumo de combustible para cinco coches de pasajeros de doble gasolina equipados con catalizadores de bucle cerrado y equipos de LPG de tercera generación se resumen en la 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 (NOx), 19% de componentes orgánicos volátiles, 18% de monóxido de carbono (CO) y 14% de otros compuestos contaminantes. De lo anterior, tomando como base el estudio del caso chileno, Ning, Z., & Chan., T. L. 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, 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.

Tabla 5, Las pruebas se realizaron sobre el ciclo ECE + EUDC. La Tabla 6 muestra Los datos de emisiones limitadas disponibles para los vehículos de GLP usado en California.

Tabla 4. Resultados de las pruebas de uso de combustibles alternativos en la ciudad de Santiago de Chile.

CADEBUS (Ciclo de manejo en Santiago de Chile) ^a					
ID Bus /combustible	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	1.730	-

- No aplicable

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

b. Con convertidor catalítico

Fuente: FAIZ, Asif; WEAVER, Chistopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles.

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. De lo anterior, tomando como base el estudio del caso chileno, Ning, Z., & Chan., T. L.²⁹ mencionan que, en el año 1998, la ciudad de Hong Kong realizó un plan piloto para el reemplazo de taxis con combustible diésel hacia 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, 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.

Tabla 5. Comparación de emisiones y consumo de combustible para 5 vehículos bi-valentes europeos operando con gasolina y GLP.

²⁹ NING, Ziu y CHAN, Tat Leung. On-road remote sensing of liquefied petroleum gas (LPG) vehicle emissions measurement and emission factors estimation. Atmospheric Environment, Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2007. 130p.

Emisiones y consumo de combustible	Gasolina	GLP
CO	0.87	0.72
HC	0.14	0.12
NOx	0.12	0.16
Consumo de combustible	8.7	11.3
Energía consumida	2.8	2.7

Fuente: FAIZ, Asif; WEAVER, Chistopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles.

Tabla 6. Polución para vehículos funcionando con GLP en California.

Tipo de vehículo	NOx	NMHC	CO
Vehículo de pasajeros (ligero)	0.2	0.15	1.0
Vehículo de servicio pesado	2.8	0.5	23.2

Fuente: FAIZ, Asif; WEAVER, Chistopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles.

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 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. Por otro lado, las emisiones de hidrocarburos disminuyen conforme se aumenta en el rango de velocidad instantánea de los vehículos entre 10 km/h. Y por último, las emisiones de óxidos nitrosos (NOx) disminuyen levemente hasta los 35 km/h, más allá de esta velocidad las emisiones se incrementan considerablemente.

3. 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.

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO NACIONAL DEL GLP

La producción de GLP en Colombia tiene sus inicios en los años 30, en esta década varios compradores abrieron el mercado, para aquel entonces la única empresa que manejaba la producción era ECOPETROL, la cual poseía el monopolio y manejaba la venta del combustible por medio de contratos con las empresas. En ese entonces, la producción del GLP 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 (lo que hoy en día se conocerían como propanoductos virtuales), 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 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. A partir de los 2005 nuevos campos empezaron aportar a la producción de GLP, entre estos el campo Rancho Hermoso localizado en el departamento de Casanare, el cual producía petróleo y gas natural, luego en el 2010 el campo Diana comenzó a aportar gas licuado de petróleo a la oferta nacional, y a partir de noviembre de 2011 se sumó la producción de Cusiana. Esta nueva situación fue motivada por el aumento de la actividad de exploración y producción tras la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH³⁰.

El aporte a la oferta de GLP de otros productores diferente de Ecopetrol ha variado a lo largo del 2005 hasta la fecha, evidenciándose grandes aportes de estos productores entre los años 2013 y 2014 donde sus porcentajes de aporte

³⁰ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. P 20.

estuvieron alrededor del 6% en estos dos años. Para el 2016 el GLP comercializado para el servicio público domiciliario proveniente de productores diferente a Ecopetrol decayó en 1%, ya que muchos campos que aportaban a la oferta de GLP dejaron de producir este hidrocarburo.

Para el año 2002 se contaba con una producción diaria de 24.660 barriles de GLP y para el 2016 esta producción ha decaído en un 39 % llegando a una producción para este año de 15.035 BPD de GLP, siendo la refinería de Barrancabermeja el mayor responsable de la contracción de la producción de GLP en Colombia, ya que de producir 19.906 BPD en el año 2002 pasa en el 2016 a una producción de GLP de 5.043 BPD equivalente al 74,6% la disminución de la producción de GLP de la refinería de Barrancabermeja en este lapso de tiempo. Esta fuerte caída de la producción de GLP se debe principalmente por la masificación del gas natural, que ha quitado mercado a los comercializadores del GLP, ya que la oferta de este hidrocarburo se promueve por la demanda del mismo.

Unos de los aspectos positivos que ayudaron a la oferta de GLP en Colombia es la participación del campo Cusiana el cual ha incrementado su producción en un 1.973% al producir 264 BPD de GLP en el año 2011 a 5.210 BPD en el año 2016, según lo reportado en el Sistema Único de Servicios Publico SUI. La reciente producción de este campo ha superado la producción de productores tradicionales como la refinería de Cartagena y el campo Apiay en Villavicencio, en tan solo 4 años (2012 a 2016). La producción de la refinería de Cartagena se ha mantenido estable, esta 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 años 2002 al 2013 y a pesar de disminuir el volumen disponible para el consumo interno, debido al aumento de las exportaciones de GLP, empezó a reabastecer al país en el último año. De manera general, Colombia cuenta con un promedio de producción de GLP de entre 18000 - 20000 BPD y las distintas fuentes de suministro se pueden visualizar en la Tabla 7.

La Figura 11 evidencia la producción del GLP por fuente de suministro en la cual se puede identificar el cambio a partir del 2010 por la incorporación de los campos de Cusiana y Diana que modificaron la tendencia que presentaba la producción de GLP en años anteriores, aunque dichos campos ubicados en el departamento de Huila y Casanare respectivamente, han disminuido su contribución a la oferta nacional a partir del año 2012 debido a la declinación natural de los yacimientos de estos campos. En términos generales en la oferta de GLP el aporte de las refinerías es del 57,64% y el 42,35% corresponde a otras fuentes como es el caso de los campos de gas natural. Este comportamiento es contrario a la tendencia

mundial, donde la mayor parte del GLP producido proviene del desarrollo de los campos de gas natural.

Tabla 7. Producción de GLP por fuentes de suministro.

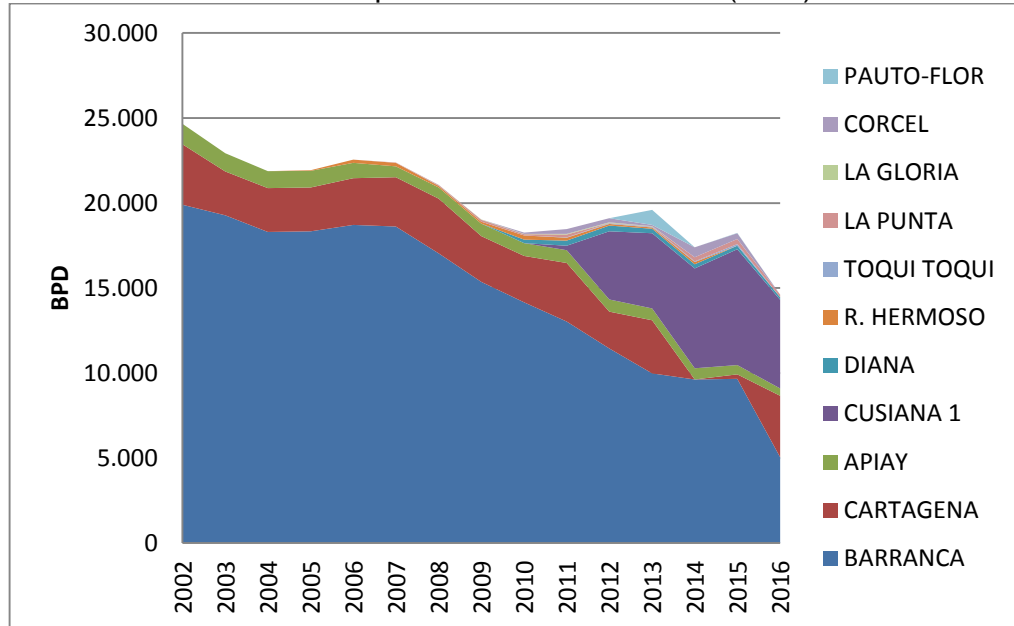
AÑO	ECOPEPETROL					CANACOL	INTER OIL	VETRA	PERENCO	PETROMIN ERALES	TERMOYOP AL	OTROS	TOTAL
	BARRANCA	CARTAGENA	APIAY	CUSIANA 1	DIANA	R. HERMOSO	TOQUI - TOQUI	LA PUNTA	LA GLORIA	CORCEL	PAUTO-FLOR	PRODUCTOR	PRODUCCION
	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	BPD	%	BPD
2002	19,906	3,552	1,201									0%	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
2014	9,628		647	5,873	257	120	43	242		593		6%	17,411
2015	9,659	266	539	6,823	203		91	303		347	16	4%	18,644
2016	5,043	3,624	434	5,210	154			151				1%	15,035

Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Balance de gas natural en Colombia 2016-2025.

En los últimos años se ha mencionado la exploración offshore en busca de gas natural sobre el caribe colombiano, en el pozo Orca-1, en el bloque Tayrona, (agua de la guajira) y Kronos en el bloque del Fuerte Norte, cerca del golfo de morrosquillo, también en el caribe; un hallazgo significativo en el valle inferior del magdalena, que ha aportar más de 80 GBTUDE en el 2016³¹.

³¹ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Balance de gas natural en Colombia 2016-2025. Bogotá D.C. 2016.

Figura 11. Producción de GLP por fuente de suministro (BPD)



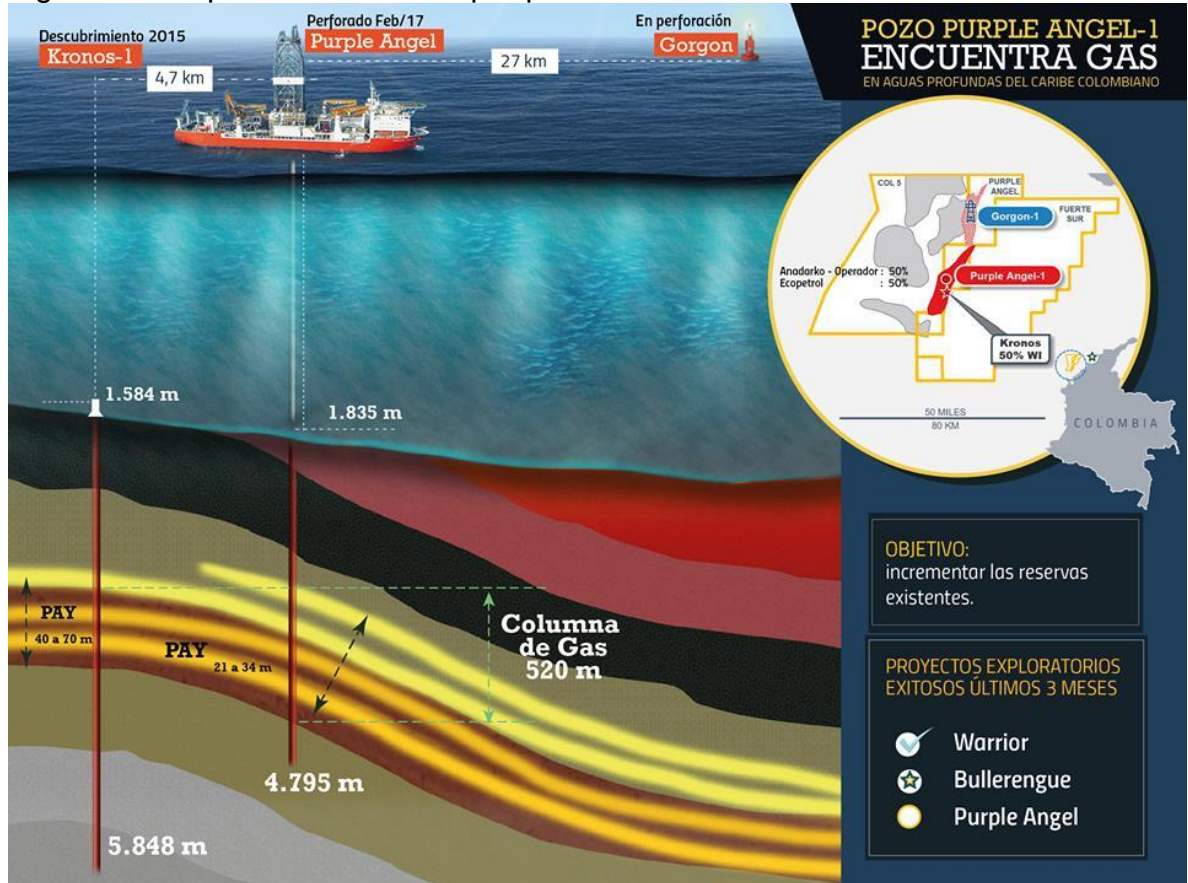
Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Balance de gas natural en Colombia 2016-2025.

En la actualidad ECOPETROL lidera un proyecto en aguas profundas de la zona del Caribe colombiano, según la compañía se ha hecho un hallazgo en el pozo purple angel-1 donde el pozo alcanzó una profundidad de 4.795 metros, que incluyen una lámina de agua de 1.835 metros, este hallazgo confirma la presencia de gas en intervalos (“pay”) cuya suma total es de 21 a 34 metros de espesor neto (70 y 110 pies) la Figura 12 muestra un esquema del plan estratégico de ECOPETROL para este año, en donde también se evidencia los hallazgos antes mencionados, el descubrimiento comprobó la extensión del yacimiento de gas descubierto con Kronos-1 en julio de 2015, es decir que ratifica la presencia de una columna de gas en este campo de 520 metros. La participación de este bloque esta 50% y 50%, entre Ecopetrol y la compañía Andarko, socio de la petrolera estatal también en otros proyectos.

Según ECOPETROL la exploración en esta zona está en aumento, lo que confirma y amplía el potencial del Caribe colombiano, una de las áreas foco de la nueva estrategia exploratoria. Los resultados de Kronos-1 y Purple Angel-1, que se suman al descubrimiento reciente en Warrior en el Golfo de México (Estados Unidos)³².

³² ECOPETROL S.A. boletín 2017 [En línea]. Bogotá D.C.: ECOPETROL S.A., 2017. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-2017/boletines-2017/purple-angel-1-encuentra-gas>

Figura 12. Exploración offshore por parte de ECOPETROL



Fuente: ECOPETROL S.A. boletín 2017 [En línea].

3.2 CALIDAD DEL GLP

El GLP de uso domiciliario, industrial y automotor debe asegurar un nivel de calidad apto para su funcionamiento, 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, los productores de GLP han de apegarse a ciertos estándares internacionales para asegurar dicho propósito, el seguimiento a la calidad se hace 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 automotor³³ por lo tanto, se hace importante que el GLP cumpla con las especificaciones de calidad, los métodos de pruebas en laboratorio se hagan siguiendo los estándares internacionales y las normativas internacionales de uso automotor sean cumplidas en el momento de realizar los contratos de compraventa con cláusulas específicas de calidad.

3.2.1 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. De este modo, Totten³⁴, 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 las distintas composiciones de GLP 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 GLP³⁵.

³³ GARCÍA LENIS, Juan y VERGARA CASTAÑEDA, Luis. Control de calidad del gas natural y los gases licuados del petróleo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 1998. 161p.

³⁴ TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003.

³⁵ PINZÓN ANGULO, Nataly. Diseño conceptual, protocolo y normas específicas para la utilización de los laboratorios de gases licuados del petróleo. Bucaramanga.: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2010, 140p.

3.2.2 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, es la suma de las presiones de vapor individuales de cada componente multiplicada por su fracción molar en la mezcla, ésta condiciona la presión de los contenedores donde será almacenado el gas, las válvulas de seguridad y establece las certificaciones los mismos las cuales garantizan la estabilidad termodinámica del combustible durante el transporte o en estado estático.

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).de lo anterior sabemos que 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 este³⁶.

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

³⁶ TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003. P 115.

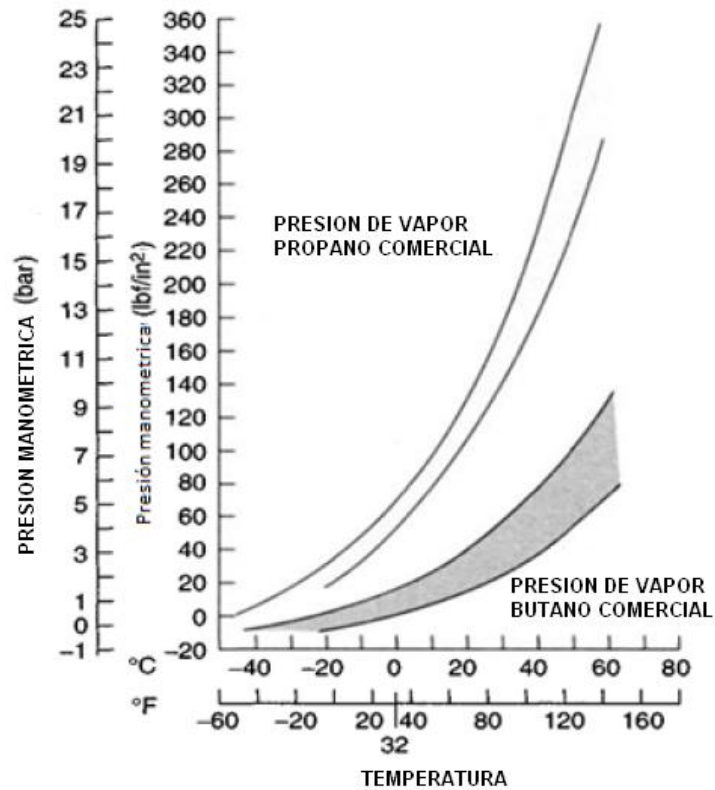
de metano, ya que no se poseen datos de presión de vapor en presencia de este, por lo tanto, en este caso es necesario realizar un cálculo manual en algunas circunstancias. Además, otra consideración importante, es que el cálculo de la presión de vapor en la norma ASTM D2598-02 tiende a ser medianamente 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 experimentalmente³⁷.

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.

Con el propósito de hallar esta y otras relaciones de presiones de vapor con temperatura, la Figura 13 muestra presiones de vapor típico 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.

³⁷ TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003. P. 123.

Figura 13. Curvas de presión de vapor con respecto a la temperatura para propano y butano comercial.



Fuente: DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition.

3.2.3 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, debido a que este tendera acumularse en el suelo muy similar a las fugas de gasolina. 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 regiones³⁸.

Las mezclas de GLP provenientes de procesos de refinamiento con composiciones diferentes, generan gases al interior del recipiente de almacenamiento por el calor que recibe del mismo, estos tienden a presentar 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.

3.2.4 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 8.

Tabla 8. Valores típicos de poderes caloríficos.

Poder calorífico Gases	$\frac{MJ}{sm^3}$	$\frac{BTU}{sft^3}$	$\frac{MJ}{kg}$	$\frac{BTU}{lb}$
	Propano comercial	93.1	2500	50.0
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

Fuente: DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition.

3.3 CALIDAD DEL GLP EN COLOMBIA.

Con lo anterior debemos tener en cuenta que el país produce variadas composiciones químicas de GLP (lo que tiene gran influencia en la calidad del GLP) obtenidas de diferentes campos y procesos, a continuación, se muestran

³⁸ DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition, Gran Bretaña: MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002, 915p.

algunas de las composiciones típicas encontradas en los campos más representativos y en las refinerías.

La calidad del GLP obtenido en Colombia a través de equipos de procesos de separación de los líquidos del gas natural, dependerán del campo en el que se encuentren, en la Tabla 9 se muestra la calidad del GLP por un periodo de 6 años 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.

Tabla 9. Calidad del GLP - Cusiana

CUSIANA									
AÑO	% C1, C2 y C2H4	%C3	%Propileno	%C4	%C5 y +	%N2	Densidad relativa	P. Calorífico (BTU/lb)	Presión de vapor (psig)
2011	2.76	48.80	0.00	47.83	0.61	0.00	0.54	21325.26	128.80
2012	2.84	53.21	0.00	43.73	0.22	0.00	0.53	21342.97	135.66
2013	2.00	51.45	0.00	46.24	0.32	0.00	0.54	21327.75	126.68
2014	0.87	50.85	0.00	48.02	0.19	0.00	0.54	21284.94	119.78
2015	1.31	51.41	0.00	47.06	0.21	0.00	0.54	21320.58	121.45
2016	2.24	52.53	0.00	44.82	0.41	0.00	0.53	21334.41	129.70

Fuente: Sistema único de información SUI, boletín balance de GLP, 2016

La Tabla 10 muestra la calidad del GLP obtenido por el campo de Apiay en donde se presenta una diferencia en el contenido de propano respecto al campo cusiana.

En el Sistema Único de Información de Servicios Público (SUI) solo se encuentra información de calidad suministrada por las diferentes fuentes de producción de GLP del país, lo cual no es lo suficiente representativo del GLP que efectivamente consumen los usuarios finales, ya que esta calidad sufre cambios considerables durante las actividades de transporte, comercialización y distribución, ya que este GLP es producto de la mezcla de diferentes fuentes de producción. Por su posición geográfica los departamentos que más sufren estos cambios de composición del GLP son los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Tolima, Huila y la región de los Llanos Orientales, donde el transporte de este energético se lleva a cabo por medio de tracto- camiones con tanque para GLP.

Tabla 10. Calidad de GLP campo Apiay

APIAY									
AÑO	% C1, C2 y C2H4	%C3	% Propileno	%C4	%C5 y +	%N2	Densidad relativa	P. Calorífico (BTU/lb)	Presión de vapor (psig)
2008	1.36	49.94	0.00	47.93	0.45	0.33	0.54	21242.36	120.25
2009	0.91	54.25	0.00	45.16	0.15	0.29	0.54	21260.47	117.35
2010	0.74	55.93	0.05	42.74	0.30	0.24	0.54	21254.22	134.03
2011	0.36	55.12	0.00	44.03	0.10	0.38	0.54	21221.59	121.29
2012	0.73	54.89	0.00	44.24	0.09	0.04	0.54	21294.52	125.97
2013	0.37	55.08	0.00	44.41	0.08	0.05	0.54	21273.93	126.63
2014	0.65	51.13	4.68	43.25	0.13	0.16	0.54	21254.61	127.26
2015	0.77	56.57	0.00	42.17	0.44	0.05	0.54	21261.80	135.62
2016	0.73	58.04	0.00	40.41	0.78	0.04	0.53	21300.15	128.76

Fuente: Sistema único de información SUI, boletín balance de GLP, 2016

La calidad del GLP obtenido en el campo Toqui-Toqui se muestra en la Tabla 11 tiene la particularidad en su composición con un mayor porcentaje de butano además no muestra trazas de N2, y a lo largo de los últimos años se ha reducido su contenido de propileno hasta llegar a un valor de 0 en el 2015.

Tabla 11. Calidad de GLP campo TOQUI-TOQUI

TOQUI -TOQUI									
AÑO	% C1, C2 y C2H4	%C3	% Propileno	%C4	%C5 y +	%N2	Densidad relativa	P. Calorífico (BTU/lb)	Presión de vapor (psig)
2009	1.02	16.39	21.47	60.35	0.75	0.00	0.56	19632.79	108.18
2010	0.96	22.48	20.94	54.79	0.82	0.00	0.55	19433.46	111.51
2011	0.99	18.11	22.47	57.60	0.82	0.00	0.56	19713.02	96.95
2012	4.19	25.54	15.58	52.81	1.86	0.00	0.54	21443.33	138.61
2013	2.75	39.82	1.45	54.76	1.22	0.00	0.54	21428.18	132.66
2014	2.54	39.45	2.28	54.82	0.91	0.00	0.54	21374.80	113.73
2015	2.40	41.17	0.00	55.71	0.72	0.00	0.54	21264.40	111.80

Fuente: Sistema único de información SUI, boletín balance de GLP, 2016

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 12 La refinera 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 refinera 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 domiciliar nacional actual en los mercados del centro, occidente y parte del norte del país³⁹. Su producción para 2016 disminuyó el porcentaje de butanos y aumento en más de un 4% el contenido de propeno, sin embargo el contenido de olefinas como propileno, 1 - buteno, iso - butileno, trans-2-buteno, cis-2-buteno, 1,3-butadieno, para el año 2016 representan un porcentaje de 44.22% dentro de la mezcla de propanos de 84.61% como se muestra en La Tabla 12. Además de esto el GLP producido en esta refinería es uno de los que contiene la mayor cantidad de pesados C₅+ en su composición y bajos contenido de propano en promedio 8.91%, el más bajo de las principales fuentes de producción de GLP en Colombia.

Tabla 12. Calidad de GLP refinería de Barrancabermeja.

Refinería Barrancabermeja									
AÑO	% C1 , C2 y C2H4	%C3	% Propileno	%C4	%C5 y +	%N2	Densidad relativa	Poder Calorífico (BTU/lb)	Presión de vapor (psi)
2008	0.72	9.28	18.25	71.12	0.64	0.00	0.57	20871.53	92.83
2009	0.41	8.82	12.38	77.76	0.62	0.00	0.58	20881.16	71.54
2010	0.38	9.48	10.72	78.76	0.66	0.00	0.58	20549.08	79.87
2011	0.51	11.93	9.77	77.20	0.60	0.00	0.57	20910.50	80.13
2012	0.69	8.87	4.64	85.19	0.61	0.00	0.58	20908.62	69.20
2013	1.08	9.00	10.61	78.43	0.88	0.00	0.57	20893.70	82.50
2014	0.31	5.65	4.89	88.54	0.61	0.00	0.58	20854.65	62.38
2015	1.72	7.39	4.75	85.35	0.79	0.00	0.58	20895.85	74.32
2016	0.44	9.81	4.41	84.61	0.73	0.00	0.58	20866.90	67.00

Fuente: Sistema único de información SUI, boletín balance de GLP, 2016

En la Tabla 13 se muestran la evolución de la calidad del GLP producido en la Refinería de Cartagena, respectivamente entre los años 2008 y 2016. Estas son las fuentes que para el año 2016 aún mantienen su producción de GLP, atendiendo la demanda de todo el país. Se puede observar la variabilidad que manifiesta este energético al transcurrir de los años, situación que es altamente preocupante para usuarios distintos a los hogares, ya que esta variabilidad crea un cambio continuo en la composición y estabilidad del GLP, lo cual aumenta la cantidad de productos líquidos que pueden quedar atrapados en cilindros y tanque, principalmente por el contenido de olefina y líquidos pesados.

³⁹ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. 63p.

Las fuentes de producción con menos posibilidad de presentar variación en su composición debido a mezclas de diferentes fuentes serían la Refinería de Barrancabermeja y la de Cartagena, ya que el GLP producido en la refinería de Barrancabermeja es transportado directamente a los terminales de Pereira, Manizales, Cartago y Yumbo a través del poliducto. De igual manera la Refinería de Cartagena transporta su producción de GLP a los usuarios de las Costa Atlántica y del Archipiélago de San Andrés y Providencia.

Tabla 13. Calidad del GLP de la Refinería de Cartagena.

Refinería Cartagena									
AÑO	% C1 , C2 y C2H4	%C3	% Propileno	%C4	%C5 y +	%N2	Densidad relativa	P. Calorífico (BTU/lb)	Presión de vapor (psig)
2008	0.00	52.85	1.78	44.94	0.42	0.00	0.54	21256.14	119.20
2009	0.02	57.54	2.76	39.47	0.21	0.00	0.53	21290.57	127.22
2010	0.24	46.09	2.03	51.58	0.05	0.00	0.54	21255.29	112.14
2011	0.04	36.83	1.18	61.40	0.54	0.00	0.55	21209.27	98.33
2012	0.00	52.32	1.04	46.54	0.10	0.00	0.54	21281.76	117.42
2013	0.00	49.50	1.13	49.17	0.20	0.00	0.54	21258.30	113.49
2014									
2015	0.02	93.91	2.65	3.39	0.04	0.00	0.51	21458.51	170.57
2016	0.14	52.80	6.70	40.22	0.14	0.00	0.54	21202.61	126.40

Fuente: Sistema único de información SUI, boletín balance de GLP, 2016

3.4 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 ALPGA⁴⁰ en la definición del estándar del GLP vehicular australiano, tal como se muestra en la Tabla 5-5.

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

⁴⁰ AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Wide Fuel Range Trial - A report on the impact of autogas composition on emissions and other performance of vehicles manufactured in Australia. Australia: 2000. P. 1 - 7

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 menciona⁴¹ 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 salida⁴².

3.4.1 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.

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. No obstante, el mercado actual de GLP en Colombia maneja variaciones importantes

⁴¹ AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Wide Fuel Range Trial - A report on the impact of autogas composition on emissions and other performance of vehicles manufactured in Australia. Australia: 2000. P. 1 - 7

⁴² Ibid., p. 8

en el contenido de estas (0-49% en volumen)⁴³, 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. 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.

3.4.2 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. 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.

Aunque existen diferencias remarcables en las normativas europeas 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%.

3.4.3 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

⁴³ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. 63p.

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).

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

3.4.4 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 1999⁴⁴ 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

⁴⁴ SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, SAE INTERNATIONAL. Butane/propane mixtures as fleet fuels. En: SAE Technical Paper, Diciembre, 1999.

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.

Limites 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 esto como evidencia en mediciones directas⁴⁵.

3.4.5 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.

3.4.6 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.

A continuación, en la Tabla 14, se presenta un resumen de una recomendación de

⁴⁵ CHAPARRO GIGLIO, Mauricio Gabriel. Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano. Tesis de magister en ingeniería de petróleos. Medellín: Universidad nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, 2015. 158p.

Estándar técnico de calidad para el GLP de uso vehicular en Colombia que recopila todas las consideraciones normativas y efectos estudiados.

Tabla 14. Resumen de recomendación de normativa del GLP vehicular para Colombia

		Gas licuado de petróleo vehicular (GLPV)	Métodos de prueba internacionales	Métodos de pruebas colombianas
Presión de vapor manométrico 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 (150 Kpa)		
Presión de vapor manométricos a 41 °F (5 °C)	min	21,7 psig (150 kPa)	ASTM D 1267-02 o AST; D3598-02	NTC 2562:1989 o ASTM D2598-02
Residuos volátiles	Temperatura de evaporación, 95% máximo	36 °F (2.2 °C)	ASTM D1837-02	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 dienios, vol. Max %	0.5	ASTM D2163-91	NTC 2518:1997
	Volumen de pentano y elementos pesados, vol. Max %	2.0	ASTM 2163-91	NTC 2518: 1997
Residuos materiales	Residuos durante la evaporación 100ml, Max, ml	0.05	ASTM D2158-91	NTC 2517: 1986
	Observación mancha de aceite	Aprobado ^C	ASTM 2158-91	NTC 2516:1986
Número 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 2784-98	ASTM 2784-98
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		G	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 (H₂S y S) si el GLP posee agentes inhibidores u otros químicos durante la prueba de lámina de cobre.

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

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

Fuente: CHAPARRO GIGLIO, Mauricio Gabriel. Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano.

3.4.7 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 personas⁴⁶. 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 causa de la problemática anterior, dado a que este disminuye el punto de rocío del agua en la mezcla del GLP⁴⁷.

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 589⁴⁸.

⁴⁶ EUROPEAN LPG ASSOCIATION, AEGPL. European Lpg Association Annual Review. Belgica: 2014 AEGPL p. 16 – 26

⁴⁷ AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Wide Fuel Range Trial - A report on the impact of autogas composition on emissions and other performance of vehicles manufactured in Australia. Australia: 2000. P. 1 - 7

⁴⁸ AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Liquefied Petroleum Gas as an Automotive Fuel - An Enviromental and Technical Perspective. Australia: ALPGA., 1998. P. 102

4. DISTRIBUCCION DE GLP EN COLOMBIA

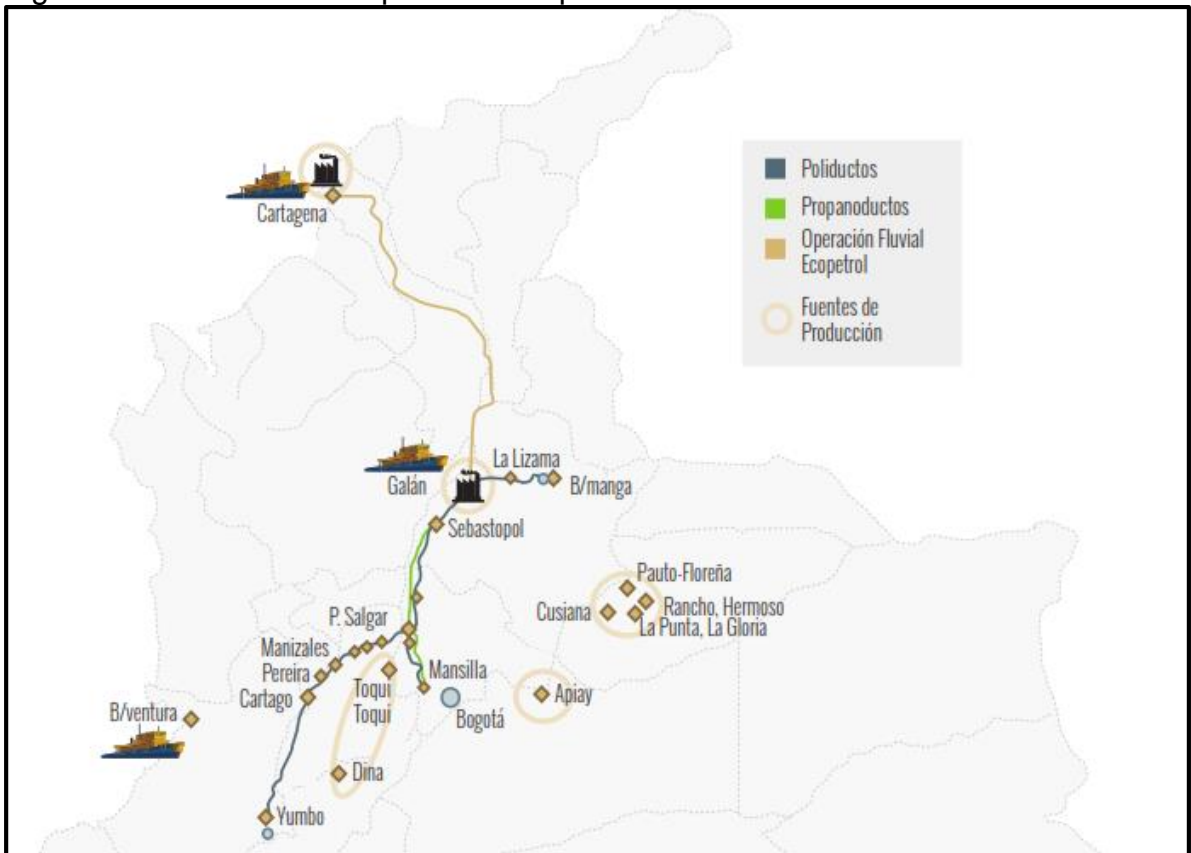
En la década de los años treinta el transporte de GLP se hacía mediante carro tanques (gasoductos virtuales) no fue hasta la década del cincuenta, que el transporte del hidrocarburo se dio por propanoductos o poliductos (gracias a la creación de estos mismos) desde las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja hasta los centros de almacenamiento y de ahí se han movilizado 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 y fue construida en la década de los 70 (ver Figura 14). 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.

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 refinerías 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 nacional⁴⁹.

⁴⁹ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. 63p.

Figura 14. Infraestructura para el transporte de hidrocarburos



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo

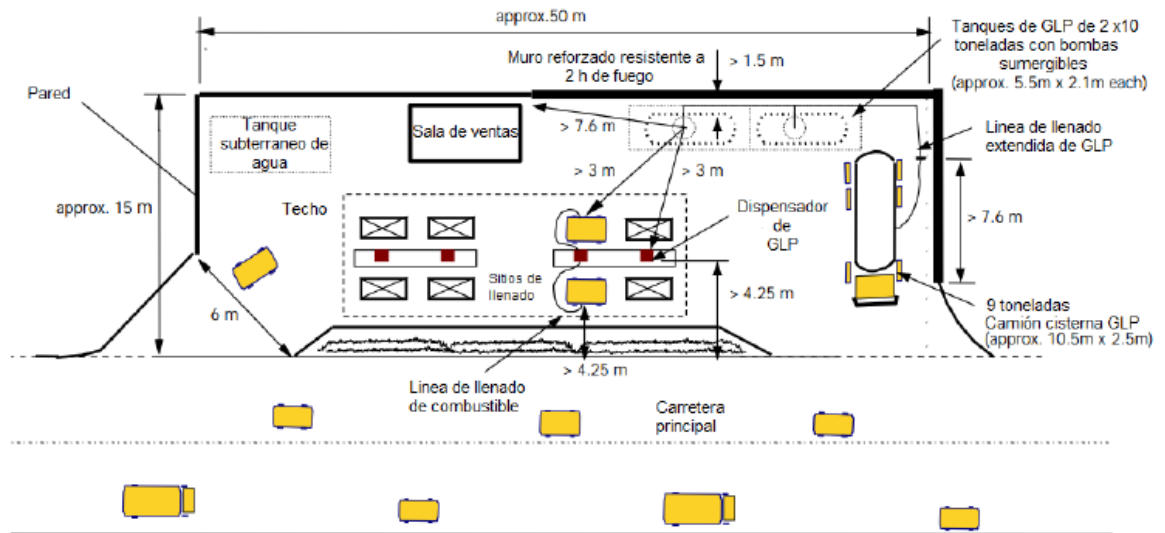
4.1 ESTACIONES DE SERVICIO DE GLP

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 15).

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.

Figura 15. Estación de servicio de GLP



Fuente: ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong.

4.2 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.

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 siguientes⁵⁰:

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 practico 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 dispensión 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 dispensión de combustible y reparación de vehículos automotores.
- NPFA 58-2004: Usos y almacenamiento de GLP.

⁵⁰ ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong. [En línea] Hon Kong. P. 66. Disponible en: [http:// www. emsd. gov. hk/ emsd/ e_download/ cgi/ LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_\(11-2008\).pdf](http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/cgi/LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_(11-2008).pdf)

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.

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 siguientes⁵¹:

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.

⁵¹ EUROPEAN LPG ASSOCIATION AEGPL. European Lpg Association Annual Review. Belgica: 2014 AEGPL p. 24

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 convencionales⁵².

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:

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.

4.3 NORMATIVA NACIONAL DE LAS ESTACIONES DE SERVICIO 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. 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:

⁵² ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. LPG Vehicle Scheme. [En línea] Honk Kong. [recuperado noviembre 2015] Disponible en: http://www.emsd.gov.hk/en/gas_safety/lpg_vehicle_scheme/

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 gaseoso.
- 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 fuego⁵³.

⁵³ ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. LPG Vehicle Scheme. [En línea] Honk Kong. [recuperado noviembre 2015] Disponible en: http://www.emsd.gov.hk/en/gas_safety/lpg_vehicle_scheme/

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*”:

- 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.

4.4 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:

- 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.

4.4.1 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 aspectos⁵⁴:

- 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.
- 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.

4.4.2 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

Las estaciones de suministro de GLP y sus componentes deben cumplir con los requerimientos de separación, tal como se especifican en la Tabla 15. Distancias de separación con respecto a otras edificaciones.. 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 ciudad⁵⁵

⁵⁴ ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong. [En línea] Hon Kong. P. 66. Disponible en: [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)

⁵⁵ Ibid., p. 1

4.4.3 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.

Tabla 15. Distancias de separación con respecto a otras edificaciones.

Instalaciones de suministro del GLP	Casas de campo/zona comercial/ zona industrial/zona recreacional (m)	Zona residencial/ Zona de instituciones (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

Fuente: ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong. [En línea]

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 eléctricas, 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

5. CALCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN MOTOR FUNCIONANDO CON GLP.

Se usó el programa Aspen Hysys v8.8 para la simulación de un motor de combustión interna, el simulador Aspen HYSYS V8.8 ofrece una base termodinámica para el cálculo de las propiedades físicas, propiedades de transporte y Comportamiento del petróleo y gas.

El combustible y los fluidos de trabajo son mezclas de hidrocarburos; Por lo tanto, el paquete de fluido Peng-Robinson (PR) Utilizado una base de datos robusta y ecuaciones que pueden generar mejores predicciones de equilibrio para los Sistemas. La configuración del modelo de motor de gas se desarrolló primero basado en la literatura⁵⁶.

La composición de los diferentes tipos de combustible utilizado se presenta en la Tabla 16. La configuración del motor de gas consiste en un número de unidades de operación en las que se incluyen: corrientes de material, una unidad de expansión, compresor, mezclador, enfriadores y un reactor de conversión (para realizar la combustión), una representación esquemática del motor de combustión interna se presenta en la figura 16, en donde se evidencia que al realizar la combustión en el motor se producirán gases de combustión (resultado de la reacción química), la temperatura del motor aumentará y producirá un flujo de energía el cual será disipado por la chaqueta de refrigeración y el aceite de lubricación, además se perderá una cantidad de energía debido a la fricción en el motor, ejes, bielas y demás elementos mecánicos; así mismo el flujo de energías que se evidencian en un motor se muestran en la Figura 17, se debe aclarar que en los flujos de energía los gases de combustión se llevan un porcentaje equivalente a la cantidad de energía que se entrega del motor, por esta misma razón muchos de los motores de combustión interna prefieran aprovechar esta energía por medio de turbocompresores.

Los MCI, son máquinas que se basan en el funcionamiento mecánico de una conversión de energía de combustión en energía rotacional de movimiento, estos sistemas mecánicos basados en el Ciclo Otto, que aprovechan la energía liberada por la combustión entre un combustible (gas o líquido) y aire para generar trabajo sobre un eje. Este eje acciona un compresor recíproco, que permite aumentar la presión del gas que está siendo comprimido.

⁵⁶ RUTHERFORD, Jonh Peter., Heat and Power Applications of Advanced Biomass Gasifiers in New Zealand's Wood Industry A Chemical Equilibrium Model and Economic Feasibility Assessment. Nueva Zelanda.: University of Canterbury. Chemical and Process Engineering, 2006, 130p.

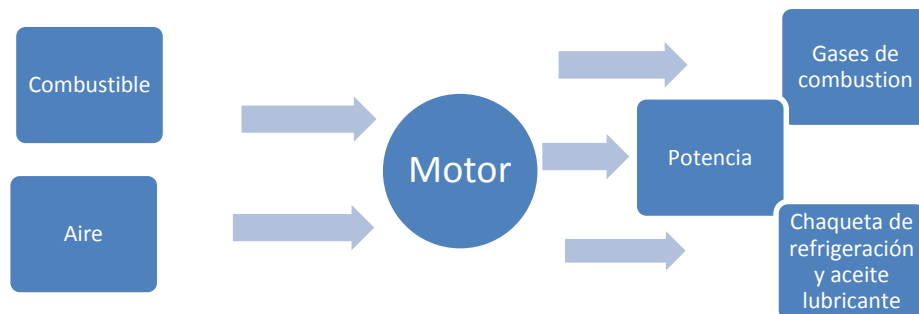
Tabla 16. Composición de los flujos de aire y GLP

	% Volumen		%Peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno N_2	78.03	79	75.45	76.8
Oxígeno O_2	20.99	21	23.02	23.2
Argón Ar	0.94	0	1.3	0
CO ₂	0.03	0	0.05	0
Otros	0.01	0	0	0
PM (kg/mol)			28.967	29

GLP de diferentes campos

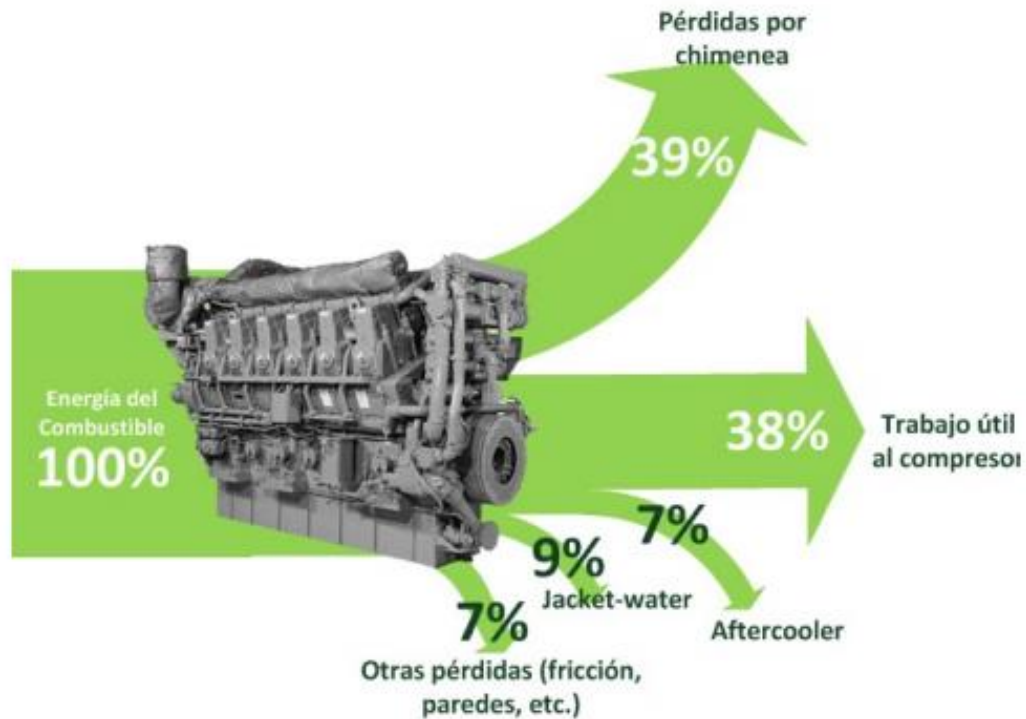
Obtención	% C1, C2 y C ₂ H ₄	%C3	% Propileno	%C4	%C5 y +	%N ₂
Campo Cusiana	2.24	52.53	0.00	44.82	0.41	0.00
Campo Apiay	0.73	58.04	0.00	40.41	0.78	0.04
Campo de TOQUI-TOQUI	2.40	41.17	0.00	55.71	0.72	0.00
Refinería de Barrancabermeja	0.44	9.81	4.41	84.61	0.73	0.00
Refinería de Cartagena	0.14	52.80	6.70	40.22	0.14	0.00

Figura 16. Representación esquemática del motor de combustión interna.



El MCI trabaja en un ciclo de cuatro tiempos (admisión - compresión - combustión - escape) pero solamente se realiza trabajo sobre el pistón tras la etapa de combustión. Como resultado, solamente una fracción de la energía liberada tras la combustión es efectivamente convertida en trabajo.

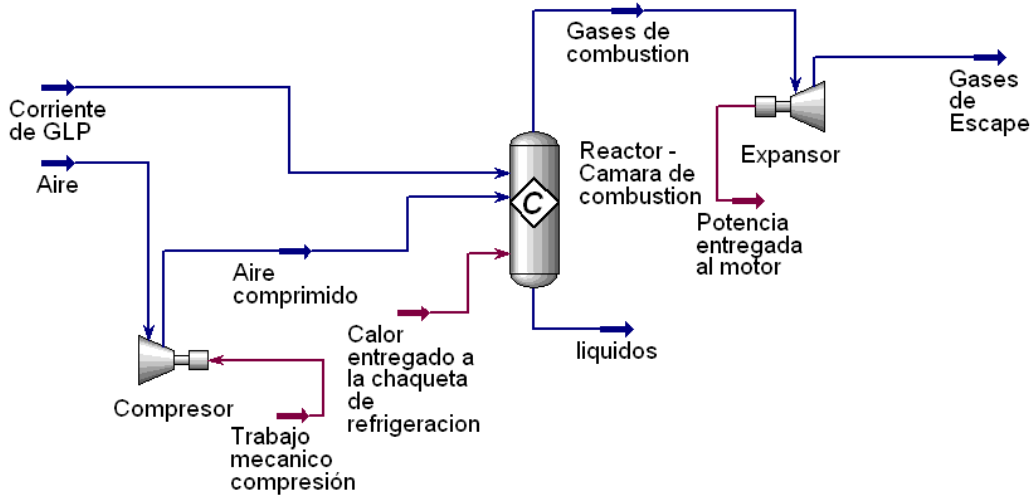
Figura 17. Flujo de energías típicas en motor de combustión interna.



Fuente: <http://catoilandgas.cat.com>

El modelo utilizado sobre el programa Aspen HYSYS se muestra en la Figura 18 se utilizó para este, un compresor que simula el tiempo de compresión del motor, un reactor de conversión con los parámetros necesarios para realizar la conversión del propano y butano a su vez cumple con la función de cámara de mezclado, un expansor para determinar el valor de la potencia entregada al vehículo, en el esquema se muestra el calor saliente de la combustión como un flujo de energía que se entrega a la chaqueta de refrigeración.

Figura 18. Modelo de un MCI en Aspen Hysys.



La Tabla 17 muestra los parámetros que se tendrán en cuenta para el análisis energético del MCI

Tabla 17. Parámetros para el cálculo de la eficiencia energética.

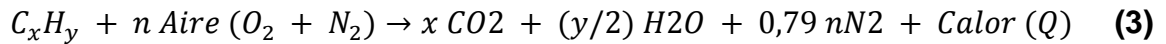
Parámetro	Unidades
Potencia útil	kW
Consumo de combustible	MJ/h
Consumo de aire	m ³ / h condiciones estándar
Caudal de gases de combustión	m ³ /h condiciones estándar
Temperatura de los gases de combustión	°C
Perdida de calor hacia la chaqueta refrigerante	kW
Otras perdidas	kW

Si bien los MCI liberan una gran cantidad de energía térmica residual, el aprovechamiento de esta energía está relacionada directamente con la temperatura a la cual se liberan los gases de combustión. Así mismo, no es conveniente extraer calor de los gases de combustión hasta reducir su temperatura por debajo del punto de condensación del vapor de agua presente en los propios gases (punto de rocío). Esto causaría efectos no deseados como la corrosión del ducto de escape.

Para realizar la combustión en el reactor de conversión se debe acordar la reacción estequiométrica que se produce entre el GLP y el aire.

COMBUSTION ESTEQUIOMETRICA: Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la

oxidación completa de todos los componentes del combustible. La expresión de esta combustión es:



$n = x + (y/4)$, siendo el calor generado es el correspondiente a la combustión completa.

Reacciones de combustión a continuación se muestran las reacciones linealmente independientes que se dan en el reactor de conversión.

Tabla 18. Reacciones estequiometrica.

COMPONENTE	REACCION ESTEQUIOMETRICA
Metano	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 882,81 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
Etano	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O + 1580,96 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
Propano	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 2282,34 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
N-butano	$n-C_4H_{10} + \frac{13}{2} O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + 3003,21 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
Etileno	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 1462,02 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
Propileno	$C_3H_6 + \frac{9}{2} O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 2146,89 \text{ Btu} / \text{pie}^3$
hidrogeno	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 265,40 \text{ Btu} / \text{pie}^3$

Fuente: CALA, Oscar Mauricio; et al. Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión.

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los efectos de la composición del gas combustible sobre las características de la combustión, y se evaluó: poder calorífico, índice de wobbe, aire teórico, temperatura adiabática de llama, eficiencia y concentración de CO₂ y vapor de agua.

5.1.1 Influencia de la composición del gas combustible (GC) sobre el poder calorífico de la mezcla. Para la simulación se tomaron 5 corrientes de GC

obtenidas previamente, el poder calorífico de un combustible depende netamente de su composición, afecta el rendimiento del motor, incluyendo las características de la combustión (longitud de la llama, estabilidad de la llama y temperatura), la eficiencia térmica y las emisiones. Por lo tanto, es un parámetro de vital importancia en el estudio de la combustión⁵⁷ Como se observa en la Tabla 19 se puede tener un amplio rango en el poder calorífico del Gc, donde se mantiene un valor promedio de 21334,41 Btu/lb3, en los cual se presenta bajo contenido de metano, pero se tienen altas concentraciones de propano y butano. De esa forma, se tiene una amplia gama de GC, el cual es utilizado como combustible en las refinерías; de esa manera se hace importante validarlos teniendo en cuenta su intercambiabilidad y los impactos que generan al utilizarse como combustibles.

Tabla 19. Poder calorífico de los 5 GLP tomados para el análisis energético.

Obtención	P. Calorífico (BTU/lb)
Campo Cusiana	21334.41
Campo Apiay	21300.15
Campo de TOQUI-TOQUI	21264.40
Refinería de Barrancabermeja	20866.90
Refinería de Cartagena	21202.61

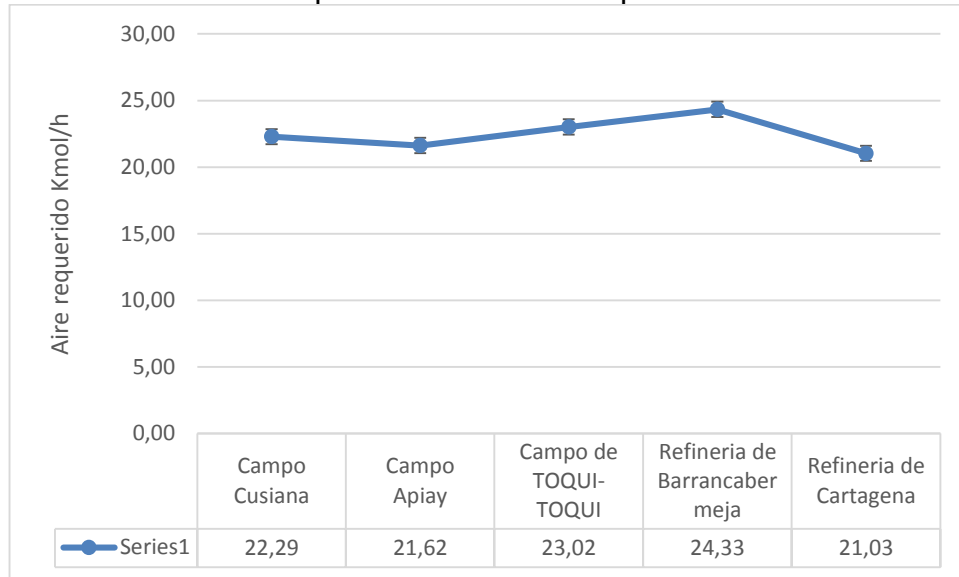
5.1.2 Influencia de la composición del GC sobre el exceso de oxígeno. La cantidad de aire necesario para garantizar la combustión completa para el GC es calculada mediante la ecuación.

$$A_0 = \frac{1}{0,21} \left(\begin{array}{l} 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + \\ 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 \\ +0,5H_2 \end{array} \right) \quad (4)$$

Donde CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, C₂H₄, C₃H₆ y H₂ se expresan como la fracción molar del combustible.

⁵⁷ KO, Yung-Chang y LIN, Ta-Hui. Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions. En: Energy Conversion and Management, vol. 44, 2003, pp. 3001–3014

Figura 19. Consumo de aire para combustión completa del GLP.



Se observa en la Figura 19 que para 1 kmol de GC es necesario suministrar un promedio de 23 kmol de aire; al realizar el cambio de combustible la diferencia que existe es mínima, teniendo los valores más bajos el campo apiay y la refinería de Cartagena debido al bajo contenido de butano y un mayor contenido de propano, se observa que la refinería de Barrancabermeja tiene el mayor requerimiento de aire, dicho aumento se presenta porque estos gases poseen la mayores concentraciones de propano, butano y propileno, que de acuerdo con las reacciones de combustión necesitan mayor cantidad de moles de oxígeno por mol de combustible 5 para el propano, 6,5 para el butano y 4,5 para el propileno para asegurar la combustión completa, comparado con el metano (principal componente del GN) que solo necesita 2 mol de oxígeno. Por tanto, la presencia de hidrocarburos de alto peso molecular en el GC incrementa la cantidad de aire requerido para la combustión, y de ese modo, se corre el riesgo de presentarse combustión incompleta.

5.1.3 Eficiencia del proceso. La eficiencia de combustión es la medida del calor liberado en la llama que es utilizado como fuerza mecánica en el motor; se calcula a partir de las pérdidas de calor en los gases de escape y la energía que libera el combustible utilizado. Para su evaluación se utilizó el modelo de entradas y salidas (indirecto) descrito en la norma ASME PTC 4.1. Se define como:

$$\eta = \frac{PCI - Q_{chimenea}}{PCI} * 100 \quad (5)$$

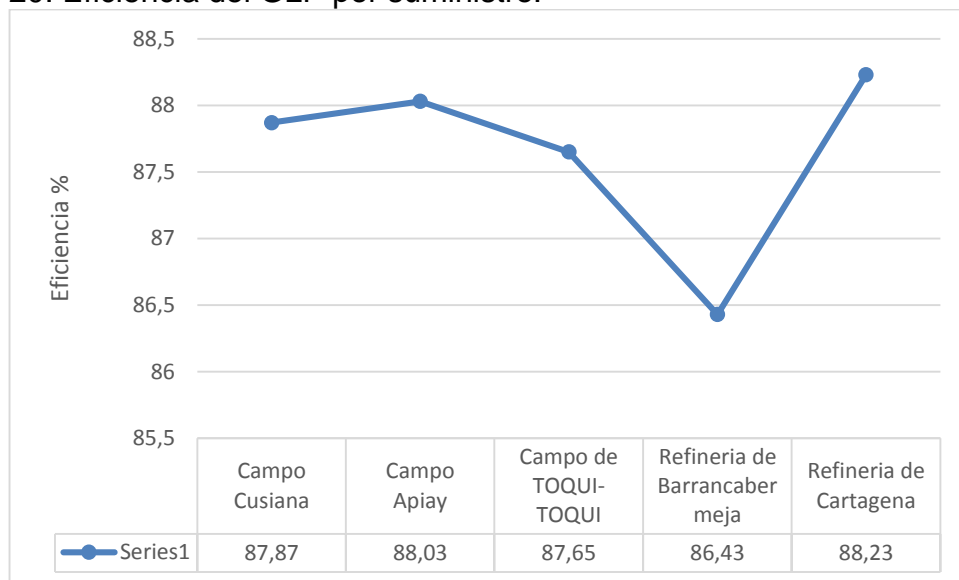
Donde PCI es el poder calorífico inferior del combustible y el $Q_{chimenea}$ es el calor perdido en chimenea.

Poder calorífico inferior (PCI): El PCI es la variable más importante del proceso, pues depende directamente de la composición y mide el contenido energético por unidad de masa o unidad volumen del combustible. Para mezclas gaseosas se define como:

$$PCI = \sum y_i PCI_i \quad (6)$$

Donde y_i es la fracción molar del componente i y PCI_i es el poder calorífico inferior del componente i .

Figura 20. Eficiencia del GLP por suministro.



En la Figura 20 se muestra la variación de la eficiencia del proceso de combustión en función del GLP según suministro. Se observa que la eficiencia disminuye respecto al mayor contenido de butano, aun así la eficiencia se mantiene en un valor promedio de 86%. 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.

6. EVALUACION FINANCIERA DE LA CONVERSION A GLP

La teoría de la inversión permite explicar el comportamiento de los dueños que convierten sus vehículos. Esta teoría es pertinente porque la conversión de vehículos al sistema dual es una inversión. Los conceptos importantes de esta teoría son costos, beneficios, rentabilidad, incertidumbre y riesgo. La información imperfecta que tenemos del futuro crea incertidumbre en el presente. Los estadísticos han cuantificado la incertidumbre, aplicando probabilidades en forma subjetiva u objetiva a los inciertos sucesos del futuro.

La teoría establece que un gasto de inversión se llevará a cabo si los rendimientos futuros traídos al presente exceden al desembolso inicial. La inversión en el proceso de conversión de vehículos gasolina/duales es el gasto inicial. El proceso será rentable si sus ingresos futuros, bajo la forma de ahorro en el gasto de combustible y otros, son mayores que la inversión inicial. Esta comparación requiere traer los inciertos beneficios futuros al presente usando una tasa de descuento apropiada. La tasa que se empleará es la tasa de interés del mercado de préstamos para taxistas.

La diferencia con su principal competidor, el GNV, se hace evidente también en el costo de convertir el vehículo. A manera de ejemplo, en Perú el costo de convertir un vehículo a GLP oscila entre US\$ 450 y US\$ 600 es decir, entre \$900.000 y \$1.200.000. Por su parte, convertir un vehículo a Gas Natural Vehicular, tiene un costo que oscila entre US\$ 1.300 y US\$ 1.350, aproximadamente \$2.600.000 y \$2.700.000. A partir de lo anterior, el costo de convertir a GLP es 1/3 del costo de convertir a GNV⁵⁸.

En el proceso de conversión, la inversión inicial en conversión varía dependiendo del tipo de kit de conversión, para el caso de estudio se tomara el kit de conversión de 3ra generación donde su valor se tomara en 1.900.000 COP Si a esta cantidad agregamos posibles reparaciones previas que requiera el vehículo por un monto promedio de 500.000 COP y los gastos en trámites de certificación y cambio de tarjeta de propiedad por otros 500.000 COP.

En Colombia no existe un precio comercial para el uso de GLP en automotores, para los cálculos se usara la referencia internacional europea encontrada en La Asociación Española de Operadores de GLP (AOGLP), también en la se muestran

⁵⁸ FEDERACION COLOMBIANA DE TRANSPORTADORES DE CARGA Y SU LOGISTICA, COLFECAR. Informe gas licuado de petróleo: ¿una opción de combustible para el transportador de carga por carretera?. Bogotá D.C., 2014. P. 1 - 8

los precios de GLP según la empresa ECOPETROL⁵⁹ Tabla 20. Precios máximos regulados GLP marzo 2017, estos nos servirán de comparativo como límite inferior para el cálculo del valor del GLP para uso automotor.

Tabla 20. Precios máximos regulados GLP marzo 2017

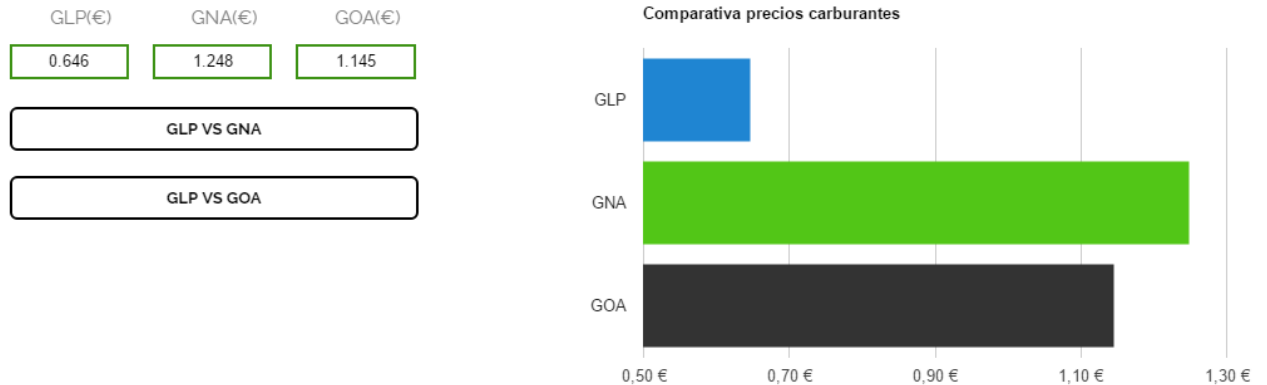
PRECIOS MAXIMOS REGULADOS GLP DE MARZO 15 A ABRIL 14 2017					
Concepto	Precio Refinería de Barranca	Precio Reficar	Precio Apiay	Precio Dina	Precio Cusiana
Ingreso al Productor (\$/GL)	2.304,12	2.941,48	2.132,27	2.122,74	2.102,87
Ingreso al Productor (\$/KG)	1.047,23	1.386,71	1.047,23	1.047,23	1.042,47
Transporte	(*)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Precio de venta al comercializador mayorista (sin incluir transporte) \$/GL	2.304,12	2.941,48	2.132,27	2.122,74	2.102,87
Precio de venta al comercializador mayorista (sin incluir transporte) \$/KG	1.047,23	1.386,71	1.047,23	1.047,23	1.042,47
<i>Precios máximos regulados de suministro de GLP, sin perjuicio de lo establecido en las OPC con precio regulado, Precios Resolución CREG 065 de 2016</i>					
(*) http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=192&conID=36336&pagID=128099					

Fuente: ECOPETROL S.A. boletín 2017 [En línea].

Los costos suministrados por AOGLP para la fecha de marzo de 2017 se muestran en la donde se hace el comparativo del costo con otros combustibles utilizados en España, como son el GNA (gasolina) y al GOA (gasóleo).

⁵⁹ ECOPETROL S.A. boletín 2017 [En línea]. Bogotá D.C.: ECOPETROL S.A., 2017. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-2017/boletines-2017/purple-angel-1-encuentra-gas>

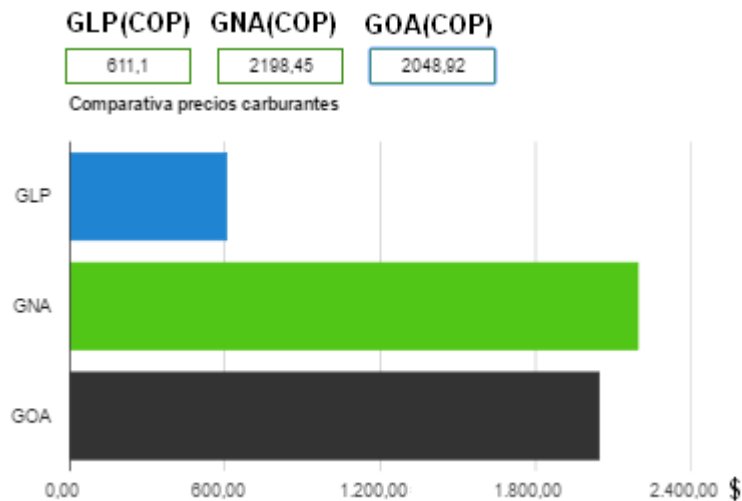
Figura 21. Costos comparativos de varios carburantes, calculadora de ahorro AOGLP



Fuente: ASOCIACIÓN DE OPERADORES ESPAÑOLA DE GAS LICUADO DE PETROLEO, OGLP, 2017.

El precio final del coste del GLP dependerá de factores como son la localización geográfica, el precio del barril de petróleo, la demanda de combustible y la oferta del mismo, para fines de este trabajo tomaremos el valor del GLP de cusiana como referencia en el límite inferior, con dichas variables antes mencionadas y tomando un valor cercano a 2313,16 COP/Gal lo que equivaldría a un valor de 611,1 COP/litro (tomando un galón como 3,7854 litros). Por otro lado se toma el valor de la gasolina para marzo del 2017 como 8.322 COP, equivalente a 2.198,45 COP/litro y el precio del Diésel con un valor de 7.756 COP equivalente a 2048,92 COP/litro, la figura 22 muestra el comparativo de los combustibles comerciales y el GLP tomando los valores estimados para Colombia.

Figura 22. Comparativo de precios de carburantes.



Fuente: ASOCIACIÓN DE OPERADORES ESPAÑOLA DE GAS LICUADO DE PETROLEO, OGLP, 2017.

Otro factor a tener en cuenta es el consumo de combustible del vehículo, para diferentes tipos de vehículos y diferentes tipos de conductores habrá diferentes consumos, esto depende básicamente del uso que se le da al automóvil, un conductor particular utiliza su automóvil para transportarse a puntos específicos durante su diario vivir (se toma una referencia de movimiento en ciudad), donde la marcha de su vehículo no se ve forzada a grandes cambio de velocidad o paradas constantes, en cambio un conductor de servicio público (taxistas) tendrá que estar realizando paradas constantes para dejar y recoger pasajeros además que el vehículo variara de pasajeros constantemente y su consumo de combustible se verá incrementado.

Para tomar un consumo de combustible por 100 km de conducción se debe hacer referencia a la experiencia en donde cada conductor debería calcular su consumo de combustible, algunas recomendaciones para reducir este consumo son mantener una velocidad constante y prudente; no acelerar y frenar constantemente; no revolucionar demasiado el motor ya que a más revoluciones más consumo. Tratar de conducir en el cambio más alto que el motor permita, sin que se produzca el dañino 'cascabeleo', revisar el vehículo periódicamente y mantenerlo sincronizado. Examinar el aire de las llantas para que sea el óptimo. Conozca muy bien la tecnología del motor de su carro para que pueda prestarle la atención que requiere.

Para el uso de GLP tomaremos el promedio europeo recomendado por la AOGLP un valor de 9.50 l/100 km, para el consumo de gasolina tomaremos 8.75 l/100 km y el consumo de diésel se toma como 6.5 l/100 km.

Figura 23. Consumos medios y costes por cada 100 km



Fuente: Adaptación, programa para cálculo de ahorro con GLP, AOGLP., 2017.

El consumo de gasolina para un taxista, que emplea cinco galones de combustible diarios, equivalente a 18,95 litros al día, asciende a 41660,63 COP diarios, precios actuales (Marzo de 2017) si, este mismo taxista decidiera utilizar GLP como

carburante de su vehículo gastaría 11566,29 COP diarios. El dueño de un vehículo particular, que usa dos galones diarios, equivalente a 7,571 litros gasta 16664,025 COP diarios de gasolina, usando GLP gastaría un total de 4626,516. A estas cantidades hay que restarle la depreciación anual del equipo instalado por un valor de 225000 COP (Se ha supuesto en forma razonable que el kit de conversión dura diez años y luego su valor residual es cero). Así mismo, se descuenta 267.000 COP anuales por concepto de mantenimiento del kit instalado. Este gasto garantiza la duración del equipo y certifica el ahorro en combustible estimado. De esta manera los beneficios netos anuales, se muestran en la donde se presentan estos cálculos junto al valor presente de los beneficios, se debe aclarar que se toma un tiempo de uso del vehículo igual a 313 días, ya que por lo menos un día a la semana se tendrá pico y placa, lo que se entiendo como no usar el vehículo (un año de 365 días con 52 semanas).

Obteniendo los siguientes resultados

Tabla 21. Costo, beneficios y valor presente de la conversión

Costo inversión inicial en COP		Beneficio anual por 10 años en COP		
Rubros:		Rubros:	Taxistas	Particulares
Conversión:	\$1.900.000,00	Ahorro en combustible	\$ 9.419.528,42	\$ 3.767.740,32
Reparación:	\$ 500.000,00	Depreciación	\$ 190.000,00	\$ 190.000,00
Tramites:	\$ 500.000,00	Mantenimiento	\$ 267.000,00	\$ 267.000,00
Total:	\$ 2.900.000,00	Anualidad (A)	\$ 8.962.528,42	\$ 3.310.740,32
Tasa anual:	60% (i)			
Duración:	10 (n)	Valor presente: (VP)*	\$ 14.801.691,16	\$ 5.467.715,52
*formula: $Vp = \frac{A}{i} * (1 - \frac{1}{(1+i)^n})$				

El costo del kit de conversión se toma con base a los precios del mercado. En la actualidad el gobierno dispuso de las leyes pertinentes para poder usar el GLP como combustible automotor, aunque aún no hay un precio estándar del valor del

kit de conversión, se tomó para este estudio el valor promedio del kit de tercera generación en Perú y también se evaluó el valor de la conversión en España.

Valor de kit 3ra generación 2000 soles, Valor del kit de 5ta generación 3200 soles; Valor del kit entre 2.200 y 2.550 euros, un precio en el que está incluido el IVA, la mano de obra y el kit homologado.

La fórmula financiera empleada es el valor presente de una anualidad es:

$$Vp = \frac{A}{i} * (1 - \frac{1}{(1 + i)^n}) \quad (7)$$

donde A es la anualidad, i representa la tasa de interés y n los años⁶⁰. En efecto, los beneficios anuales de ambos grupos son trasladados al presente usando una tasa de interés del 60% y se obtiene los valores presentes de \$ 14.801.691 COP para taxistas y \$ 5.467.715 para particulares. Estas cantidades son mayores que los \$ 2.900.000,00 de inversión inicial. Se supone que los beneficios netos anuales de \$ 8.962.528,42 COP para taxistas y \$ 3.310.740,32 COP para particulares son cifras promedio. Su variación depende de las circunstancias de cada dueño de vehículo. Los dueños de vehículos particulares serán los más sensibles a los cambios en beneficios porque su valor presente de \$ 5.467.715,52 es ligeramente superior a los \$ 2.900.000,00 COP de inversión inicial. Por otro lado, el valor presente de los beneficios de los taxistas es \$ 14.801.691,16 COP es muy superior al monto de la inversión inicial. Aún, si sus beneficios se reducen en 10%, 20% o 30%, la inversión para taxistas sigue siendo rentable. Un factor que podría reducir los beneficios es el cambio relativo en los precios de los combustibles, de tal forma que el precio del GLP se acerque al de la gasolina.

En definitiva, el principal motivador de la conversión de vehículos al sistema dual es el ahorro en el gasto en combustible. Sin embargo, existen aspectos del proceso que pueden retardar la conversión. Uno de ellos es la asimetría de la información que poseen las personas que intervienen en la inversión. El que desea convertir su vehículo tiene que optar por un determinado taller. Cada taller emplea kits de conversión de una determinada marca y dispone de una mano de obra con cierta calificación. El taller conoce mejor de sus equipos y mano de obra que el dueño que desea convertir su vehículo. La falta de conocimiento de los talleres de conversión y de la tecnología que emplean puede restringir las conversiones.

⁶⁰ SAMUELSON, Paul y NORDHAUS, William. Economía. XVIII México.: McGraw-Hill / Interamericana Editores S.A., 2006, P. 263.

El conocimiento técnico del GLP comprende su naturaleza, su operación a través del kit de conversión, sus efectos en el desempeño del vehículo, el precio de la conversión, los diferentes kits de conversión disponibles y los talleres locales con sus respectivas garantías. Es un hecho que los talleres de conversión y los dueños de vehículos ya convertidos conocen mejor el proceso. Pero, existen conversiones mal hechas, que no logran alcanzar los objetivos propuestos y crean confusión entre los dueños, que desean convertir sus vehículos. Esta deficiencia puede aliviarse con políticas de difusión de la tecnología GLP, con la presentación de los diferentes kits disponibles y su calidad, y con la certificación de los talleres que prestan un servicio de calidad a la comunidad. Las instituciones locales y la ciudadanía organizada juegan un rol importante en cubrir esta brecha de conocimiento.

Esta falta de conocimiento no sólo crea incertidumbre, sino también fomenta dudas, como el temor de que el vehículo a GLP explote, y el miedo a quedarse en algún momento sin gas y sin estaciones cerca. Estos temores también pueden impedir las conversiones de vehículos al sistema dual. Aún si el dueño de un vehículo a gasolina conoce perfectamente la tecnología dual y no posee ningún tipo de temor, su conversión puede estar restringida por falta de liquidez. Es verdad que existe un sistema financiero de apoyo a las inversiones, pero el dueño del vehículo puede estar impedido de usarlo por diversos motivos. La falta de acceso al crédito impide las conversiones. Esto quiere decir que no sólo la rentabilidad, el conocimiento de la tecnología dual y los temores asociados al uso del GLP influyen en la decisión de conversión, sino también el acceso a fuentes de financiamiento. En un sentido amplio, la falta de ahorros propios acumulados y los requisitos exigidos para acceder al crédito formal impiden a los dueños de vehículos aprovechar las ventajas económicas que ofrece la tecnología GLP.

7. CONCLUSIONES

En la actualidad la exploración de nuevos campos de petróleo y gas se ha incentivado por las nuevas políticas nacionales, aunque el año 2016 golpeo al sector petrolero, hoy en día las expectativas son optimistas, en Colombia con los proyectos de exploración recientes se han descubierto reservas de crudo y gas, lo que motiva el mercado del GLP, ya que como bien es sabido los tratamientos de los líquidos del gas de pozo y el refinamiento del petróleo son los procesos aportantes en la obtención del GLP, como se evidencio en el capítulo de calidad, cada día se realizan más análisis para determinar una calidad apropiada del GLP que garantice el buen funcionamiento en los automotores a nivel nacional, además de asegurar la mitigación del impacto ambiental.

El GLP es un combustible derivado del petróleo y gas, con emisiones más limpias, menos costosas y abundantes en comparación con los combustibles tradicionales. En Colombia se llevan a cabo prototipos de vehículos funcionando con GLP para realizar un mayor seguimiento y elaborar una normativa adecuada para su uso a nivel nacional, la implementación de dichas normativas contribuye a generar un mercado en el que la oferta y la demanda mantengan precios justos con calidades aptas para el funcionamiento de los automotores.

La economía en un país en vía de desarrollo como Colombia, maneja unos niveles fluctuantes, en los que la capacidad de adquisición se ve limitada a gastos específicos. La conversión a un sistema dual GLP/gasolina requiere una inversión inicial aproximada de \$ 2.900.000 COP, la cual podría ser considerada alto según los ingresos promedio de las personas, sin embargo el análisis financiero bajo escenarios específicos, demuestra que el ahorro anual aproximado es de un 114,16% sobre la inversión (\$ 3.310.740,32 COP) para un vehículo particular, con un tiempo de retorno de la inversión no mayor a un año, mientras que la recuperación para taxis se llevaría a cabo en menos de 6 meses, las políticas de incentivo a las conversiones deben tomar en cuenta estos aspectos generando financiamiento en las adquisiciones de los kit de conversión además de asegurar las estaciones de servicio a nivel nacional y así permitir la inclusión del GLP al mercado.

La conversión a GLP de un motor de combustión interna; el cual utiliza gasolina como carburante y posee un sistema convencional para su funcionamiento, requiere el cumplimiento de parámetros específicos según las normas, se deben regular los talleres emergentes que surgen de la expansión del mercado, pues se corre el riesgo que estos no cuenten con los requerimientos y las certificaciones pertinentes, esto para no generar problemas de asimetría en la información, falta de conocimientos técnicos, descuido del mantenimiento de los vehículos, falta de conciencia ambiental y así mitigar la resistencia al cambio.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se propone la realización del diseño de una estación de servicio, con su respectivo análisis financiero, para así motivar al gobierno nacional con la proyección de estaciones de servicio para los futuros usuarios del GLP.

Uno de los trabajos futuros que los ingenieros que decidan abordar el tema del GLP como combustible automotor, puede enfocarse en la puesta en funcionamiento de un vehículo dual GLP/gasolina donde se evidencien de manera práctica los cálculos aquí entregados apoyándose en la resolución 40557 del 09 de junio del 2016.

BIBLIOGRAFIA

ACHTNICHT, Martin; BÜHLER, Georg y HERMELING, Claudia. The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Mannheim: Elsevier Ltd., 2012. P. 262–269.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METHODS – ASTM. ASTM D1835: Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases, ASTM International, West Conshohocken: Clearance Center., 1997. P. 552.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METHODS - ASTM. ASTM D86-16a, Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure, ASTM International, West Conshohocken: Clearance Center., 1999. P. 22.

AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Liquefied Petroleum Gas as an Automotive Fuel - An Environmental and Technical Perspective. Australia: ALPGA., 1998. P. 102

AUSTRALIAN LIQUEFIED PETROLEUM GAS ASSOCIATION, ALPGA. Wide Fuel Range Trial - A report on the impact of autogas composition on emissions and other performance of vehicles manufactured in Australia. Australia: 2000. P. 1 – 7

CALA, Oscar Mauricio; et al. Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2013. vol. 12, No. 23 pp. 101-112.

CHAPARRO GIGLIO, Mauricio Gabriel. Evaluación del uso de Gas licuado de petróleo en vehículos automotores convencionales sobre territorio colombiano. Tesis de magister en ingeniería de petróleos. Medellín: Universidad nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, 2015. 158p.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, CNE. “Contaminación Atmosférica: Análisis de Alternativas de uso de Petróleo Diesel en Vehículos de Locomoción Colectiva de Santiago.” Santiago, Chile., 1988. P. 5-9

DENNIS, Snow. Plant Engineer' s Reference Book Second edition, Gran Bretaña: MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002, 915p.

EUROPEAN LPG ASSOCIATION, AEGPL. European Lpg Association Annual Review. Belgica: 2014 AEGPL p. 16 – 26

FEDERACION COLOMBIANA DE TRANSPORTADORES DE CARGA Y SU LOGISTICA, COLFECAR. Informe gas licuado de petróleo: ¿una opción de

combustible para el transportador de carga por carretera?. Bogotá D.C., 2014. P. 1 - 8

ECOPETROL S.A. boletín 2017 [En línea]. Bogotá D.C.: ECOPETROL S.A., 2017. Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-2017/boletines-2017/purple-angel-1-encuentra-gas>

ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. Code of practice for Liquefied Petroleum Gas Filling stations in Hong Kong. [En línea] Hon Kong. P. 66. Disponible en: [http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/sji/LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_\(11-2008\).pdf](http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/sji/LPG_Filling_Station_COP_Nov_2007_(11-2008).pdf)

ELECTRICAL AND MECHANICAL SERVICES DEPARTMENT, EMSD. LPG Vehicle Scheme. [En línea] Honk Kong. [recuperado noviembre 2015] Disponible en: http://www.emsd.gov.hk/en/gas_safety/lpg_vehicle_scheme/

ESLAVA SARMIENTO, Andres Felipe. Generación eléctrica a partir de la operación de un motor de combustión interna en modo dual con gas licuado de petróleo e hidrógeno. Tesis de magister en ingeniería mecánica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingenierías. 2014. 114p.

FAIZ, Asif; WEAVER, Chistopher y WALSH, Michael. Air Pollution from Motor Vehicles. Washington D.C.: The World Bank. 1996. 266p.

FEDERAL OFFICE OF ROAD SAFETY, FORS. Motor Vehicle Pollution in Australia, supplementary report No.1 In-Service Vehicle Emissions Study. Environment Australia. Australia. 1997. 93p.

GARCÍA LENIS, Juan y VERGARA CASTAÑEDA, Luis. Control de calidad del gas natural y los gases licuados del petróleo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 1998. 161p.

INDIAN AUTO LPG COALITION. Booklet On Safe Practices / Check List for LPG Operated Vehicles. India. Enero, 2008. 36p. disponible en: http://www.iac.org.in/download.docs.php?type=publications&file=RTO_Booklet.pdf

KO, Yung-Chang y LIN, Ta-Hui. Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions. En: Energy Conversion and Management, vol. 44, 2003, pp. 3001–3014

NEW ZEALAND INSTITUTE OF CHEMISTRY. The processing of natural gas at kapuni. Kapuni Natural Gas, Nueva Zelanda. 2008. P. 1 – 7. Disponible en: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/energy/7C.pdf>

NING, Ziu y CHAN, Tat Leung. On-road remote sensing of liquefied petroleum gas (LPG) vehicle emissions measurement and emission factors estimation. Atmospheric Environment, Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2007. 130p.

PINZÓN ANGULO, Nataly. Diseño conceptual, protocolo y normas específicas para la utilización de los laboratorios de gases licuados del petróleo. Bucaramanga.: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2010, 140p.

RUTHERFORD, Jonh Peter., Heat and Power Applications of Advanced Biomass Gasifiers in New Zealand's Wood Industry A Chemical Equilibrium Model and Economic Feasibility Assessment. Nueva Zelanda.: University of Canterbury. Chemical and Process Engineering, 2006, 130p.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, SAE INTERNATIONAL. Butane/propane mixtures as fleet fuels. En: SAE Technical Paper, Diciembre, 1999.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, SAE INTERNATIONAL. Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and perspectives. Warrendale: R. van Basshuysen & F. Schafer, 2004.

SAMUELSON, Paul y NORDHAUS, William. Economía. XVIII México.: McGraw-Hill / Interamericana Editores S.A., 2006, P. 263.

TOTTEN, George; WESTBROOK, Steven y SHAH, Rajesh. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. EE.UU.: ASTM International, 2003. 1087p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo. Bogotá D.C.: Oliver Diaz Iglesias, 2013. 63p.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. Balance de gas natural en Colombia 2016-2025. Bogotá D.C. 2016. Disponible en: http://www.upme.gov.co/SeccionHidrocarburos_sp/Publicaciones/2016/Balance_Gas_Natural_2016_2025.pdf

WANG, Xiuli y ECONOMIDES, Michael. Advanced Natural Gas Engineering. Houston: Gulf Publishing Company, 2009. 333p.

WU, Chih. Thermodynamics and heat powered cycles: A cognitive engineering approach. New York: Nova science publisher. 2007. 659p.