

**ESTUDIO NACIONAL E INTERNACIONAL DE PRODUCCIÓN, APLICACIONES,
ALMACENAMIENTO E INFRAESTRUCTURA DEL GAS LICUADO DE
PETRÓLEO (GLP) Y SU IMPACTO EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA ESTACIONARIOS.**

**CARLOS ANDRÉS VARGAS CEBALLOS
13177**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**ESTUDIO NACIONAL E INTERNACIONAL DE PRODUCCIÓN, APLICACIONES,
ALMACENAMIENTO E INFRAESTRUCTURA DEL GAS LICUADO DE
PETRÓLEO (GLP) Y SU IMPACTO EN LA EFICIENCIA DE MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA ESTACIONARIOS.**

**CARLOS ANDRÉS VARGAS CEBALLOS
13177**

**Proyecto de grado, requisito para optar el título de:
TECNÓLOGO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ.**

DIRECTOR:

Ing. M.Sc. VLADIMIR SILVA.

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.
2017**

INDICE

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS	10
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1. GENERALIDADES	11
1.1. ENTORNO ENERGÉTICO GLOBAL	11
1.2. PROSPECTIVA DE GAS NATURAL EN COLOMBIA	16
1.3. EL GLP COMO FUENTE ENERGÉTICA	21
1.3.1. Panorama internacional	24
1.3.1.1. Producción	24
1.3.1.2. Infraestructura de transporte	29
1.3.1.3. Almacenamiento	33
1.3.1.4. Usos	35
1.3.2. Panorama Nacional	39
1.3.2.1. Producción	39
1.3.2.2. Infraestructura de transporte	41
1.3.2.3. Almacenamiento	42
1.3.2.4. Usos	45
2. GAS NATURAL Y GLP COMO COMBUSTIBLE DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	46
2.1. GAS NATURAL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	46
2.1.1. Tecnologías para el uso de gas natural en vehículos	47
2.1.2. Ajustes de motores de combustión interna accionados con GNV	50
2.1.2.1. Control de estanqueidad	50
2.1.2.2. Ajuste de los elementos eléctricos de gas natural	51
2.1.2.3. Puesta a punto del encendido	52
2.1.2.4. Regulación de caudales	52
2.2. EL GLP Y SU USO COMO COMBUSTIBLE AUTOMOTOR	53
2.2.1. Propiedades del GLP	53
2.2.1.1. Contenido energético	56
2.2.1.2. Densidad de vapor	57
2.2.1.3. Límites de inflamabilidad en el aire	57
2.2.1.4. Temperatura de encendido	58
2.2.1.5. Velocidad de llama	58
2.2.1.6. Relación estequiométrica	59
2.2.1.7. Calificación de octanaje	59
2.2.1.8. Arranque en clima frío	60
2.2.1.9. Seguridad del combustible	61
2.2.2. Ventajas y desventajas del uso de GLP	61
2.2.2.1. Ventajas	61
2.2.2.2. Desventajas	62
2.2.3. Tecnologías para el uso de GLP en vehículos	62
2.2.4. Elementos del kit de conversión	64
2.2.4.1. Depósito de almacenamiento	65

2.2.4.2.	Multiválvulas	65
2.2.4.3.	Válvula de llenado externo	66
2.2.4.4.	Vaporizador	67
2.2.4.5.	Tubería.....	67
2.2.4.6.	Tubo de plástico	69
2.2.4.7.	Válvula electromagnética para GLP	69
2.2.4.8.	Válvula electromagnética para gasolina.....	69
2.2.4.9.	Unidad de mezcla	70
2.2.4.10.	Manguera reforzada	70
2.2.4.11.	Conmutador e indicador de llenado de depósito	70
2.2.4.12.	Emulador	71
2.2.4.13.	Sensor de oxígeno.....	71
2.2.4.14.	Inyectores	72
2.2.4.15.	Unidad de control electrónico	72
2.2.5.	Recorrido del GLP desde su carga hasta la combustión en el motor	73
2.2.6.	Comparación técnica entre motores con diferentes combustibles	77
2.2.6.1.	motor Cummins ISBe 220 31	77
2.2.6.2.	Chevrolet, Vitara JX 1,6 modelo 1994.....	79
2.2.6.3.	Moto-generador Cummins DFEH	82
3.	METODOLOGÍA PARA BANCO DE PRUEBAS	86
3.1.	PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	86
3.1.1.	Introducción a los motogeneradores	86
3.1.2.	Motor de encendido provocado (MEP)	87
3.1.3.	Propiedades geométricas motores MEP	90
3.1.4.	Presión media efectiva	92
3.1.5.	Relaciones aire/combustible y combustible/aire	93
3.1.6.	Consumo específico de combustible.....	94
3.1.7.	Rendimiento volumétrico	95
3.1.8.	Factores para la elección de un motogenerador	95
3.2.	PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL KIT A GLP	97
3.3.	NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS REFERENTES A GLP	99
3.4.	INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE CONVERSIÓN DE GLP.....	100
3.4.1.	Instalación del kit de tercera generación	100
3.4.2.	Instalación del kit de quinta generación.....	101
3.5.	REGULACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE CONVERSIÓN GLP.....	102
3.6.	METODOLOGÍA PARA ETAPA EXPERIMENTAL	103
4.	PROCESO PARA PRUEBAS EN MOTORES ESTACIONARIOS DE COMBUSTION INTERNA.....	104
4.1.	PRECONVERSIÓN PARA MOTORES CARBURADOS.....	104
4.1.1.	Estado de arranque.....	104
4.1.2.	Estado del sistema de encendido	105
4.1.2.1.	Bobina de encendido.....	105
4.1.2.2.	Distribuidor.....	105
4.1.2.3.	Sensor y/o captador de la señal de encendido.....	105
4.1.2.4.	Avances de tiempo (chispa).....	105

4.1.2.5.	Bujías de encendido.	106
4.1.3.	Comprobaciones mecánicas.	106
4.1.4.	Pruebas dinámicas de los sistemas del motor	107
4.1.4.1.	Marcha mínima del motor.	107
4.1.4.2.	Prueba dinámica de avances.	108
4.1.4.3.	Prueba dinámica del vacío, motor en todas las rpm.	108
4.1.4.4.	Comprobación del sistema de enfriamiento del motor.	109
4.1.5.	Análisis de gases de escape.	110
4.2.	INSTALACIÓN DE ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL KIT DE CONVERSIÓN A GLP DE (1ª, 2ª y 3ª) GENERACIÓN	110
4.2.1.	Instalación multiválvula y sistema de carga de GLP.	110
4.2.2.	Instalación depósito de almacenamiento	111
4.2.3.	Instalación circuito de alta presión	111
4.2.4.	Instalación de evaporizador	111
4.2.5.	Instalación circuito de baja presión	112
4.2.6.	Instalación circuito de calefacción	113
4.2.7.	Instalación del mezclador	113
4.2.8.	Instalación del conmutador	113
4.3.	INSTRUMENTACIÓN PARA MONTAJE DEL BANCO Y OPTENCIÓN DE DATOS	114
CONCLUSIONES.....		117
RECOMENDACIONES		118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		119

LISTA DE GRÁFICAS.

Grafica 1. Consumo de energía primaria por fuente de combustible.....	12
Grafica 2. Consumo de energía mundial en MTEP.....	13
Grafica 3. Consumo energético regional.....	14
Grafica 4. Consumo de energía primaria por fuente de combustible.....	15
Grafica 5. Proyección reservas de gas natural (2004 – 2015).....	18
Grafica 6. Histórico/Proyección reservas de gas natural.	19
Grafica 7. Proyecciones de demanda de gas natural (2015-2029).....	20
Grafica 8. Demanda regional de GLP 2000-2012, (Millones de toneladas).	24
Grafica 9. Productores mundiales de GLP (MTm).	25
Grafica 10. Productores Sur Americanos de GLP (Porcentual).	26
Grafica 11. Producción regional por plantas de crudo. (MTm)	27
Grafica 12. Producción mundial por procesamiento de gas natural (KTm).	28
Grafica 13. Representación de un depósito	31
Grafica 14. Cadena GLP	33
Grafica 15. Consumo regional doméstico	36
Grafica 16. Consumo regional agricultura.....	36
Grafica 17. Consumo industrial regional	37
Grafica 18. Consumo en transporte regional	38
Grafica 19. Consumo regional en refinerías.....	38
Grafica 20. Consumo regional en química	39
Grafica 21. Campos productores de GLP explotados por Ecopetrol. (Porcentaje de producción)	40
Grafica 22. Campos productores de GLP no explotados por Ecopetrol. (Porcentaje de producción)	41
Grafica 23. Capacidad de almacenamiento de plantas almacenadoras.....	42
Grafica 24. Principales consumidores por número de cilindros/mes	45
Grafica 25. Esquema kit de GNV	49
Grafica 26. Propano	54
Grafica 27. Butano.....	54
Grafica 28. Multiválvula de GLP	67
Grafica 29. Válvula de llenado de GLP	67
Grafica 30. Vaporizador de GLP	68
Grafica 31. Tubería de GLP	69
Grafica 32. Válvulas electromagnéticas para gasolina y GLP	69
Grafica 33. Unidad de mezcla	70
Grafica 34. Manguera reforzada GLP	70
Grafica 35. Conmutador GLP	71
Grafica 36. Emulador de GLP	71
Grafica 37. Sensor de oxígeno.....	72
Grafica 38. Inyectores de GLP	72
Grafica 39. Unidad de control electrónico del sistema GLP.....	73
Grafica 40. Circuito de alta presión	74
Grafica 41. Circuito de calefacción.....	75
Grafica 42. Circuito de baja presión	76
Grafica 43. Ciclo de operación MEP de cuatro tiempos	89
Grafica 44. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempo	90
Grafica 45. Parámetros geométricos.....	91

Grafica 46. Tención de cebado de chispa de bujía.....	108
Grafica 47. Multiválvula y válvula by-pass.	110
Grafica 48. Instalación evaporador, filtro de GLP y electro-válvula	112
Grafica 49. Instalación llave conmutadora	114

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Máximas presiones de operación permisible – MPOP	30
Tabla 2. Contenedores, capacidad y verificación (NTC 3853)	43
Tabla 3. Diferencias entre butano y propano.....	55
Tabla 4. Límite de inflamabilidad (porcentaje gas-aire).....	58
Tabla 5. Temperatura de encendido.....	58
Tabla 6. Velocidad de propagación de llama.....	59
Tabla 7. Relación estequiométrica.....	59
Tabla 8. Octanaje.....	60
Tabla 9. Sistemas de conversión de GLP según el sistema de inyección del vehículo	63
Tabla 10. Características de los cilindros de acero para almacenamiento de GLP	64
Tabla 11. Especificaciones del motor Cummins ISBe 220 31	77
Tabla 12. Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas del motor Cummins ISBe 220 31	78
Tabla 13. Consumo de combustible y eficiencia térmica en sistema diésel y dual diésel-GLP en un motor Cummins para distintas condiciones de carga y concentración de GLP	79
Tabla 14. Especificaciones del motor Suzuki 1,6 Litros.	80
Tabla 15. Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas del motor Suzuki 1,6 litros	80
Tabla 16. Rendimiento del motor con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros	81
Tabla 17. Emisiones de gases con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros	81
Tabla 18. Consumo de combustible con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros ..	81
Tabla 19. Especificaciones del motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.....	83
Tabla 20. Propiedades de los combustible utilizados en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.....	83
Tabla 21. Consumo energético y eficiencia total en modo diésel y dual para diferentes niveles de carga en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9	84
Tabla 22. Consumo de combustible, relación de equivalencia, A/F estequiométrica y resultados reportados del análisis de gases en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9	85
Tabla 23. Velocidad sincrónica por la cantidad de pares de polos	96
Tabla 24. Amperaje de consumo de arranque	104

Introducción.

El presente documento muestra un panorama nacional e internacional sobre: el uso, almacenamiento, producción e infraestructura del Gas Licuado del Petróleo (GLP) como combustible y su potencial como fuente energética para diversos sectores, específicamente el sector automotor, con base en la búsqueda de nuevas alternativas de combustibles y tecnologías que puedan suplir la demanda de combustibles en términos de eficiencia, disponibilidad, autonomía, etc.

Dentro del desarrollo de nuevas tecnologías para el mejor desempeño de motores a combustión interna, se encuentra el uso de combustibles alternos que se puedan emplear en diferentes tipos de motores alternativos, teniendo así entre los más comunes al GLP. Este tipo de combustible consiste en una mezcla de propano y butano, los cuales se obtienen de la refinación del petróleo o como subproducto de las corrientes de gas natural en diversos campos de extracción.

En su mayoría se obtiene directamente de yacimientos de gas natural o petróleo, 60% en comparación al 40% que procede de la destilación del petróleo en refinería. Al ser sometido a presión, este gas pasa de estado gaseoso a líquido, ocupando menos volumen. Además, está exento de azufre y otras sustancias como metales.

A su vez, se muestra las propiedades que hacen al GLP un combustible apto para ser utilizado como carburante automotor, el cual en países como España su implementación en el parque automotor es cada vez más importante y en países latinoamericanos como lo son Ecuador y Perú su implementación ha comenzado a ser puesta en práctica en niveles experimentales. Gracias a la existencia de diversas tecnologías de equipos de conversión a GLP, las cuales ofrecen una alternativa rentable y de óptima calidad para usuarios que recorren bajos y medianos porcentajes de kilómetros recorridos anuales.

Se realiza un análisis de investigaciones documentadas sobre el uso de GLP en motogeneradores con motores de combustión interna y de vehículos con equipos de GLP, de los cuales se identificó el comportamiento energético del gas bajo diversas condiciones de uso y con la utilización de diferentes concentraciones de butano y propano. Con lo cual poder de definir los parámetros a tener en cuenta para la realización de una posterior etapa experimental del GLP como carburante de motores y de su capacidad energética.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Analizar las investigaciones referentes a la eficiencia de motores de combustión interna operados con gas licuado de petróleo (GLP) con una calidad en su composición de: mínimo un 20% de propano, máximo un 80% de butano y un máximo de 6% de olefinas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Comparar datos nacionales e internacionales sobre: características, producción, infraestructura de transporte, almacenamiento y usos del gas licuado de petróleo.
- Examinar el uso del gas licuado de petróleo en motores de combustión interna: estacionarios y en vehículos.
- Analizar los parámetros de ajuste de los motores de combustión interna con encendido a gas natural vehicular y definir una posterior investigación experimental.

CAPÍTULO 1.

1. GENERALIDADES

Dentro del presente capítulo se encontrará una breve descripción sobre la evolución del consumo energético mundial, más detalladamente el gas natural y el GLP. De tal manera, se expone una revisión a nivel nacional e internacional de: producción, infraestructura de transporte, almacenamiento y usos del GLP tanto a nivel internacional como, a nivel nacional.

1.1. ENTORNO ENERGÉTICO GLOBAL.

El tema energético mundial empieza desde las primeras sociedades primitivas de la humanidad, donde se ha conseguido la domesticación tanto de plantas como animales con los cuales poder controlar una alta gama de convertidores biológicos para la obtención de energía. Esta innovación agrícola de obtención de energía a través de materia fisiológica logró gestar un cambio, convertir a la sociedad agrícola a una de operarios de máquinas que eran básicamente convertidores inanimados alimentados con energía inanimada. Gracias a ello se consiguió mejoras notables en la calidad de vida en aquellas épocas, contribuyendo de esa manera al cambio de la sociedad hacia una más tecnificada, a una sociedad industrial. Esta nueva sociedad entró en una dinámica de crecimiento económico que actuó de estímulo para el desarrollo de nuevas formas de energía: cuanto más energía se producía, más energía se buscaba [1].

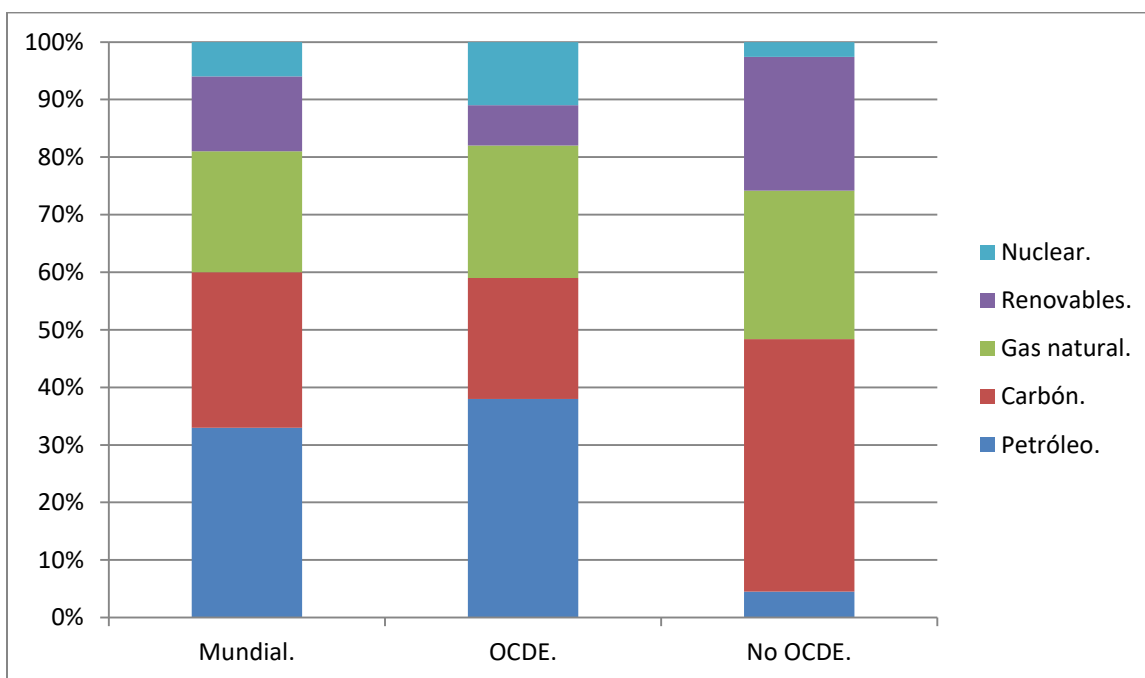
En el margen energético actual, que se ha caracterizado desde la Revolución Industrial hasta el siglo XXI, en la utilización de energías en transición, empleando desde biomasas hasta la implementación del carbón, evolucionando e incorporando al petróleo y sus derivados como fuentes primarias en la economía mundial.

En este lapso de tiempo debido a la evolución progresiva de la tecnología y al consumo de combustibles fósiles como fuentes de energía. La combustión, la extracción, la elaboración y transporte de estos combustibles han generado contaminación al planeta por décadas y ha tenido una consecuencia directa en la problemática ambiental actual, generando un incremento considerable de dióxido de carbono (CO_2), gases y partículas de efecto invernadero en la atmósfera terrestre; además, del grave riesgo de accidentes que se originan en las infraestructuras y en las instalaciones de gas natural y el impacto hídrico de los vertederos de crudo. Siendo todos estos factores nocivos tanto para el hombre como para el planeta.

A pesar del desarrollo acelerado que han experimentado las tecnologías para la obtención de fuentes de energías más limpias y menos contaminantes con fuentes renovables, cada vez es mayor la necesidad de consumo energético en el mundo y esto hace que se siga en la búsqueda y en la dependencia de los recursos primarios como: petróleo, carbón mineral, gas natural y gas licuado del petróleo.

Actualmente más del 80% del suministro mundial de energía, proviene de los combustibles fósiles, el 20% restante es suministrado por: un 6% por energía nuclear y un 13% de energías renovables, las cuales comprenden desde las tradicionales energías limpias (eólica, solar, hídrica), como también de las biomásas, hidroeléctricas entre otras energías [2].

Grafica 1: Consumo de energía primaria por fuente de combustible.



International Energy Agency (2010).

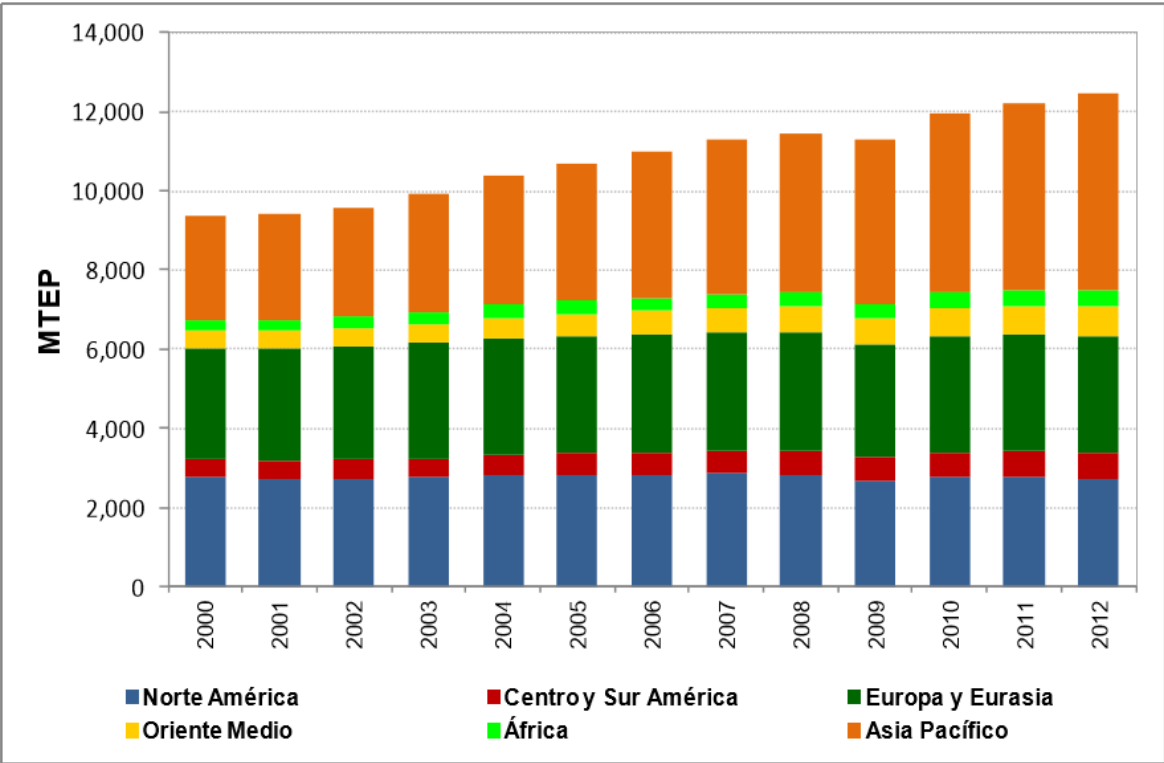
El consumo de estas energías es diferente en los países desarrollados y los países en desarrollo, se puede observar (Grafica 1), que los países OCDE presentan un mayor consumo de fuentes energéticas como: el petróleo, el gas natural y nuclear que son combustibles más costosos y con menor porcentaje de contaminación, los cuales satisfacen la demanda en un 72% en comparación con los países no OCDE que utilizan en mayor proporción el carbón siendo este un combustible más barato y mucho más contaminante. Las energías renovables son más consumidas por los países no OCDE que por los países OCDE, en donde un 15% del porcentaje renovable en los países en desarrollo es aportado por:

biomasas y residuos frente a un 4% de los países desarrollados, mientras que en ambos tipos de países el consumo de energía hidráulica es de un 2% a 4% y las renovables no tradicionales (solar y eólica) es del 1% [3].

Sin embargo en la actualidad ese margen entre consumos se ha visto disminuido por el incremento de la población en los países en desarrollo y por el apresurado crecimiento de actividades económicas. Este crecimiento ha sido constante desde el año 2000 con una desaceleración significativa en el 2009 debido a la alta inestabilidad económica caracterizada por cambios en los precios de las energías, desde el 2010 se empieza a observar de nuevo una reactivación del crecimiento del consumo con un incremento del 2.4%, logrando así llegar al 2012 con un consumo de 12.477 millones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP).

Adicionalmente uno de los sectores energéticos que se han estado posicionando e incrementando su participación en la demanda energética han sido las renovables las cuales han aportado un 8.6% de la energía mundial en los últimos años, en comparación a la energía nuclear que ha tendido a decaer, aportando tan sólo un 4.5% debido a desastres naturales que afectaron instalaciones productoras de esta energía en las zonas asiáticas y al cierre de plantas en Europa [4].

Grafica 2. Consumo de energía mundial en MTEP.



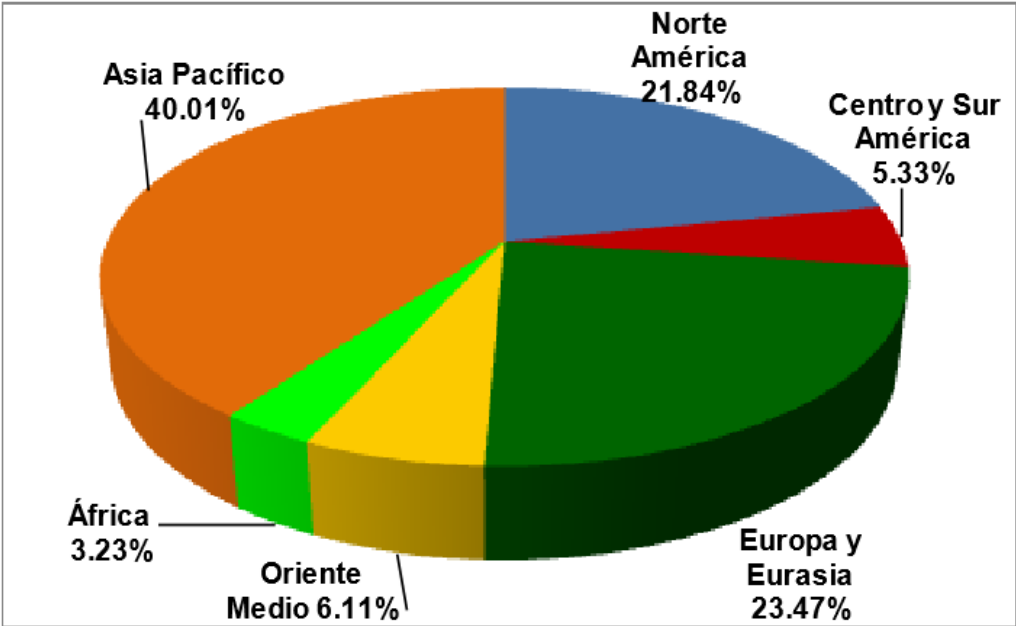
Statistical review of world energy 2013.

Así pues, en la Grafica 2, se muestra la evolución del consumo de energía desde el 2000 hasta el 2012, en la cual la región de Norteamérica incluye los consumos de Canadá, México y Estados Unidos, mientras que la región Asia-Pacífico reúne a los países de la región incluyendo China, Indonesia, Australia y Nueva Zelanda.

Los países OECD desde el 2010 comenzaron aminorando el consumo de energía hasta el punto de llegar al 2012 con una reducción del 1.2%, en el cual países como Estados Unidos disminuyeron su demanda de energía en hasta un 2.8% y siguiendo esta tendencia otros países como: Australia, Japón y Taiwán se acercaron al porcentaje de Estado Unidos. Los países no OECD incrementaron su consumo energético como lo son las regiones asiáticas y suramericanas, en donde la región Asia pacifica obtuvo un incremento del 5,5% en el 2012 en el cual los países como: Tailandia alcanzo un 5,8%, India con un 5.1% y China con un 7.4% fueron los países con mayor índice de incremento mundial en consumo de energías.

En cuanto a la región de Centro y Suramérica su desarrollo de consumo energético fue positivo con un incremento de 2.43% con este referente los países que son parte de esta zona con mayor incremento de consumo fueron los países: Perú con un 8.24% y Chile con 6.7%. Además, naciones como: Brasil, Ecuador y Venezuela superaron el comportamiento energético de países Europeos desarrollados [5].

Grafica 3. Consumo energético regional.

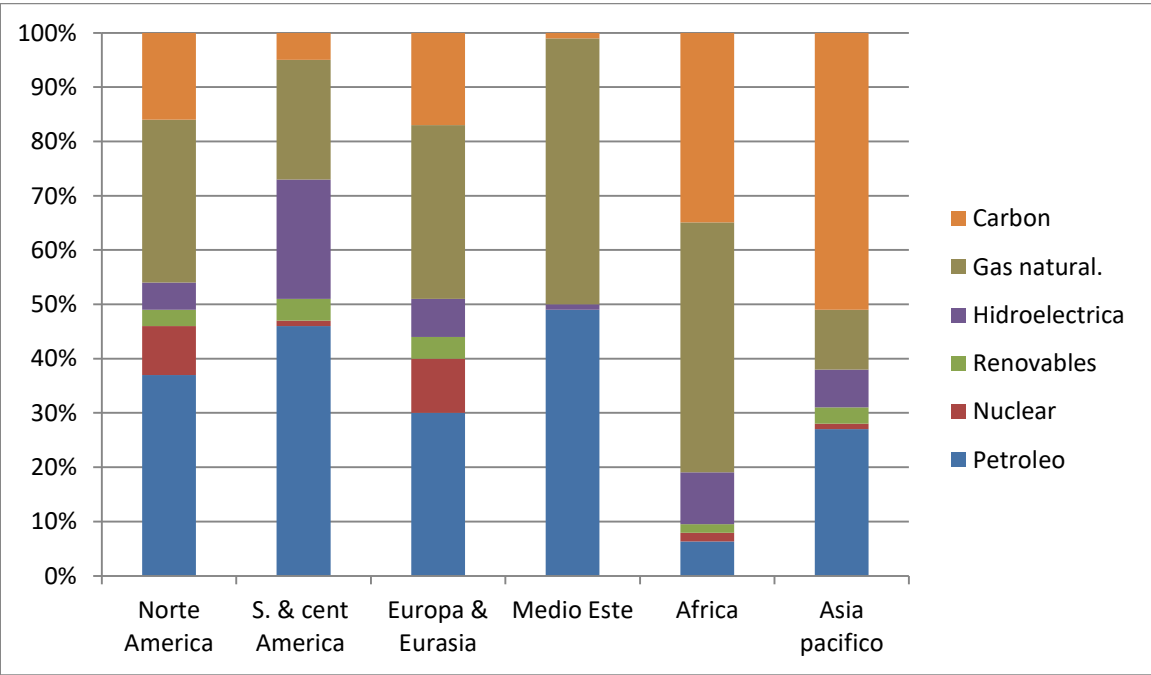


Statistical review of world energy 2013.

La participación regional relativa de consumo mundial durante el 2012 se muestra en la gráfica 3, en la cual se observa que las zonas de mayor consumo son: Asia, Norte América y Eurasia estas regiones individualmente en promedio consumen un 28.4% de la demanda mundial y juntos estos tres territorios ostentan el 85% del consumo mundial, al frente del 15% que utilizan las regiones: África, Latinoamérica y oriente medio que en promedio cada una de ellas consumen una cuarta parte del consumo de las territorios primeramente nombrados [6].

La energía primaria consumida en los últimos años ha crecido con una tasa inferior al 1.0% (2012-2015), siendo el 2015 uno de los años con menor crecimiento de consumo desde 1988 y exceptuando el periodo de las crisis financieras. En este último año el incremento fue inferior en todas las regiones con excepción de Europa y Eurasia. Los combustibles como: el gas natural y el carbón que logro el consumo más bajo desde el 2005, obtuvieron un crecimiento menor a la media de los años pasados y los combustibles que alcanzaron un mayor crecimiento fueron: la energía nuclear y el petróleo, siendo este último el recurso energético que predomina en índices de demanda mundial. La gran revolución de energética del 2015 se le ha tribuye a las energías renovables las cuales lograron un record de consumo mundial de un 2.8% del global de consumo primario mundial.

Grafica 4. Consumo de energía primaria por fuente de combustible.



Statistical review of world energy 2016.

Los índices de consumo en el 2015 se caracterizan en la gráfica 4, en donde combustibles como: el carbón disminuyó su utilización en el continente americano y en el medio este con una demanda del 19.6% del total del consumo mundial, en donde las regiones: Europeas, Eurasia, África y Asia pacífica son los territorios con mayor gasto de este recurso, en las cuales Asia pacífica es el mayor consumidor mundial de dicho mineral con un 45.5% de la demanda mundial. Energías como: el petróleo y el gas natural son los combustibles más utilizados en el mundo con un 66.7% de la demanda mundial energética, en donde el petróleo alcanza un consumo cercano al 40% y el gas al 29% [7].

Es notable como los países en desarrollo son los territorios con mayor gasto de energía hidráulica y renovable manteniendo su índice de consumo desde el 2010 al 2015. Además, se evidencia que energías como la nuclear es una energía en decaimiento en todas las regiones del planeta y con mayor fuerza en países con altos índices de desastres naturales, como también por la incrementación de leyes de control de esta energía y la problemática de experimentación velica de este recurso.

1.2. PROSPECTIVA NACIONAL DEL GAS NATURAL.

El gas natural en Colombia es un recurso energético relativamente nuevo en el país, en el que su implementación comenzó desde la década de los 50 con usos relativamente aislados y esporádicos, pero fue solo hasta la década de los 70 en el que se comienza su desarrollo en el entorno energético nacional gracias al descubrimiento de gas en el departamento de la guajira y su posterior explotación en Campo ballena en 1977¹, tras un largo periodo de bajo crecimiento de este recurso en la economía del país, el gobierno establece el primer plan nacional de uso general del gas natural, el cual fue denominado “Gas para el cambio”² en el año de 1986, pero es solo hasta 1993 bajo el liderazgo de Ecopetrol, donde se masifica la producción y demanda con la interconexión de los principales yacimientos y centros de consumo con la construcción de más de 2,000 km de gaseoductos que conectaron al departamento de la guajira con: el centro y suroccidente del país y lo llanos orientales. Posteriormente se brindaron concesiones para la distribución y cobertura del servicio a los demás departamentos del país [8].

¹ El campo Ballena se ubica en el municipio de Manauré en el departamento colombiano de La Guajira cuenta con una capacidad de producción de 45 Mpc/d (Millones de pies cúbicos por día) Gas natural y condensados. Se inicia su construcción en 1973 y es finalizado en 1977. Actualmente sigue activo.

² El programa gas para el cambio permitió: ampliar el consumo de gas en las ciudades, realizar la interconexión nacional y tener nuevos hallazgos.

Con miras de una expansión y desarrollo del gas natural como fuente activa en el consumo energético colombiano el gobierno nacional estableció en el periodo consiguiente (1998-2007), planes, estrategias y proyectos para la consolidación y dinamización del gas natural en Colombia. Además, se implementó la misma dinámica para la masificación del gas vehicular natural GNV en donde se ofrecieron descuentos y bonos para popularizar el consumo y beneficiar a quienes utilizaran este combustible.

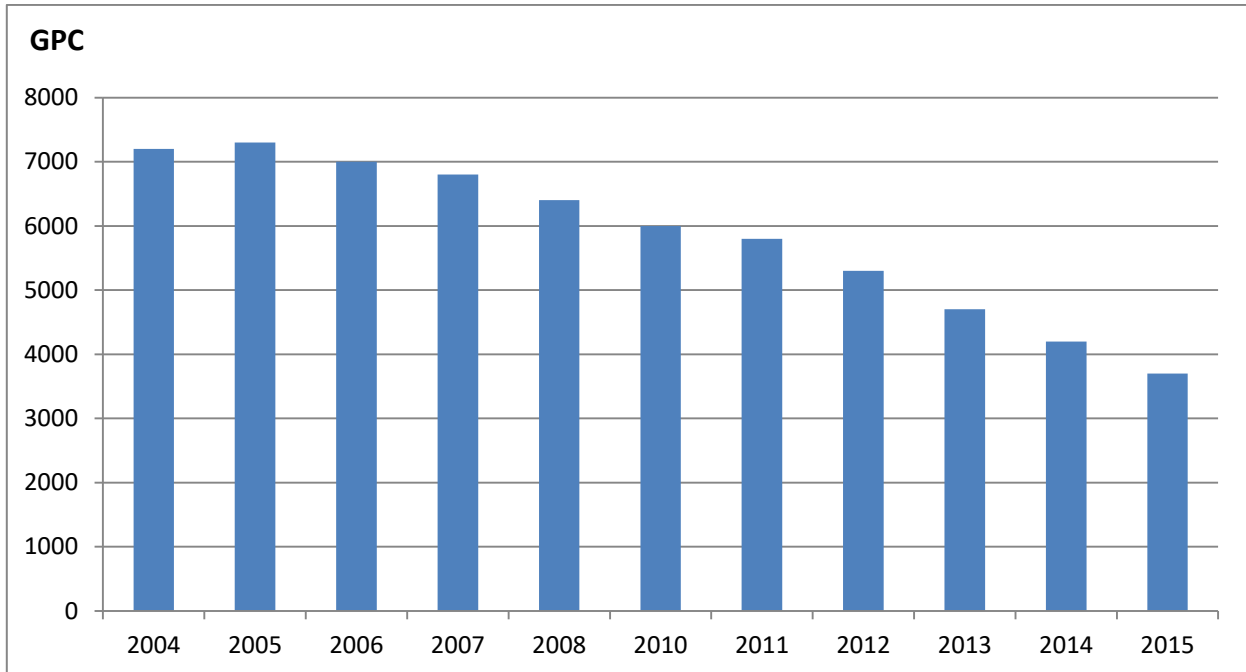
En la época actual Colombia se cuenta con más de 3,882 Km de gaseoductos y 23 cuencas sedimentarias las cuales se clasifican en: cuencas con producción y sin producción. Las cuales se clasifican según el conocimiento geológico, geofísico, técnico y por su aprovechamiento de hidrocarburos a nivel comercial. Los principales agros de explotación están ubicados en las zonas de: los llanos orientales, en la guajira, valle medio³ y valle superior⁴ del Magdalena, como en Catatumbo. Las cuencas sin producción se encuentran en las regiones nacionales de: Amazonas, Caguán – Vaupés, Cesar, Cordillera oriental, Cauca, Urabá, Choco, Tumaco, Sinú y el Pacífico [9].

El ministerio de minas y energía colombiano estimó en el periodo del 2003 al 2005 que se contaba aproximadamente con 96 TPC de gas natural en las reservas potenciales, en donde 54 TPC (el 56%) están ubicados en las cuencas de los Llanos Orientales, valles superior, medio e inferior del Magdalena, del Putumayo y la Guajira. El 44% restante de gas natural es decir (42 TPC aproximadamente) se encuentran en las cuencas que no se encuentran en producción. Para finales del 2005 “ECOPETROL S.A. a diciembre 31 de 2005 el país contaba 7,311 GPC con reservas totales de gas natural: 3,994.9 GPC de reservas probadas, (de las cuales 1,810.1 GPC son reservas desarrolladas y 2,376.8 GPC no están desarrolladas) y 1,709.6 GPC de reservas no probadas. Se cuenta además con 937.2 GPC que están proyectados para el consumo en operación de los campos”(Chain gas natural, 2005, p. 43). Así pues, se estimó para aquel año que del total de las reservas desarrolladas solo 872.9 GPC sería la cantidad de combustible útil para el mercado más 600 GPC de Gibraltar.

³ La cuenca del Valle Medio del Magdalena está localizada geomorfológicamente a lo largo de la porción central del valle cursado por el río Magdalena, entre las cordilleras Oriental y Central de Los Andes colombianos, cubriendo un área de 32.000 km². Comprende parte de los departamentos de Boyacá, Santander, Cundinamarca y Antioquia, entre otros.

⁴ La cuenca del valle superior del Magdalena consiste en una provincia petrolífera, localizada en la región centro-sur entre las cordilleras Central y Oriental, cubriendo un área de 26.200 Km².

Grafica 5. Proyección reservas de gas natural (2004 – 2015).



Ministerio de minas y energía.

Las reservas proyectadas de gas natural se justifican en la gráfica 5, en donde se evidencia el decaimiento de este hidrocarburo en el territorio nacional, en donde en el 2005 alcanzó la mayor cantidad de GPC⁵ proyectada y en el periodo posterior su disminución estuvo en el margen de un 3% a 4% anual, llegando al 2015 con total de reservas estimadas de 3800 GPC, con lo anterior el MME⁶ pronostico un desbalance entre demanda y producción del combustible, para lo cual opto por realizar un plan intenso y sistemático de exploración de hidrocarburos con el fin de garantizar el abastecimiento de este recurso tanto a nivel nacional como para fines de exportación [10].

Para diciembre 31 del 2013 el ministerio de energías en conjunto con UPME determino que las reservas totales con las que contaba el país eran de 6.41 TPC de las cuales las reservas probadas merecieron un 86% las cuales equivalen a 5.51 TPC, las reservas posibles se estimaron con 0.39 TPC⁷ logrando el 6% y las reservas probables con un 8% que corresponden a 0.51 TPC, en la gráfica 6 se muestra la disminución de reservas en el 2012: probables decayeron en un 20% estas se incorporaron a las probadas incrementándose en un 5%. En el 2013 las

⁵ GPC, Giga pies cúbicos.

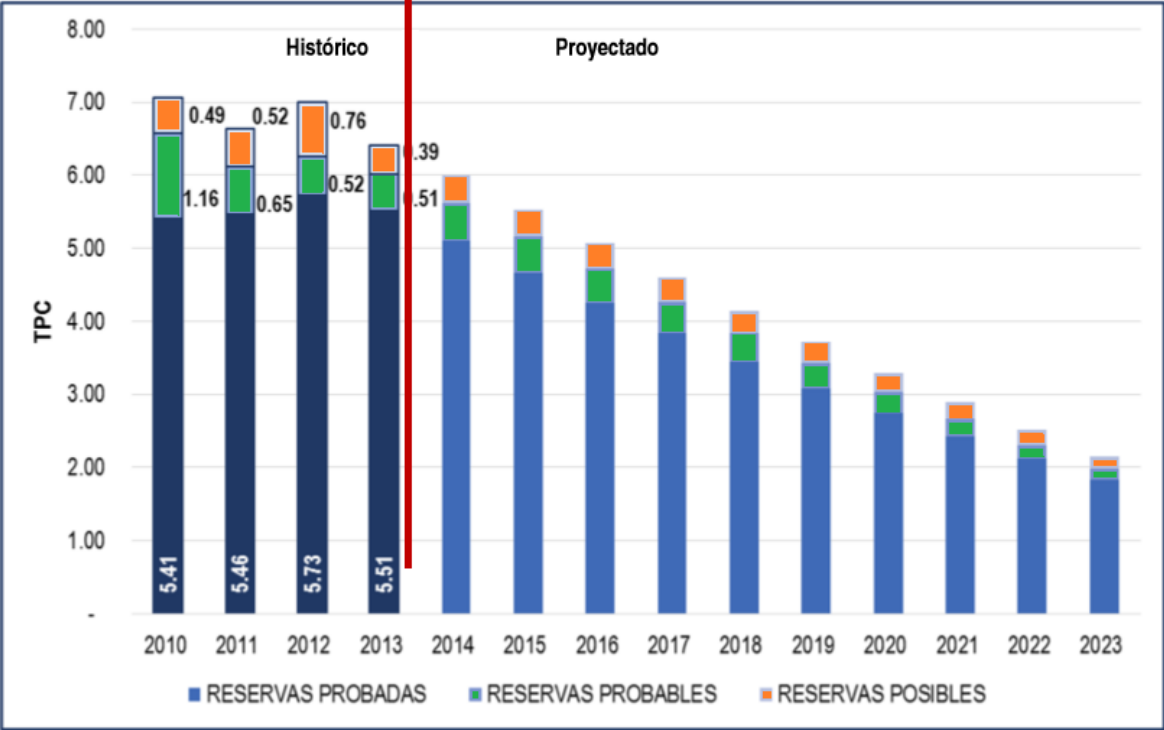
⁶ MME, ministerio de Minas y Energía.

⁷ TPC, Tera pies cúbicos.

reservas disminuyeron con respecto al 2012 en porcentaje los stocks: 4% probadas, 3% probables y 48% posibles.

Se pronosticó en este año un decaimiento más severo que en los años previos, en el que las reservas posibles y probables serán cada vez más escasas con forme el tiempo avanza y las probadas no podrían cumplir con la demanda pronosticada de gas natural para el año 2023 [11].

Grafica 6. Histórico/Proyección reservas de gas natural.



ANH 2014.

Por lo contrario la demanda de este energético augura un incremento constante en el tiempo, proyecciones realizadas por el MME⁸ y empresas energéticas como: UPME, Chevron, Concentra y Ecopetrol, manifiestan que los sectores consumidores de gas natural ampliarán su índice de consumo, dichas divisiones en las que se basaron para realizar un estudio de proyección son los sectores: residencial, comercial, industrial, petroquímico, petrolero (Ecopetrol), transporte (GNV) y termo eléctrico. En la gráfica 7 se observa la evolución de consumo de gas natural en el país; iniciando desde el 2015 en el cual se obtuvo un incremento del 7.9% con respecto a la demanda del año previo y culmina con la apreciación del año 2029 con un incremento del promedio de 6% al 6.48% [12].

⁸ MME, Ministerio de minas y energía Colombia.

La demanda a futuro está evaluada en proyecciones estocásticas de tres escenarios: alto, medio y bajo. Los cuales poseen una media del 4.18%, 3.82% y 3.68% de crecimiento anual respectivamente.

Grafica 7. Proyecciones de demanda de gas natural (2015-2029).



	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
— Esc. medio	958	1038	1073	1130	987	1045	1118	1182	1234	1282	1356	1444	1526	1618	1708
— Esc. alto	1087	1263	1202	1269	1251	1297	1364	1400	1415	1430	1436	1514	1538	1676	1765
— Esc. Bajo	832	898	945	1018	861	941	1026	1088	1139	1188	1262	1350	1431	1524	1613

UPME, Chevron, Ecopetrol, Concentra 2015.

Considerando los pronósticos de demanda y la información de reservas de gas natural en Colombia se puede concluir que el país estará en un déficit de esta fuente energética para los años 2023 en adelante y por lo tanto deberá ser subsanado con nuevas reservas (posibles, probables y probadas) que brinden a la nación confiabilidad en el abastecimiento para cada sector y región, pero también se deben buscar una segunda entrada de gas natural importado [13].

Se deberá terminar la planta de regasificación en Cartagena⁹ antes del 2017 y deberá estar en pleno funcionamiento antes del 2018, de no ser así la nación encontrara graves dificultades de abastecimiento antes del 2023, pero también según estudios de MME se deberá construir una segunda planta de regasificación en el puerto de Buenaventura o en áreas cercanas en enero de 2023 y se considera que deberá tener un mínimo de capacidad de regasificación de 400 MPCD¹⁰ y una capacidad de almacenamiento de 171,000 m³ de GNL [14].

1.3. EL GLP COMO FUENTE ENERGÉTICA.

El gas licuado de petróleo (GLP), es la mezcla de gases licuados presentes en el gas natural o disuelto en el petróleo. Los componentes del GLP, aunque a temperatura y presión ambientales son gases, son fáciles de licuar, de ahí su nombre. En la práctica, se puede decir que los GLP son una mezcla de propano¹¹ y butano¹² que suelen ser del orden del 60% de butano y un 40% de propano.

El propano y el butano están presentes en el petróleo crudo y en el gas natural, aunque se obtiene durante el refinado del petróleo, sobre todo como subproducto de la destilación fraccionada. Las fuentes de obtención de este combustible son: las refinerías (destilación del petróleo) y las plantas de proceso de gas natural, las cuales aportan alrededor de un (25%) y un (75%), de GLP respectivamente [15].

El GLP que se obtiene en refinerías proviene de convertir el estado gaseoso en el que se encuentra a presión atmosférica en líquido mediante compresión y enfriamiento, se necesita 273 litros de vapor de GLP para obtener un litro de GLP líquido. Para su obtención, el petróleo se somete a una operación denominada destilación, mediante la cual se van separando ordenadamente, de acuerdo con sus densidades y puntos de ebullición, los diversos componentes: gasolinas ligeras, kerosenes, butano, propano, gasoil, fueloil y aceites pesados.

Los gases derivados de esta destilación que forma el grupo de los GLP son el butano (40%) y el propano (60%), que se distinguen entre sí por: su composición química, presión, punto de ebullición y su poder calorífico. Comercialmente

⁹ Se localiza en Barú, su construcción inicio en julio de 2015 por la Sociedad Portuaria el Cayo. En la actualidad los trabajos para su finalización se encuentran en un 70%. Proporcionará cerca 400 MPCD con lo que se podrían generar 2000 MW.

¹⁰ MPCD, mega pies cúbicos diarios.

¹¹ El propano (químicamente) es un compuesto orgánico, cuya molécula, saturada, está compuesta por tres átomos de carbono y ocho de hidrógeno (fórmula C₃H₈). Poder calorífico 22000 Kcal/m³.

¹² El butano es parecido al propano, salvo que su molécula, también saturada, está compuesta por cuatro átomos de carbono y 10 de hidrógeno (fórmula C₄H₁₀). Poder calorífico 28300 Kcal/m³.

hablando, cuando nos referimos a propano hablamos de una mezcla del 80% de hidrocarburos C3 y un máximo del 20% de hidrocarburos C4. Por su parte, lo que se vende bajo la denominación butano es un líquido que consta de un mínimo del 80% de hidrocarburos C4 y un máximo del 20% de hidrocarburos C3. Las proporciones anteriores pueden variar en función de la aplicación que se dé al gas [16].

La obtención de GLP a partir de gas natural es conocida como el proceso de licuefacción del mismo. Dicho proceso es explicado a continuación; El gas natural está constituido por: metano, etano, propano, butano e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas tales como el azufre. Este gas se envía a las plantas de proceso; en primera etapa la corriente de gas pasa por una planta endulzadora, donde se elimina el azufre. Posteriormente se introduce en una planta criogénica, en la cual mediante enfriamiento y expansiones sucesivas se obtiene dos corrientes: una gaseosa formando metano (gas residual) y otra líquida (licuables). En el proceso siguiente de fraccionamiento, la fase líquida se separa en diferentes componentes: etano gas licuado de petróleo y gasolinas naturales [17].

Sin embargo existen diversos procesos de refinería que los pueden producir:

- "Reformado catalítico": Se alimenta de naftas ligeras para producir aromáticos y gasolinas. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 10%.
- "Cracking catalítico": Se alimenta de gasoil o nafta produciendo etileno y propileno para petroquímica. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 12%.
- "Steam Cracking ": Se alimenta con gasoil o nafta produciendo etileno y propileno. El rendimiento en GLP está entre un 23 – 30%.
- "Polimerización y alquilación": Se alimentan de butenos para producir gasolinas. El rendimiento en GLP está entre un 10 – 15%.
- "Cracking térmico": Se alimenta de gasoil y fueloil para producir gasolina. El rendimiento en GLP está entre un 10 - 20%.
- "Coking y visbreaking": Se alimenta de gasoil pesado y residuo para producir coque. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 10%.

Con el fin de facilitar su transporte y almacenamiento, el gas licuado del petróleo que se encuentra en estado gaseoso a condiciones normales de presión y temperatura (1 atmósfera y 20°C), se licua y se utiliza a bajas presiones entre (5 y 9 atmósferas) para así mantenerlo en estado líquido y almacenarlo en tanques o en depósitos. Para obtener líquido a presión atmosférica, la temperatura del butano debe ser inferior a -0,5°C y la del propano a -42,2°C. En cambio, para obtener líquido a temperatura ambiente, se debe someter al GLP a presión; Para el butano, la presión debe ser de más de 2 atmósferas. Para el propano, la presión debe ser de más de 8 atmósferas.

El poder calorífico comercial del GLP, el cual se estima en poder calorífico para el butano: inferior (PCI) 10.938 Kcal/Kg y superior (PCS) es 11.867Kcal/Kg. Para el propano el poder calorífico inferior (PCI) es 11.082 Kcal/Kg y superior (PCS) es 12.052 Kcal/Kg para el propano, con lo anterior se habla de que 1 Kg de propano equivale aproximadamente a la energía proporcionada por: 1,24 m³ de gas natural; 1,20 L de fuel-oíl; a 3 m³ de gas ciudad; 1,30 L. de gasoil; 3 a 6 Kg de leña; 14 KW de electricidad y a 2 Kg de carbón [18].

Debido a su poder calorífico, a su baja contaminación al medio ambiente y al bajo precio en el mercado es utilizado en gran cantidad de áreas y actividades en todo el mundo según la asociación mundial de gas natural de petróleo: “El GLP se utiliza de más de mil maneras. En la actualidad, cientos de millones de personas lo utilizan y dependen de él para aplicaciones muy variadas, en el sector terciario, la industria, el transporte, la agricultura, la generación de energía, o para cocinar, como combustible de calefacción y en aplicaciones recreativas”, todas estas alternativas hacen de esta fuente energética un recurso con elevada demanda en todo el mundo y con una perspectiva de crecimiento conforme a la gran oferta que se ha generado en la época actual, donde en el 2011 obtuvo un consumo global de 252 millones de toneladas (39,000 GBTUD), esto gracias a su elevada calidad como subproducto de las actividades de refinación de petróleo y procesamiento de gas natural, lo que ha catapultado su consumo por su flexibilidad de usos (en profundidad: 1.3.1.3) y su gran oferta (en profundidad 1.3.1.1),[19].

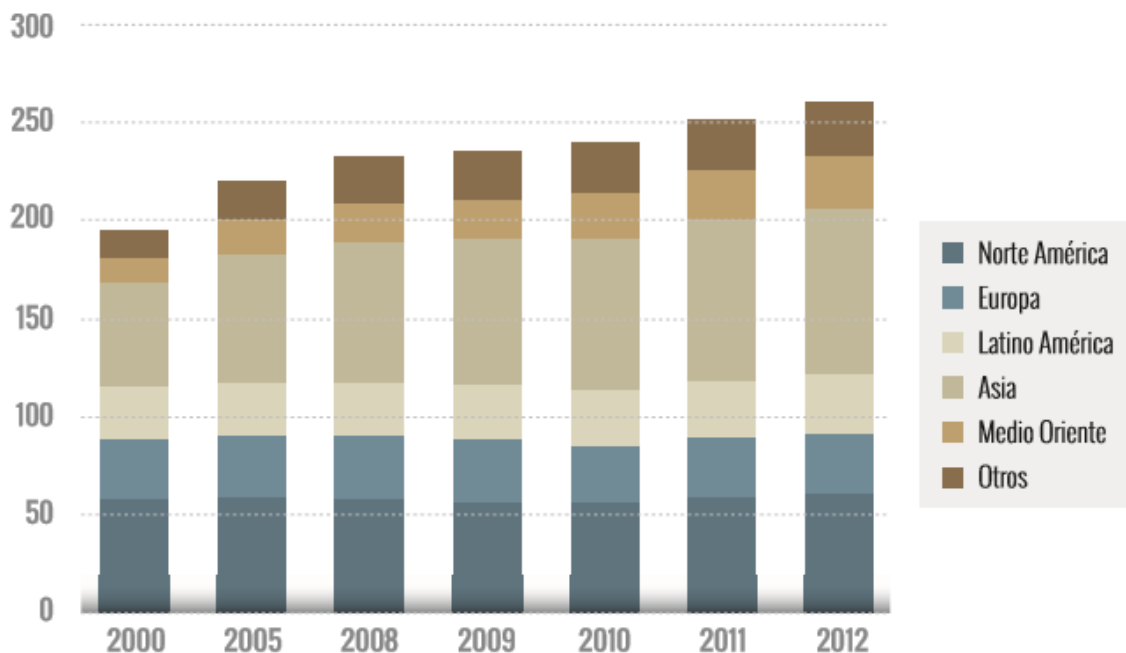
La demanda mundial se ha caracterizado en los últimos años por el incremento acelerado en los territorios con desarrollo petroquímico debido a que el GLP se utiliza como materia prima, de estas regiones las que poseen los mayores índices de consumo fueron: Asia con un 32% (2.8 millones de BPD¹³) y Norte América con un 23% (2 millones de BPD). En las zonas latinas la demanda ha permanecido estable con un consumo anual desde el año 2000 con un gasto de 100 millones de BP centrando en los sectores residencial y comercial. Además, la incursión de del uso para automóviles como es el caso de Perú. Regiones como Europa y Medio Oriente han mejorado en la utilización de GLP en más sectores de utilización. Para el periodo del 2000 al 2012 el incremento mundial de consumo anual esta en acenso con un margen del 2% (grafica 8).

Aunque la demanda del GLP se haya basada en el consumo residencial, comercial, industrial y petroquímico. En la actualidad varios países han implementado al GLP como una fuente de energía alternativa para el funcionamiento del sector automotriz (Autogás) y esto se debe principalmente a las ventajas que ofrece en términos de baja contaminación ambiental, bajos

¹³ BPD, Barriles equivalentes de petróleo diarios.

precios y mayor poder calorífico con respecto a otros sustitutos de la gasolina y el gasoil.

Grafica 8. Demanda regional de GLP 2000-2012, (Millones de toneladas).



NPGA 2012 Winter Board of Directors Meeting.

1.3.1. Panorama internacional.

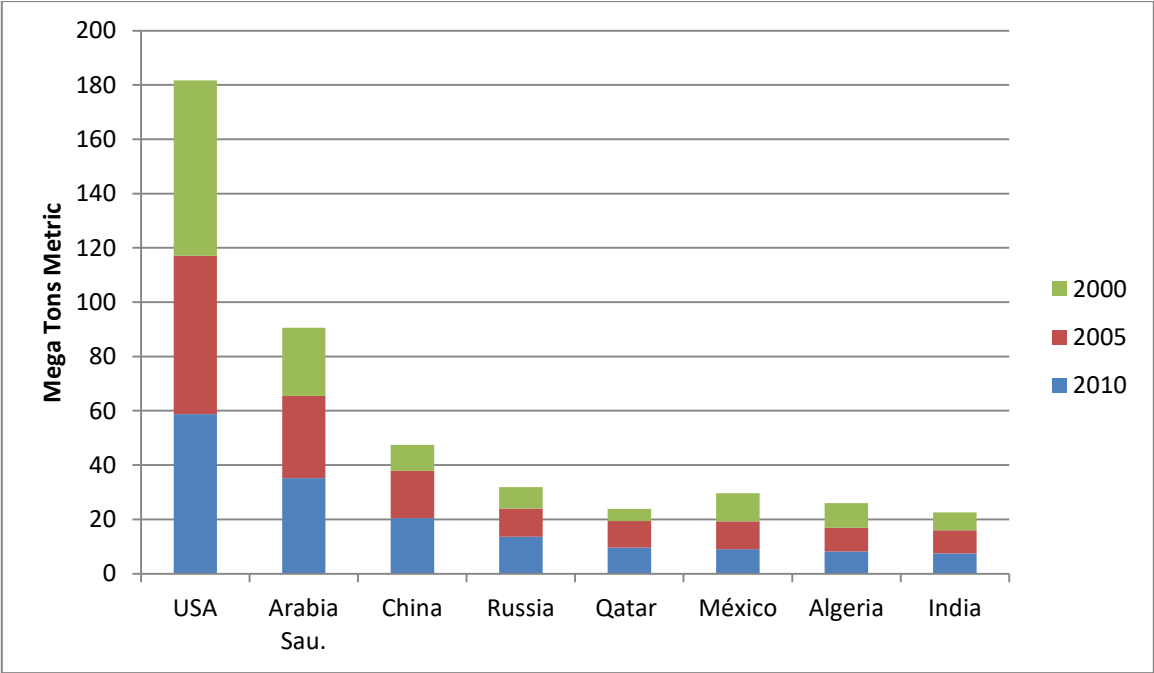
1.3.1.1. Producción.

La asociación mundial de GLP (WLPGA), estima que cerca del 60% de la producción mundial de GLP es otorgada por el proceso de transformación del gas natural y el 40% restante es aportado por la refinación de crudo. Las regiones con mayor capacidad de producción de GLP y los cuales aportan el 54% al mercado mundial son las regiones que comprenden: Norte América, África y Asia. En las cuales las mayores contribuciones se generan por los países: USA, Canadá, México, China, Rusia, Arabia Saudita, India y Argelia. Y el otro 46% es otorgado por los países restantes (Figura 9). [20]

La mayor capacidad de producción a través de la historia mundial del GLP la ostentan los países: USA, Arabia Saudita, China y Rusia, los cuales han obtenido

la mayor cantidad de este recurso a nivel mundial desde la época de 1990 al 2010 con: 1,252.104 MTm¹⁴, 531.88 MTm, 216.04 MTm y 152.56 MTm respectivamente con lo cual se han alcanzado un acumulado neto de 2,152.584 MTm y un crecimiento conjunto anual de producción del 0.056% en donde USA es el país que más altibajos presenta respecto a los demás países, pero aun con el descenso de producción anual que ha presentado desde el 2001 con una disminución del 0.0151% sigue encabezando la lista de los países con mayor fabricación de GLP en el mundo.

Grafica 9. Productores mundiales de GLP (MTm).



Satistical Review of global LPG 2006 & United Nations on 09 Sep 2014.

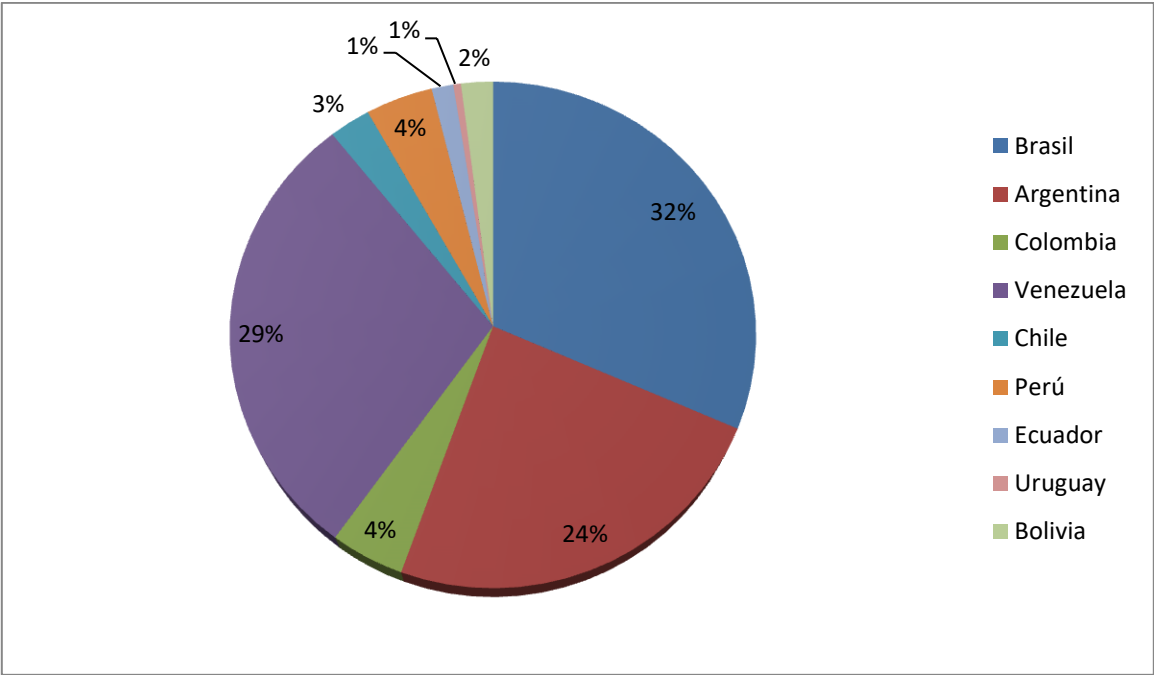
Para la región de Sur América el balance de elaboración de GLP es de 16.15 MTm anuales en donde el 31.94 % de esta realización es otorgada por Brasil que en el 2006 alcanzó su máximo indicador de producción con 5780 KTm y por Venezuela con un 29,28%. El 23.93% es aportado por Argentina y un 4.43% concedido por Colombia con un promedio de aportación anual de 1314.36 KTm y el restante 10.42% es proporcionado por los países restantes.

En la gráfica 10 se puede ver el aporte porcentual de cada país productor de GLP en Sur América, en la cual se observar el bajo aporte de países como: Ecuador, Uruguay, Bolivia y Chile. Siendo estos participantes de la producción anual con un índice menor al 3% respectivamente.

¹⁴ KTm, Kilo toneladas métricas.

La situación de producción para la zona de centro de América sus países generan un aporte relativamente bajo con 33.7 KTm de GLP al año en donde las naciones más influyentes son: Costa Rica, El Salvador y Nicaragua. En estos el promedio de elaboración se ha mantenido constante hasta finales del 2011. [21]

Grafico 10. Productores Sur Americanos de GLP (Porcentual).



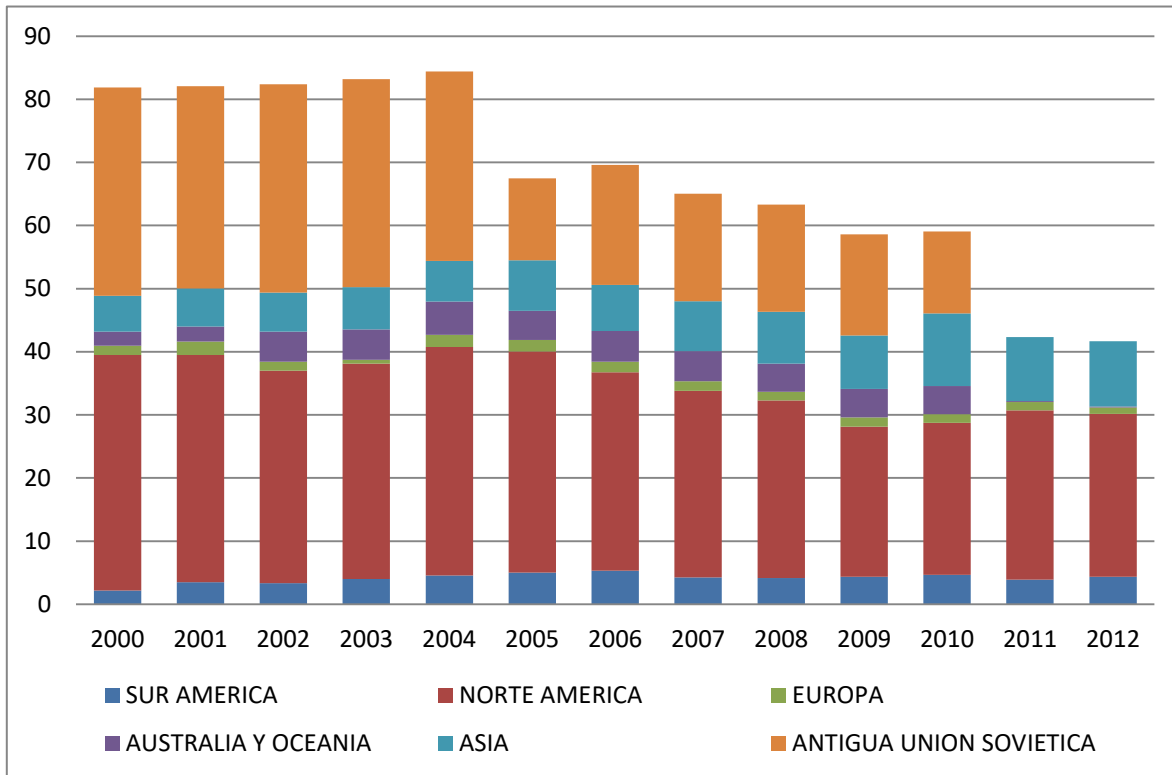
Satistical REview of global LPG 2006 & United Nations on 09 Seo 2014.

La producción mundial de GLP en plantas de refinado de petróleo en el periodo que comprenden los años del 2000 al 2012, fue dominado por la región de África la cual consigo una participación del 52.22% del total de la producción, con lo cual logro una producción aproximada de 683,47 MTm¹⁵ de GLP con un promedio de producción anual de 52,57 MTm. Norte América y Asia en conjunto obtuvieron un 38,57% con una producción aproximando de 38.83 MTm anuales aun cuando USA obtuvo una de las mayores cifras de elaboración con un margen de 24.73 MTm anuales y se ubica tanto históricamente como actualmente como una de las potencias generadoras de GLP en el mundo junto con Arabia Saudita que tiene un índice contiguo de producción en plantas de refinado. Para el resto de continentes la producción se mantuvo por debajo del 10% de extracción mundial de GLP por refinado de petróleo, con 215,192 MTm. Además, de la participación casi nula de zonas como Centro América y los países de la antigua unión soviética en donde la

¹⁵ MTm, Mega toneladas métricas.

manufacturación de este recurso es básicamente por transformación de gas natural y no por crudo (Grafica 11).

Grafica 11. Producción regional por plantas de crudo. (MTm)



Satistical Review of global LPG 2006 & United Nations on 09 Sep 2014.

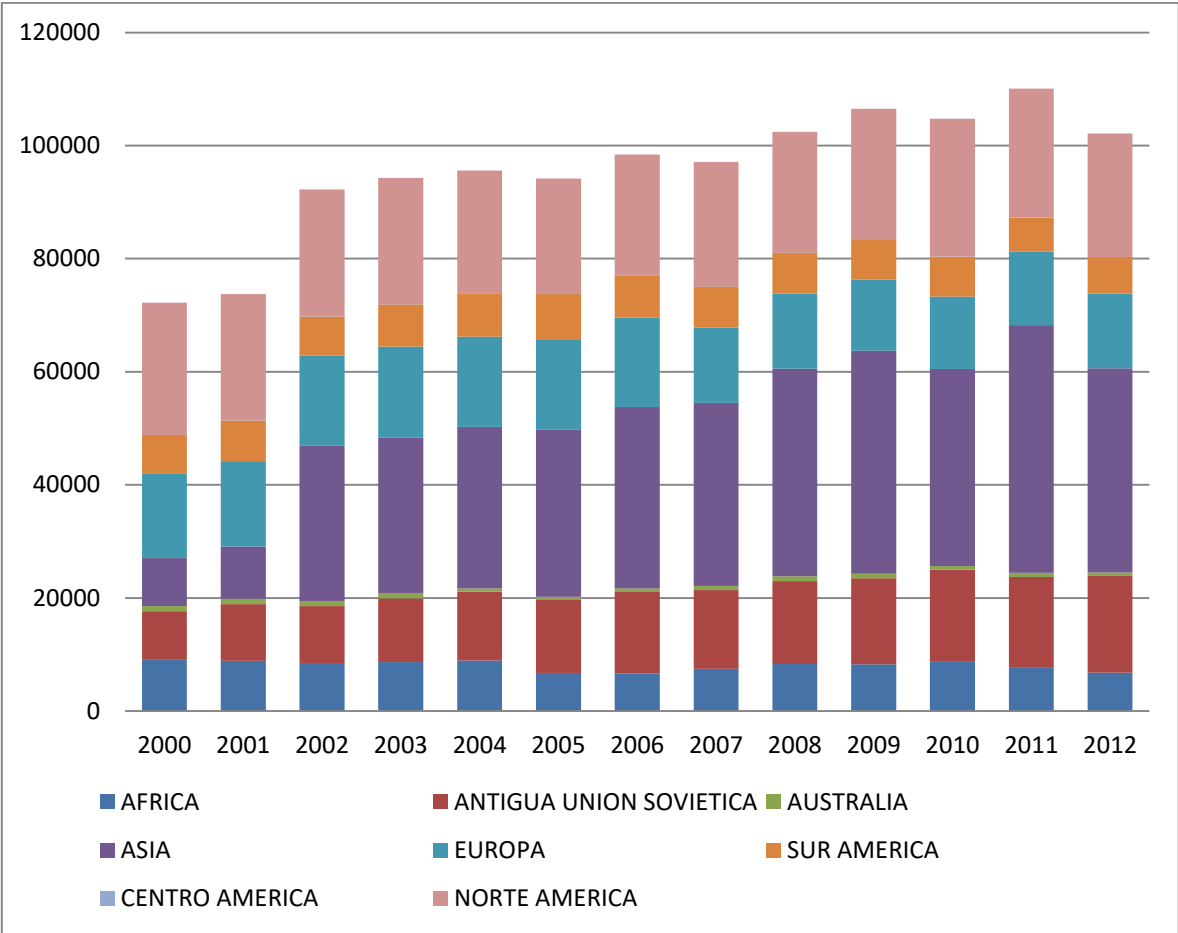
El proceso de extracción de GLP por procesamiento de gas natural, se encuentra en mayor proporción en todas las zonas del mundo con una elaboración de 1243.51 MTm en los años que comprenden del 2000 al 2012 aproximadamente, con un promedio anual de 94.96 MTm. Las regiones que más producen GLP de esta manera son Asia y Norte América, con un aporte de 30.94% y 23.43% respectivamente generando en conjunto 955.77 MTm en 12 años (2000-2012) y 51.26 MTm anuales.

Europa y los países de la antigua unión soviética en unión suministran un porcentaje próximo a Asia y Norte América, cuyo aporte oscila en 29.21% anual en donde su participación es de 28.76 MTm, en donde Europa es uno de los países con mayor incursión y utilización del GLP como fuente energética alternativa para el sector automotriz (Autogás). África y latino América han mantenido relativamente su tendencia de fabricación y se mantienen desde el 2000 con cerca del 9% de elaboración por procesamiento de gas individualmente. Para el caso de

Sur América el país con mayor capacidad de producción es Brasil el cual logro un crecimiento del 1.68% y 4,3 MTm anual (promedio). [22]

Australia y Oceanía es la zona con menor participación en la elaboración, contribuyendo con un escaso 0.73% y con una producción anual que se encuentra alrededor de 755 KTm. Además de una reducción promedio anual del 2.44%.

Grafica 12. Producción mundial por procesamiento de gas natural (KTm).



Satistical Review of global LPG 2006 & United Nations on 09 Sep 2014.

1.3.1.2. Infraestructura de transporte.

El transporte de GLP depende de la ubicación de las plantas de producción en relación con el destino de entrega y la ubicación de las plantas de abastecimiento y almacenamiento, para tal caso puede ser transportado por diferentes vías gracias a su facilidad de conversión de estado gaseoso a líquido y viceversa, por lo cual es posible ser trasladado por: gasoducto, buques a presión y refrigerados, en camiones cisterna (carretera) y por ferrocarriles en vagones cisterna. [23]

Estados Unidos uno de los líderes en producción de GLP utiliza tuberías para su transporte ya que es más eficaz a la hora de costos y tiempo. Además, facilita la transferencia de grandes volúmenes a largas distancias dentro de su territorio, en el caso de exportación son utilizados buques presurizados con una capacidad inferior a 2000 m³ o por buques semi-refrigerados que pueden contener cargas entre 2500 y 5000 m³ y embarcaciones totalmente refrigeradas que pueden movilizar hasta 100 km³. En cuestiones de costo de construcción de dichos buques es mucho más rentable la fabricación de barcos totalmente refrigerados con respecto a los presurizados dado que, se genera una mayor economía al transportar mayor carga de GLP. [24]

Los países con menor capacidad de producción se ven en la necesidad de importar GLP como es el caso de España que importa el 47% de su consumo y es suministrado por vía marítima los cuales arriban a las plantas de almacenamiento, este país cuenta con 21 centros de almacenamiento y envasado, las centrales que se encuentran cerca de refinerías son abastecidas por medio de gasoductos y las que se hayan en el interior de la región por medio de camiones y por vías férreas. [25]

Para el transporte al mercado se encuentran dos modos de entrega de GLP; el primero es por medio de vehículos cisternas de diferentes tamaños y características que llenan los tanques fijos de las instalaciones que emplean este combustible, el segundo por medio de cilindros o bombonas.

Especificación de las diferentes formas de transporte de GLP:

- Gasoductos.

Un gasoducto es una conducción de tuberías que sirven para transportar gases combustibles a gran escala, el gas que transita por las diversas redes puede ser de baja, mediana y alta presión, en la tabla 1 se muestra las presiones máximas por tipo de tubería. Esta es la base con la que se determina la capacidad de flujo que tiene el gas que se extrae de los pozos o se transporta de las refinerías hacia las plantas de almacenamiento. Dichas presiones son las que hacen posible la

transmisión a través de las tuberías y determinan la longitud y diámetro del gasoducto. [26]

Tabla 1. Máximas presiones de operación permisible – MPOP.

Clase de sistema de tubería y clase de usuario.	Gas Natural	GLP
Alta presión: $P > 500$ kPa ($P > 5$ bar)	kPa (bar)	kPa (bar)
Líneas de transporte.	Vér nota 4	N.A.
Líneas primarias.	1900 (19 ¹)	N.A.
Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales, derivadas de líneas de transporte o líneas primarias.	2)	N.A.
Media presión: 14 kPa (140 mbar) $< P = 500$ kPa (5 bar)	kPa (mbar)	kPa (mbar)
Líneas secundarias, líneas de acometida y líneas matrices exteriores a la edificación.	500 (5 000)	200 (2 000)
Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales, derivadas de líneas secundarias.	2)	200 (2 000)
Líneas matrices interiores en instalaciones para suministro de gas destinadas a usos residenciales y comerciales.	35 (350 ³)	35 (350 ³)
Líneas individuales en instalaciones para suministro de gas destinadas a usos comerciales.	35 (350 ⁵)	35 (350 ⁵)
Baja presión: $P \leq 14$ kPa (140 mbar)	kPa (mbar)	(kPa mbar)
Líneas individuales en instalaciones para suministro de gas destinadas a usos residenciales para suministro de gas a artefactos con regulador asociado.	14 (140)	14 (140)
Líneas individuales en instalaciones para suministro de gas destinadas a usos residenciales para suministro de gas a artefactos sin regulador asociado.	2,3 (23)	3,7 (37)

NTC INEN 2494 (2010).

Las presiones bajas resultan poco útiles para el comercio debido a la elevada inversión que se debe implementar para su traslación. El gas a alta y mediana presión por lo general son los más óptimos tanto económicamente como en volumen desplazado. Para mantener las presiones en los gasoductos se utilizan compresores especialmente diseñados para suplir las necesidades demandadas.

Las tuberías, válvulas y conexiones pueden ser fabricadas e implementadas en diferentes tipos de materiales como lo son: acero, cobre y polietileno. Siempre y cuando cumplan las siguientes normas: API 5L, ASTM A 53, ASTM A 106, ASTM A 134, ASTM A 135, ASTM A 139, ASTM A 333, ASTM A 381, ASTM A 671, o ASTM A 672, según corresponda.

- Buques gaseros.

Son navíos de transporte de gas natural y de gas licuado de petróleo y se diferencian unos de otros debido a que los primeros transportan el gas en estado líquido a temperaturas de hasta -170 °C y los segundos a -50 °C y con una presión de 18 Kg/cm². Son de fácil identificación puesto que en su cubierta

sobresalen grandes tanques esféricos, cilíndricos o una elevada cubierta (Sistem Technigaz) y suele ser fabricados en aleaciones de: aluminio, magnesio y manganeso. Existen tres tipos diferentes según la técnica, manipulación y transporte:

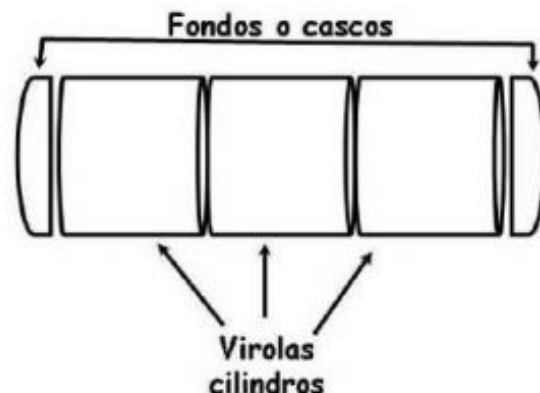
Presurizados los cuales trasladan el producto a temperatura ambiente, obteniendo la licuefacción por incremento de presión. Los refrigerados, en los cuales el gas se licua por descenso de temperatura hasta $-134\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión atmosférica. Y los mixtos o semi-refrigerados con temperaturas hasta $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se construyen para una determinada gama de gases. [27]

- Transporte terrestre a granel.

El transporte a granel de GLP es transportado en camiones cisterna, almacenado en estado líquido, debido a que en este estado ocupa menor volumen unas 250 veces con respecto a su estado original (gaseoso). En los recipientes, se encuentran en fase de vapor húmedo en donde la fase líquida ocupa la parte inferior aproximadamente el 85% del depósito y el vapor la superior a modo de burbujas aproximadamente el 15%, coexistiendo en equilibrio de presiones. [28]

Los depósitos cisterna son construidos con base a dos virolas cilíndricas y dos cascos (figura 13), estas bases están unidas mediante soldaduras. Los cascos son más arqueados siempre y cuando este diseñado en función de resistencia de presiones altas, para el caso de líquidos los cascos suelen ser más planos y en el caso de los gases licuados a presión son más semiesféricos. Los depósitos por lo general llevan aros exteriores soldados para brindar mayor resistencia. [29]

Gráfico 13. Representación de un depósito.



Camión cisterna GLP- Alejandro Hurtado.

Las características que se toman en cuenta para el diseño de depósitos cisterna son: [30]

- Capacidad: 25 m³.
- Límite máximo de carga: 85% según la norma ADR.
- Compartimiento.
- Presión de servicio: 20 Kg/cm²
- Válvula de seguridad.
- Material: Acero al carbono, virolas 10 mm, casco 12 mm.

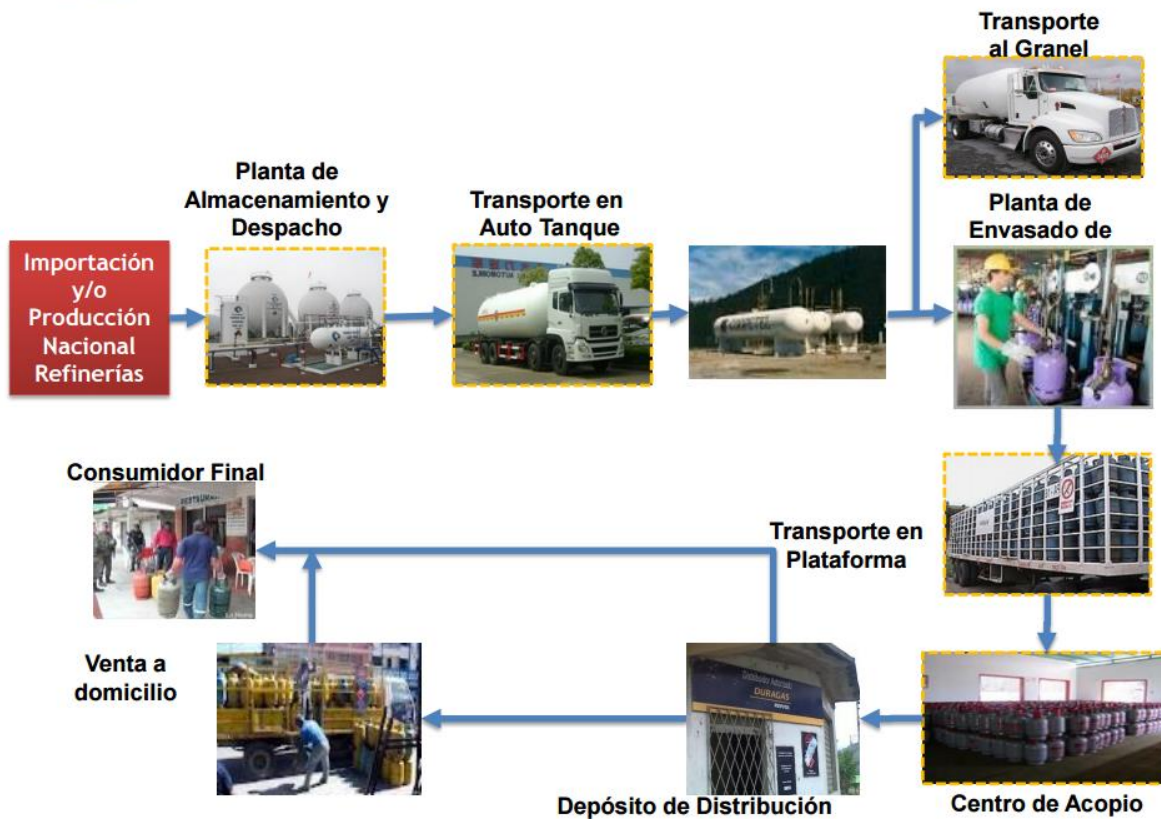
En cuanto a los accesorios que como mínimo debe poseer un camión cisterna son: [31]

- Medidor de volumen.
 - Termómetro ubicado en el nivel mínimo de líquido.
 - Manómetro calibrado con conexión a la fase de vapor.
 - Válvulas de seguridad.
 - Válvula de exceso de flujo.
 - Válvula de drenaje.
 - Conducciones a masas para la descarga de corriente eléctrica.
 - Dispositivos de alivio de presión.
 - Protección de válvulas, accesorios y dispositivos protegidos contra colisión.
- Transporte terrestre en cilindros.

El transporte por cilindros es efectuado por camiones con plataformas para el traslado, diseñadas para el almacenamiento de bombonas y con la capacidad máxima de cilindros conforme a las especificaciones de carga de cada vehículo, el cual puede contar con hasta dos niveles (tipo barandas) y los cilindros deberán ser posicionados uno sobre el otro. Además, los tambores deberán ser transportados con las válvulas hacia arriba y agrupados en forma vertical. [32]

El traslado de los cilindros de la planta de almacenamiento hacia el camión contenedor, son conducidos por carretillas y nunca deben ser conducidos por el suelo o por rotación. En cuanto al envío del camión hacia el consumidor en la descarga debe evitarse toda forma de impacto al cilindro.

Gráfico 14. Cadena GLP.



ARCHE.

1.3.1.3. Almacenamiento.

El almacenamiento de GLP se realiza de dos formas; la primera es en plantas de almacenamiento y la segunda en plantas envasadoras. Se utilizan según la necesidad, capacidad y finalidad del combustible.

Las plantas de almacenamiento son instalaciones en las cuales se enlazan a las refinerías de crudo y las plantas de procesamiento de gas natural. Así como las instalaciones portuarias en las que se recibe el producto por proceso de importación, para ser suministro a las diversas compañías que distribuyen el producto a los consumidores finales.

Las plantas están situadas estratégicamente en las regiones con la finalidad de cubrir la demanda y permanecer operativas cada día del año bajo cualquier condición climática, política, cultural y social que pueda presentarse a lo largo del año. Además, almacenar las reservas de forma segura y estratégica del país y/o

región, tanto por cuenta de los gobiernos reguladores, productores, corporaciones, entes oficiales y privados como por los operadores de la instalación.

Todas las plantas en el mundo cuentan con elementos básicos comunes como lo son: zona de recepción del producto o conexión con la refinería, sistemas de filtrado y bombeo, tanques de almacenamiento con todos sus aditamentos (válvulas de acceso de flujo, de seguridad, niveles, termómetros, escaleras), tanques de aditivos, tanques separadores, sala de vaporización con tablero de operaciones y alarmas, sala de compresores (en los casos que se utilicen), planta de medición y regulación, red de incendio, zona de cargado de camiones cisterna y un laboratorio. Además, con todos los sistemas de seguridad y control necesarios para la buena operación del sistema, donde es posible manejar todos los subsistemas de la planta. [33]

El funcionamiento de la mayoría de las infraestructuras de almacenamiento a nivel mundial opera bajo la misma estructura; primero reciben el combustible por gaseoductos conectados directamente a las refinerías o plantas de procesamiento de gas natural, o por: buques, camiones o ferrocarriles cisterna. Dicho proceso es supervisado a partir de la sala de control, en donde se centralizan las operaciones de toda la planta como: el llenado de los tanques, la monitorización de la estación de bombeo, el control de grúas, la presión de abastecimiento, la temperatura del combustible, entre muchos otros.

Como segundo paso el combustible luego de ser recibido se acopia en tanques o depósitos según las características de GLP que se recibe, acto seguido se procede al análisis en laboratorios de las condiciones del material recibido, tanto como de entrada y salida de la planta. Posteriormente se efectúan procesos de control de calidad para garantizar la eficacia del producto final.

Por último se procede a trasladar el producto a las corporaciones y destinatarios que solicitan el producto por medio de camiones, trenes y buques cisterna a los cargadores de la instalación donde se recoge el combustible. [34]

Todas las plantas de almacenamiento cumplen con altas normativas de seguridad y están equipadas con las más avanzadas tecnologías de control, prevención y vigilancia. La seguridad es uno de los temas primordiales que se tiene en cuenta tanto en el diseño como en la construcción y manejo de la planta, los principales temas en los cuales se centran son: sistemas de prevención, protección contra incendios, sistemas anti rebosamiento de tanques, refrigeración, control de presiones y sistemas de vigilancia automatizada de todos los procesos que se realicen dentro de las instalaciones. [35]

Respecto al impacto ambiental deben estar diseñadas para minimizar las afectaciones ambientales y para ello recurren a diversas medidas, entre las cuales se destacan: tanques con techos flotantes, unidades de recuperación de vapores, sistemas de tratamientos de aguas contaminadas, sistemas de limpieza y purga de tanques, circuitos cerrados de aguas hidrocarbonadas y separación de aguas pluviales y aguas hidrocarbonadas.

1.3.1.4. Usos.

El GLP es uno de los combustibles con más usos en la actualidad cuenta con más de 1000 aplicaciones alrededor del mundo, dado que genera alternativas limpias y eficientes de energía, como precios asequibles muy competente entre la gama de combustibles fósiles.

Los usos más destacados y los cuales son los responsables del mayor porcentaje de demanda a nivel global, se haya centrado en seis sectores los cuales son: doméstico, industrial, industria química, transporte, refinerías y agricultura.

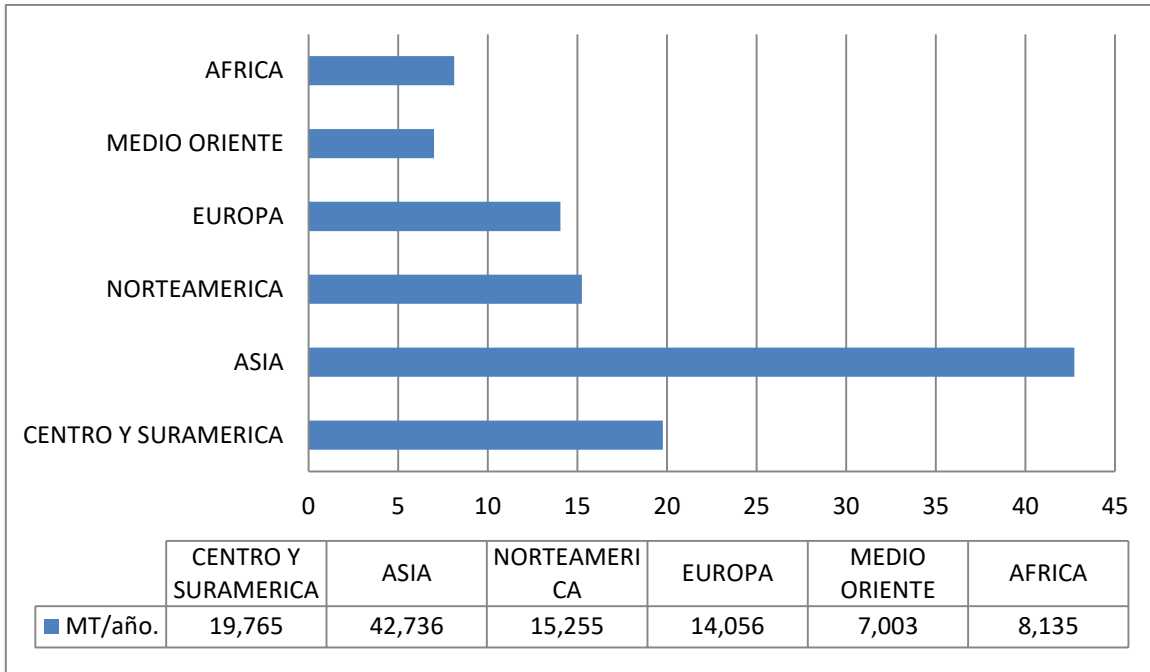
Cada uno de estos sectores presenta valores y tasas muy diferentes en cada región del planeta y esto es asociado a: cantidad de producción, desarrollo e implementación de tecnología para el uso del recurso, sociedad, normas y legislaciones, importación y exportación, influencia en los sectores, accesibilidad y precios del combustible. [36]

Participación de consumo de cada región del planeta por sector: [37]

- Doméstico.

El sector doméstico y comercial es la sección que más participación tiene en el mundo con una participación del 49.6% al año en el uso del GLP. En Centro y Suramérica el 74.96% del total de GLP utilizado en esta área se debe al sector doméstico, para el caso de Asia tiene un consumo del 60,32% y África con un 88,89% siendo estas tres regiones las que más GLP destinan al sector doméstico. Las otras zonas Norteamérica, Europa y Medio Oriente tiene una utilización del 27.22%, 36,03% y 50.42% respectivamente.

Gráfica 15. Consumo doméstico regional.

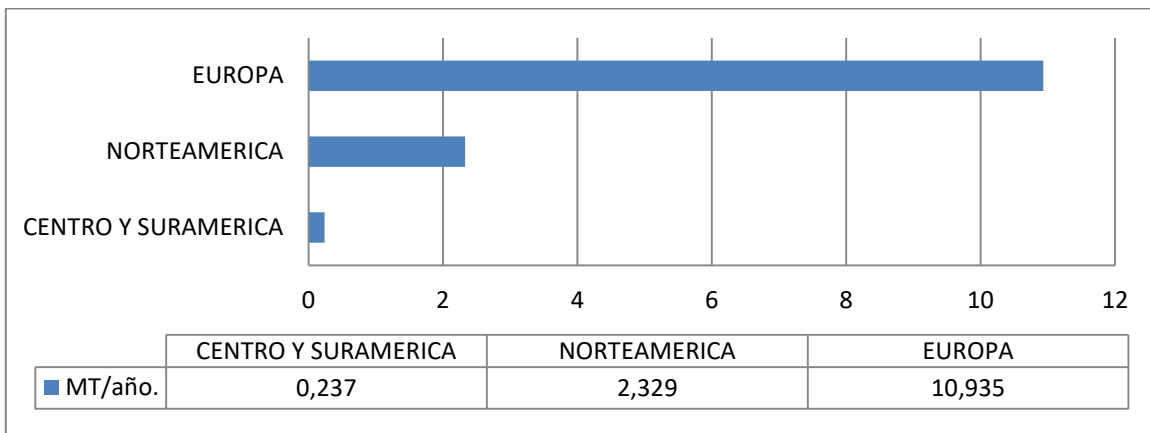


W LPGAS- 2006.

- Agricultura.

El sector de la agricultura es una de las áreas en cual se invierte la menor cantidad de GLP al año, se estima que la implementación mundial es del 6.28%. En regiones como África su uso es nulo, a diferencia de Europa que invierte el 28% de su GLP en dicho sector y Norteamérica con un 4.15%. Las restantes regiones tienen un consumo de menos de 1% en esta actividad.

Gráfica 16. Consumo agrícola regional.

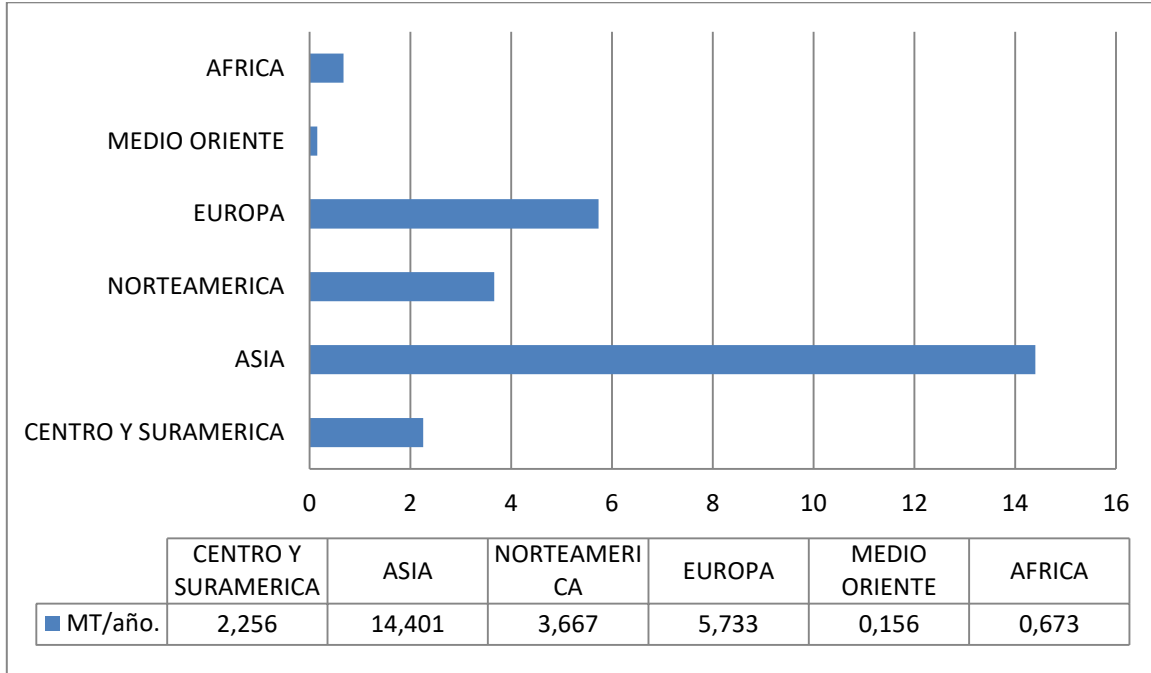


W LPGAS- 2006.

- Industria.

El GLP en la industria a nivel mundial tiene una participación del 12.48%. En donde la región con mayor capacidad de uso es Asia con un 20.32% seguida de Europa con 14,69% y por Centro y Suramérica con un 8%, las regiones con menor uso de GLP en este sector son Norteamérica, Medio Oriente y África con 6.5%, 1% y 7% respectivamente.

Gráfica 17. Consumo industrial regional.

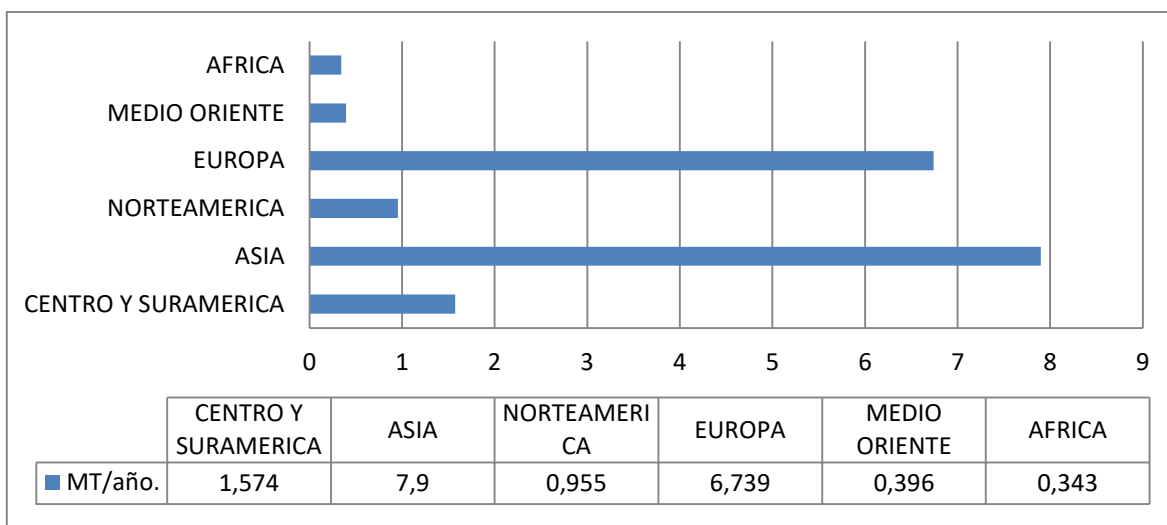


W LPGAS- 2006.

- Transporte.

En la división de transporte el consumo de GLP a nivel mundial es del 8%. Las regiones que más emplean GLP en su territorio con el 17% y 11% son Europa y Asia, seguidas por Centro y Suramérica con un 6%. Las demás regiones tienen un uso de menos del 4% en GLP como Autogás.

Gráfica 18. Consumo en transporte regional.

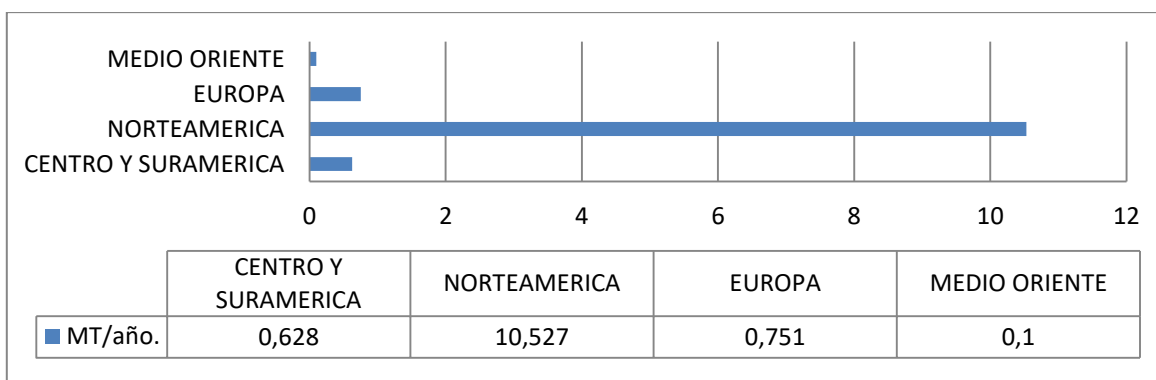


W LPGAS- 2006.

- Refinería.

El sector de la refinería es la división en la que el GLP es menos utilizado en el mundo con un promedio del 5% anual. La zona con mayor consumo en el planeta en esta área es Norteamérica con un consumo del 18% anual, las otras zonas emplean menos del 3% de su consumo total en dicho sector.

Gráfica 19. Consumo regional en refinerías.



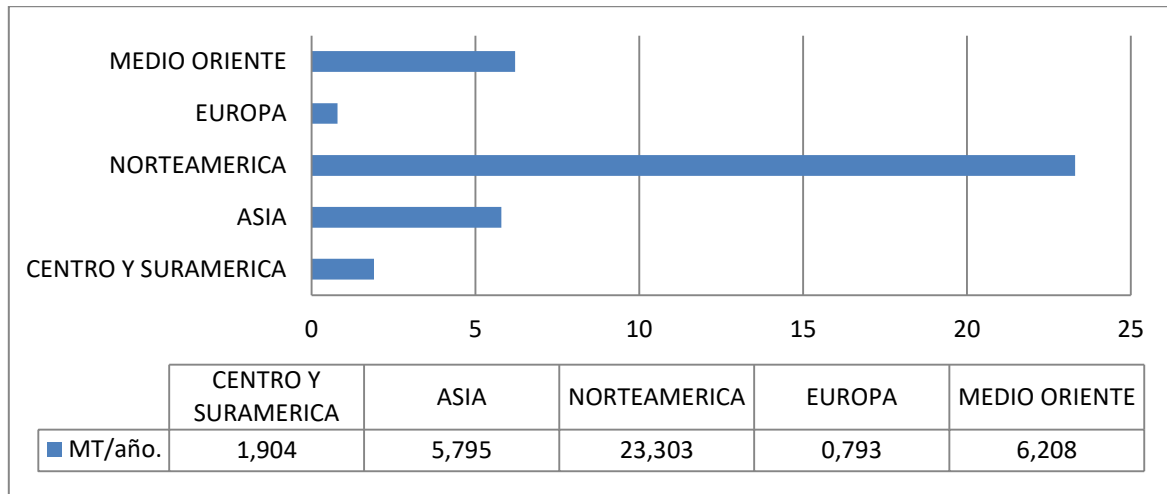
W LPGAS- 2006.

- Química.

La aplicación de GLP anual para el área química y petroquímica es de alrededor del 18%. La región de África no aplica para este tipo de uso, Norteamérica y Medio Oriente lideran la aplicación con un 41% y 44% respectivamente. Asia, Centro y

Suramérica aplican un 8% y 7% a este proceso y Europa es la zona con menor índice anual de aplicación con un 2%.

Gráfica 20. Consumo regional en química.



W LPGAS- 2006.

1.3.2. Panorama Nacional.

1.3.2.1. Producción.

La oferta de GLP en Colombia se ha mantenido estable gracias a la producción propia del país, salvo ocasiones aisladas en las cuales se ha requerido la importación del producto para garantizar el suministro del recurso y no por déficit de producción.

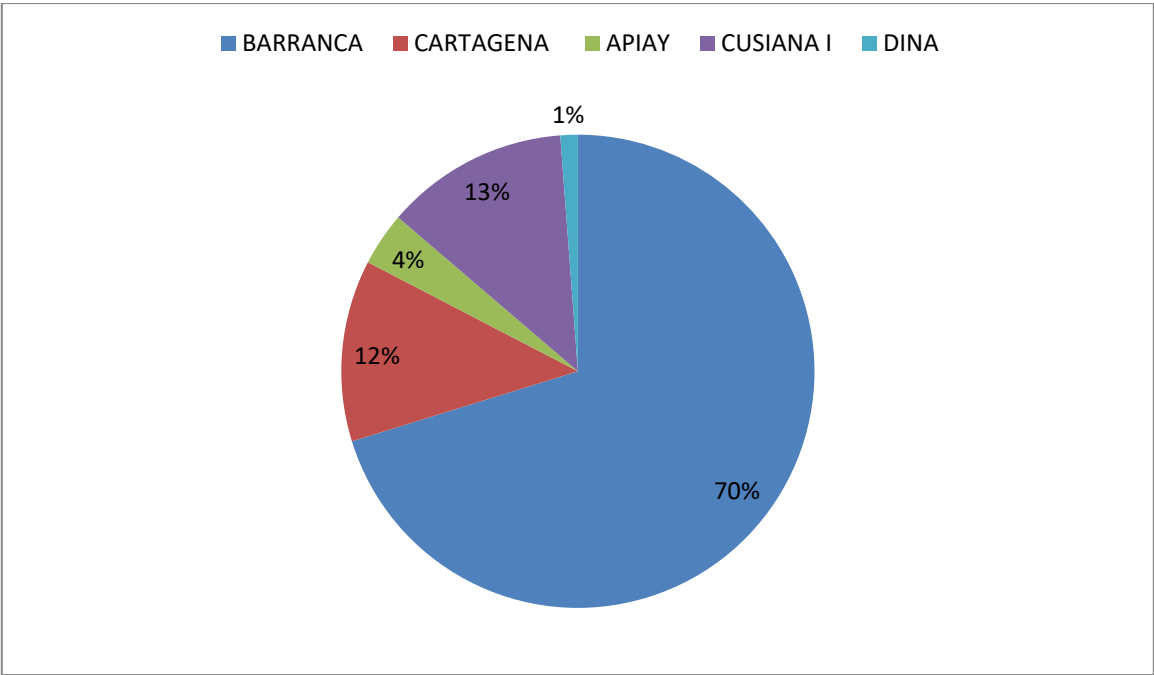
La producción de GLP en el país en sus orígenes estuvo a cargo por Ecopetrol, siendo esta empresa la única con permisos legales para la extracción y refinación del producto, en el año 2005 se comienza la incursión de nueva compañías en el mercado colombiano para la extracción, dentro de este proceso de licitaciones para nuevas empresas productoras de GLP, las más sobresalientes en la actualidad son: Canacol, Interoil, Vetra, Perenco, Petrominerales y Termoyopal. [38]

La producción en el país se ha incrementado gracias a la creación de instituciones que regulan, encausan y apoyan la exploración y producción del GLP. Los mayores cambios positivos con los que ha contado el proceso de evolución de control de combustibles y de la integración de nuevos planes para la explotación

de recursos son: la creación de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en el año 2003, el cambio de regulaciones de importaciones de combustibles y la creación de la comisión de regulación de energía y gas (CREG) en el año 2008.

Los campos que en la actualidad generan la mayor cantidad de GLP en el país por compañía y generación de GLP desde el 2002 hasta el 2013 son los siguientes campos de: Barranca, Cartagena, Apiay, Cusiana I y Dina que producen alrededor de 23.051 BPD y están a cargo de Ecopetrol S.A. para su explotación, administración, planeación y regulación. [39]

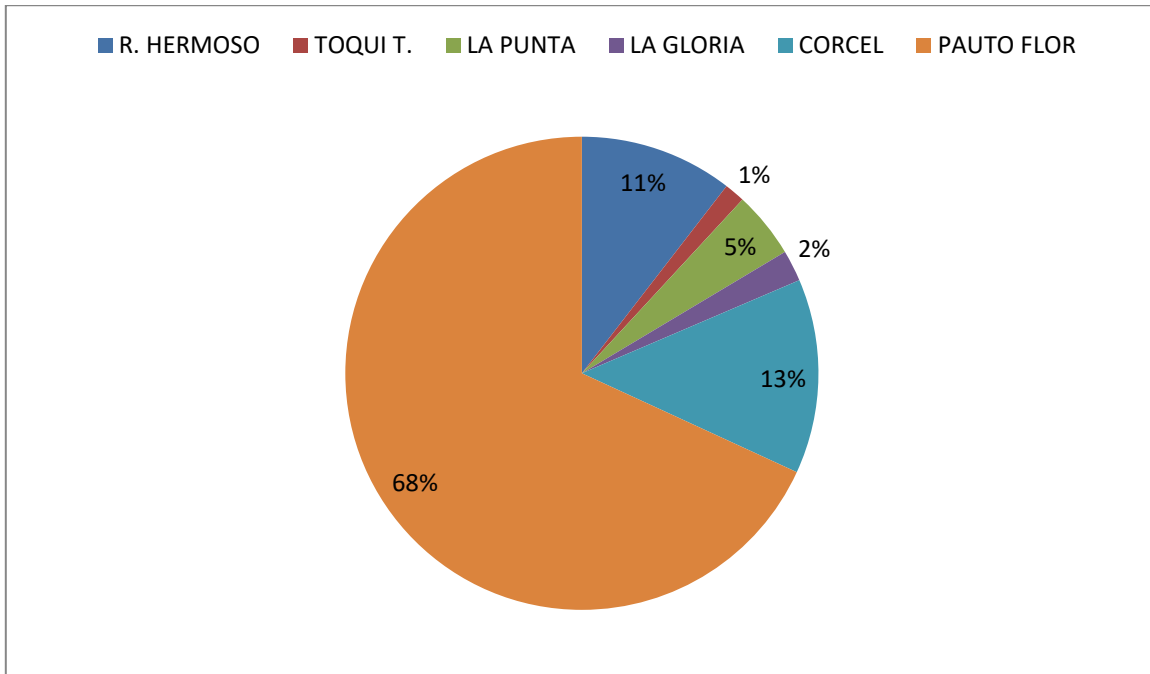
**Grafica 21. Campos productores de GLP explotados por Ecopetrol.
(Porcentaje de producción).**



Cadena del GLP 2013, UPME.

Los campos de Rio hermoso, Toqui T, La Punta, la Gloria, Corcel y Pauto Flor son dirigidos por las compañías: Canacol, Interoil, Vetra, Perenco, Petrominerales y Termoyopal respectivamente, estos pozos brindaron en el periodo del 2005 al 2013 un promedio de 215,5 BPD.

**Grafica 22. Campos productores de GLP no explotados por Ecopetrol.
(Porcentaje de producción).**



Cadena del GLP 2013, UPME.

1.3.2.2. Infraestructura de transporte.

En el país para la acción de transporte de las refinerías a los centros de almacenamiento es efectuado por propanoductos y por poliductos.

Los propanoductos son líneas de tuberías exclusivamente diseñadas y utilizadas para el transporte de GLP, en el territorio nacional se cuenta con un solo propanoducto que comunica la refinería de Barrancabermeja, Puerto Salgar en Magdalena Medio y el terminal de Manzanilla en Facatativá, destinada para la cobertura del centro del país y la zona de Antioquia, está infraestructura de tuberías cuenta con 384.7 kilómetros y con una capacidad para transportar 41,8 miles de barriles por día.

Los poliductos son tuberías fabricadas a base de polietilenos y tienen cumplen la misma función que los propanoductos, con la diferencia de que ya estos en el país no están dedicados exclusivamente al traslado de GLP, sino, del transporte de todos los combustibles líquidos producidos en las refinerías. El territorio nacional cuenta con dos poliductos; el primero es el poliducto de Salgar – Yumbo que traslada GLP a hacia el Viejo Caldas y el occidente del país, el segundo es el poliducto de Galán – Bucaramanga y atiende la demanda del oriente nacional, conjuntamente tiene una longitud de 3306.5 kilómetros. [40]

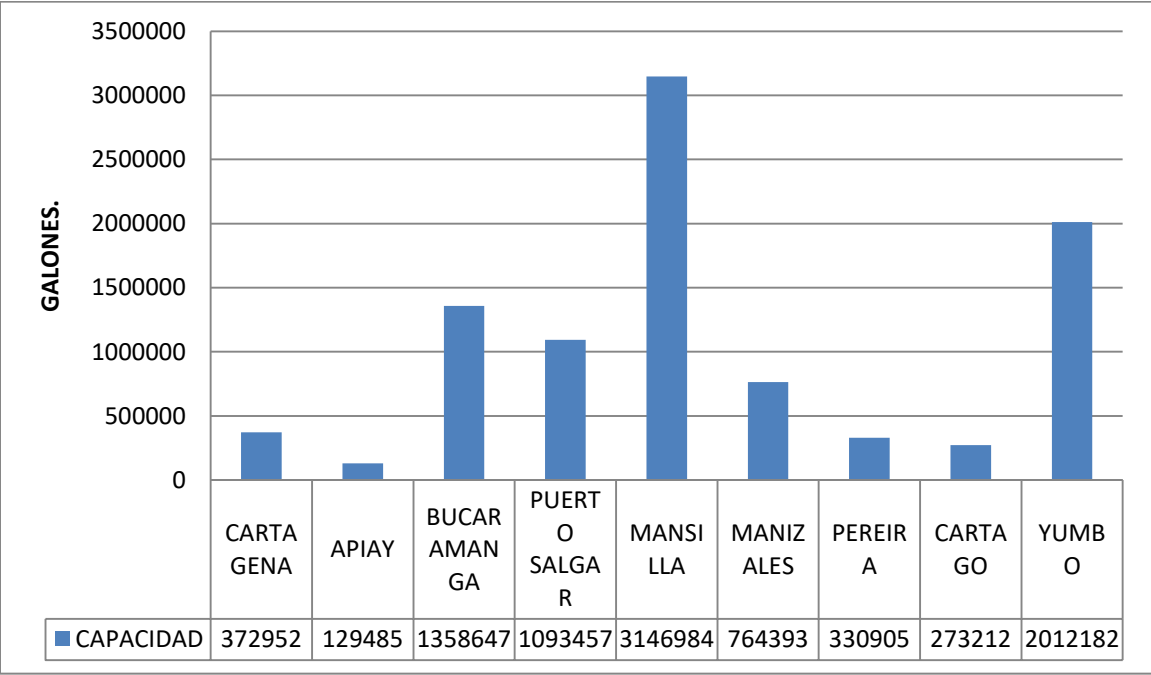
Para los departamentos que no cuentan con poliductos y propano productos el material es transportado por vía terrestre o fluvial, el segundo se utiliza para llevar el recursos hacia el centro del país por el río Magdalena y ese depende del estado del encause y navegabilidad del mismo, el traslado por este medio se estima en 14 mil barriles mensuales. Una de las problemáticas con las que cuenta el transporte terrestre es el bajo nivel de disposición de camiones cisterna especializados en el transporte de GLP y a medida en que avanza la demanda es más evidente la fragilidad de esta actividad.

1.3.2.3. Almacenamiento.

El país cuenta con nueve plantas de almacenamiento en la que se maneja aproximadamente la mitad del capacidad total de GLP que se utiliza al mes, lo que equivale a nueve millones de galones, las zonas que poseen instalaciones y cuentan con mayor capacidad son: Mansilla, Yumbo, Manizales, Bucaramanga y Puerto Salgar.

Las regiones en las cuales la demanda supera la capacidad de almacenamiento son: Yopal, Cartagena, Puerto Salgar y Yumbo. [41]

Gráfica 23. Capacidad de almacenamiento de plantas almacenadoras.



Cadena del GLP 2013, UPME.

Según la norma NTC 3853, las plantas de almacenamiento se clasifican en dos ramas: instalaciones fijas e instalaciones temporales. Las instalaciones fijas son

de carácter estacionario que utilicen contenedores de almacenamiento de 2000 gal (7,6 m³) de capacidad individual deben someterse a la aprobación de la autoridad competente y las instalaciones temporales con las mismas características de almacenamiento con un periodo de vida menores a los seis meses también deben ser sometidas bajo la aprobación competente antes de comenzar su proceso de almacenamiento. [42]

Tabla 2. Contenedores, capacidad y verificación (NTC 3853).

Contenedores utilizados	Capacidad en Galones (m ³) de agua.	La verificación se aplica a:
Cilindros DOT	Hasta 120 (0,454) (1 000 lb, 454 kg)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectores y válvulas de contenedores. 2. Montaje de válvulas múltiples. 3. Reguladores y dispositivos de alivio de presión.
Tanques ASME	Hasta 2 000 (7,6 m ³)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemas de contenedor ^(**) incluyendo el regulador, o 2. Conjunto del contenedor ^(**) y regulador en forma separada.
Tanques ASME	Más de 2 000 (7,6 m ³)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Válvulas del contenedor. 2. Válvulas de exceso de flujo del contenedor, válvulas cheque de contraflujo o algún otro dispositivo que ofrezca esta protección como las válvulas internas de control automático o de control remoto manual. 3. Dispositivos de medición del contenedor. 4. Reguladores y dispositivos de liberación de presión del contenedor.

Norma NTC 3853.

Para el caso de almacenamiento de cilindros para el uso de servicio público domiciliario de GLP. Los cilindros deben contar con las siguientes características básicas para que puedan ser utilizados en el país: [43]

- Presión máxima de servicio: 1.654 kPa (240 psig) +/- 34,47 kPa (5 psig).
- Capacidad de llenado debe ser de acuerdo con la relación de llenado de 42%, como máximo.
- El cilindro debe ser apto para manipulación manual.
- El material de fabricación debe ser resistente a las condiciones ambientales locales.
- Los cilindros metálicos deben contar con protección contra la corrección atmosférica.
- El cilindro debe contar con un mecanismo de conexión de la válvula al cuerpo del cilindro.
- La válvula debe contar con certificado de conformidad.

- Las soldaduras de los cilindros metálicos deben ser realizados por personal calificado según la normativa vigente.
- El cilindro debe contar con la marcación única establecida por el reglamento técnico.
- Los cilindros metálicos deberán cumplir con las especificaciones técnicas de diseño, fabricación y pruebas señaladas en las normas técnicas.
- Los cilindros compuestos deben certificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de cualquiera de las siguientes normas: Norma internacional ISO 11119-3:2003¹⁶ o la Norma Europea EN 12245¹⁷.
- Para cilindros de acero liviano debe certificarse el cumplimiento de las especificaciones técnicas sobre diseño, fabricación y pruebas bajo la Norma Europea EN 14140:2003¹⁸.

1.3.2.4. Usos.

La demanda de GLP en el territorio nacional está concentrado en tres sectores: comercial, domiciliario e industrial desde los años 90's y hasta la actualidad. Impulsada por las políticas energéticas del gobierno nacional el consumo de GLP en el periodo de 1995 al 2001 alcanzó un incremento del 33,77% en el cual se obtuvo un tope de 24.700 barriles por día. En los años consiguientes del 2002 al 2003 el consumo del país se vio disminuido en un 7,56% y 5,6% respectivamente y para cerrar en el 2004 con un balance de utilización similar al periodo de 1995, siendo este el último periodo en el que el GLP alcanzo sus mayores indicadores. De tal forma los años posteriores y hasta la actualidad se ha presentado un descenso promedio del 3% de la demanda nacional, esto ocasionado por la amplia utilización del gas natural y los precios elevados del GLP. [44]

En el sector domiciliario el consumo de GLP está relacionado con la cocción de alimentos y el calentamiento de agua, en cuanto al sector comercial es utilizado para cocción y procesos de transferencia de calor directo, en el caso industrial es implementado en locomoción, producción de vapor y calor directo. Uno de los sectores en el cual el GLP ha logrado una gran acogida a nivel mundial es el sector de transporte y en países Europeos ha logrado un gran impacto y desarrollo gracias a incentivos y planes de fortalecimiento de dicho sector, pero para el caso de Colombia este forma de aplicación no está permitida y la conversión de vehículos al GLP es ilegal, generando esto un severo retraso para

¹⁶ Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods.

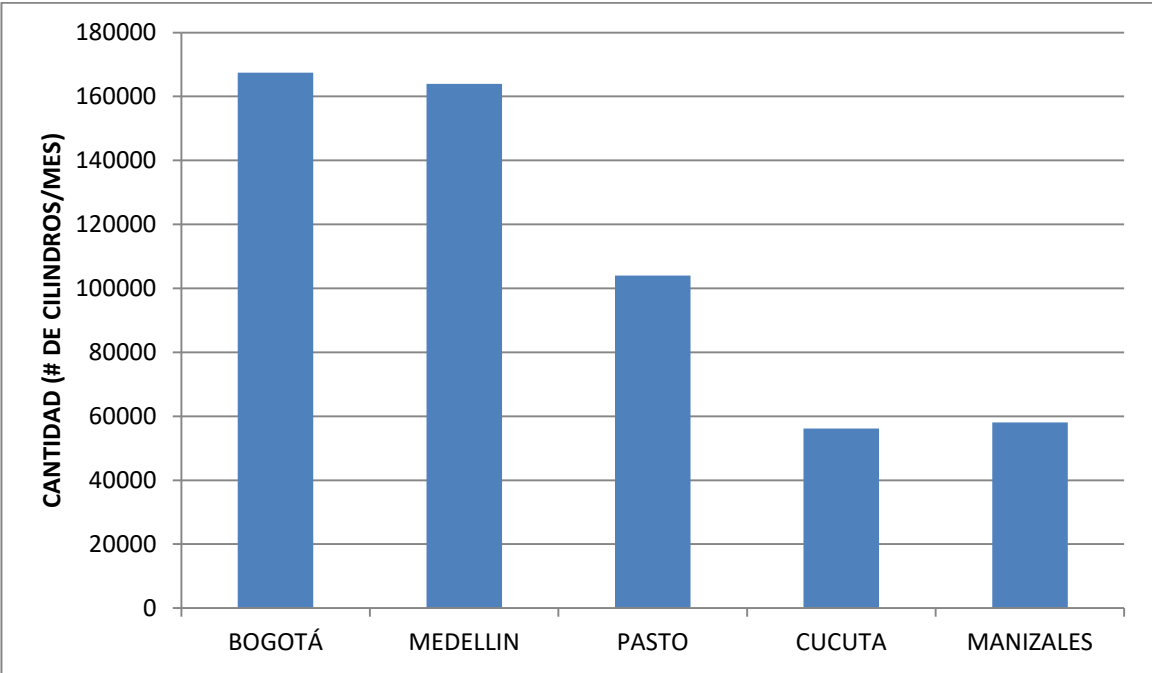
¹⁷ Transportable gas cylinders – Full wrapped compositive cylinders.

¹⁸ Transportable refillable welded Steel cylinders for LPG – Alternative design and construction.

la aplicación sostenible del recurso y para el futuro de las energías alternativas para el parque automotriz.

El consumo de GLP por cilindros en mayor proporción esta congregado en las ciudades de: Bogotá, Medellín, Pasto, Cúcuta y Manizales, estas ciudades presentan el 22% del consumo total del país de cilindros de GLP y en las demás regiones se ha presentado una disminución en la demanda desde el 2012 por el desplazamiento del GLP, por la ampliación de las infraestructuras y centros urbanos de entrega de gas natural. [45]

Grafica 24. Principales consumidores por número de cilindros/mes.



CADENA DEL GLP.

CAPITULO 2.

2. GAS NATURAL Y GLP COMO COMBUSTIBLES PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

En el presente capítulo se da a conocer la implementación del gas natural y el gas licuado del petróleo como fuentes energéticas para motores de combustión interna, en el que se caracterizan: los componentes que conforman el kit de conversión, instrumentación y control de conversiones. Además, se analizará la: composición, consumo y eficiencia del GLP en motores de combustión interna.

2.1. GAS NATURAL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

El gas natural es utilizado en los vehículos de dos formas: realizando una conversión de motores de combustión interna con base en el diseño del mismo y en la fuente química que utilice (gasolina o diésel), o pueden ser de tipo diseño dedicado el cual hace referencia a motores diseñados directamente desde fábrica los cuales funcionan únicamente con dicho combustible. En la actualidad puede encontrarse en el mercado diversos sistemas de gas vehicular para diversos motores de todo tipo y marca, como también, es aplicado para una gran gama de automotores: vehículos ligeros y pesados, motocicletas, autobuses, camiones, camionetas, etc. Los vehículos que en la actualidad operan con gas natural se clasifican de acuerdo a la clase de motor o en la forma en la que el sistema está instalado estos se pueden catalogar como: dedicados, bi-combustibles, sistema dual o dual-fuel, sistema tri-combustible y sistema de inyección directa a alta presión.

En Colombia el gas natural vehicular comenzó a implementarse desde de la década del noventa en algunas regiones del país, básicamente en la región Pacífica. Es afínales de esa época en la cual el gobierno nacional implementa una política de sustitución de combustibles, la cual permite el desarrollo del gas natural como una opción viable y fructífera para el sector automotriz y de transporte. Además, genera la implantación de este recurso en la zona central del país, para lo cual en el año 2000 se crean las primeras infraestructuras de gas natural vehicular (estaciones de servicios) y se alcanza la conversión de 100.000 vehículos. [45]

Con aras de promover el GNV como un sustituto confiable para el parque automotor regional, la nación implementa una serie de normas, resoluciones y reformas tributarias para la masificación del GNV proyectando el impacto a

mediano y largo plazo en el país. De las leyes y reformas las tres más representativas son; la primera es la resolución 80582 de 1996 en la cual se determina las características y condiciones con las que debe contar las estaciones de servicios y los talleres de conversión en cuanto a: diseño, construcción, montaje y mantenimiento, la segunda es la ley 788 de 2002 la cual otorgó la exención del IVA a las partes y equipos de estaciones de servicio de gas natural y para los kits de conversión de vehículos y la tercera es la reforma que se le realizó a la resolución 80582 por medio del decreto 1605 de julio 31 de 2012 la cual otorgó el control y vigilancia del gas natural vehicular a la Superintendencia de Industria y Comercio. Es así como el país logra en los últimos 10 años ubicarse entre los 10 países con más conversiones registradas en el mundo. [46]

2.1.1. Tecnologías para el uso de gas natural en vehículos.

El diseño de los diversos sistemas para conversión a gas natural se basan en las características propias del combustible, las principales características para la delineación, fabricación e instalación en un determinado motor son las siguientes: condiciones del combustible en su estado natural, contenido energético, densidad de vapor, límites de inflamabilidad en el aire, temperatura de encendido, velocidad de llama, relación estequiometría de aire-combustible, clasificación de octanaje, ajuste de encendido, emisiones contaminantes, rendimiento de los motores, arranque en clima frío, peso del combustible, autonomía de manejo, vida del motor, seguridad del combustible, almacenamiento y toxicidad del combustible. La mejor manera para aprovechar el potencial de todas sus características es la utilización de un motor que solo utilice gas natural, pero lamentablemente aunque se cuenta en la actualidad con motores diseñados y fabricados para solo su utilización estos no han alcanzado una gran acogida en el mercado, con lo cual se priorizo el desarrollo de sistemas independientes que puedan ser instalados o adaptados a diversos vehículos y con los cuales poder suministrar el combustible a los motores que originalmente trabajan dedicados a gasolina o diésel. [47]

Aún cuando algunas de sus propiedades como la velocidad de llama, la relación estequiometría¹⁹, las exigencias de encendido y la necesidad de almacenamiento a alta presión impiden el aprovechamiento del potencial total del gas natural se ha difundido por todo el mundo logrando millones de conversiones bien sea por razones económicas o ambientales.

¹⁹ Estequiometría. Cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en el transcurso de una reacción química.

Los sistemas de combustible de GNV constan de los siguientes componentes principales: almacenamiento de gas, regulación de presión de una o varias etapas, una unidad de mezcla aire-gas. El suministro de gas al motor es efectuado de manera mecánica o electrónica, según el sistema de suministro los motores a gas pueden dividirse en cuatro categorías:

- Primera generación: sistema mecánico de suministro sin retroalimentación.
- Segunda generación: sistema mecánico de suministro, control de suministro cerrado, inyección electrónica sin retro alimentación.
- Tercera generación: inyección electrónica, sistema cerrado de retroalimentación.
- Cuarta generación: inyección electrónica con sistema con OBD (diagnostico a bordo).

La forma general en la cual se clasifican los vehículos que funciona con gas natural y que depende de la manera en que el sistema esté instalado al motor son:

- Dedicados o Mono combustibles.

Los vehículos con motores dedicados a gas son los que funcionan únicamente con gas como su fuente primaria de energía, algunos de estos motores cuentan con un pequeño depósito de gasolina para ser utilizado en situaciones de emergencia o agotamiento del depósito principal de gas. Los diseños de los motores de gas no difieren en cuanto dimensiones, peso, construcción y materiales de un motor a gasolina, pero los principales cambios en los que se enfoca el diseño es en potenciar las siguientes características: incrementar la relación de compresión, combustión mezcla pobre, control de inyección de combustible y de la relación aire-combustible, ajustes del tiempo de ignición, control catalítico de emisiones, sensores del contenido de oxígeno en el escape. [48]

- Bi-combustibles.

Estos sistemas son en los cuales los motores pueden operar con dos combustibles alternadamente, sin la condición de interrumpir la marcha del motor, para el caso de los motores a gas esto puede trabajar de gasolina a gas o viceversa sin detener el motor o con algún otro combustible como fuente primara del motor. La mayoría de los vehículos bi-combustibles son motores de gasolina a los cuales se les ha instalado los componentes de adaptación para operación con gas, la mayoría de estos motores funcionan correctamente, pese a la baja relación de compresión del diseño de los motores a gasolina que esta entre 8:1 y 9,5:1 la

cual no permite el trabajo de bajo consumo de gas ya que las relaciones de compresión para el gas debe estar alrededor de 13.5:1. [49]

Los kits²⁰ de conversión para este tipo de motores contienen los siguientes componentes (figura 25):

- Cilindros: para el almacenamiento de gas a alta presión.
- Interruptor de selector de combustible.
- Transductor para el selector de combustible e indicador de combustible.
- Válvula de corte maestro del cilindro.
- Conexión para la recarga del gas.
- Mezclador aire combustible o sistema de inyección de combustible gaseoso.
- Módulo de control de encendido, que adapta la curva de encendido del vehículo a las características del gas natural en el sistema dual gasolina.
- Válvula solenoide para el control de la gasolina.
- Líneas de presión adecuadas.
- Sistema de alivio de presión.

Grafica 25. Esquema kit de GNV.

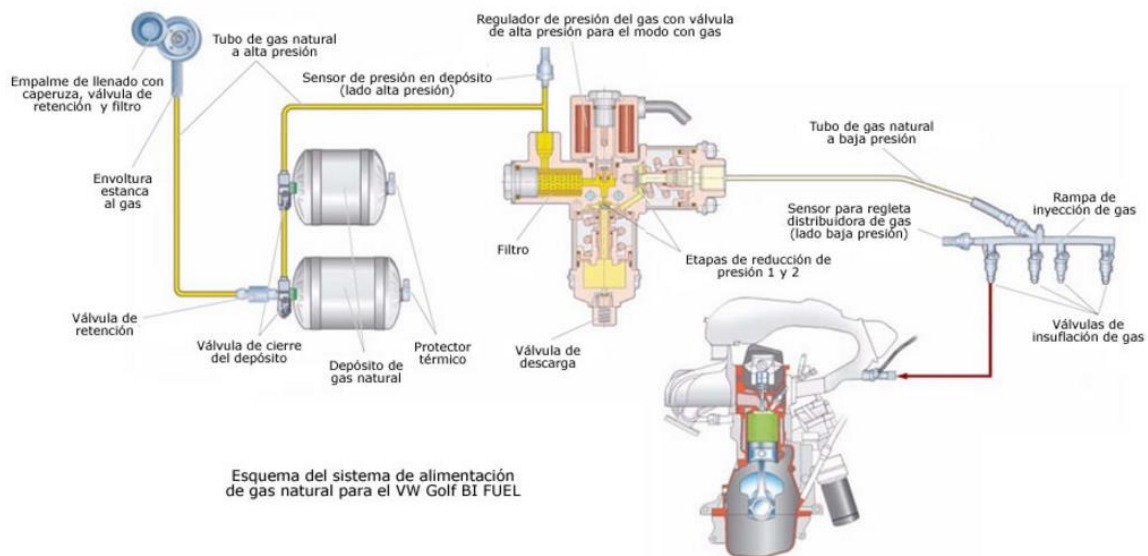


Imagen libre

²⁰ Kit de conversión, es un dispositivo compuesto de una serie de partes y piezas que se adapta al motor del vehículo y que permite operar indistintamente con dos combustibles diferentes,

- Sistema Dual.

Se denomina al conjunto de elementos que constituyen el total del equipo de conversión, el cual hace posible que el motor pueda ser utilizado con diésel y gas a la vez, dicho sistema implementa una mezcla de gas-aire encendida por iniciador (diésel inyectado a la cámara de combustión), mientras el gas natural es suministrado a través de inyectores hacia la toma de aire del motor. Esta mezcla varía según la carga y el ciclo del motor con un rango que ocupa desde el 0% al 80% de gas natural, el porcentaje cambia gracias al control electrónico del sistema en el cual a bajas revoluciones del motor el uso de gas disminuye, predominando en la mezcla el combustible base (diésel), caso contrario para revoluciones altas donde se suministra mayor concentración de gas. El sistema dual presenta una gran ventaja en cuanto autonomía al brindar la opción de consumo de los combustibles de forma independiente y al no contar con gas natural el motor puede suplirse solamente de la reserva de diésel con la que cuenta en el depósito, pero a su vez, esto genera mayores recargos económicos en el monto de mantenimiento y reparación puesto que debe realizarse la tarea necesaria para cada sistema por separado tanto para el sistema dual, como para el sistema original del motor diésel. [50]

2.1.2. Ajustes de motores de combustión interna accionados por GNV.

Todos los motores que han pasado por el proceso de conversión a gas natural vehicular, son sometidos a una serie de pruebas con la finalidad de garantizar la seguridad y eficiencia del sistema instalado, como también el ajuste de caudal de combustible (carburados), avance de encendido y pruebas de estanqueidad. Dichos procesos deben ser realizados por personal capacitado tanto para la instalación como para la verificación del equipo.

2.1.2.1. Control de estanqueidad.

La prueba de estanqueidad comienza con la verificación de los elementos instalados, si las condiciones de instalación cumplen las normas técnicas se procede a cargar gas al cilindro. Después de la carga al sistema se cierra el depósito de almacenamiento de gas y se procede al reajuste de los acoples de la tubería y de más partes que hacen parte del sistema, al terminar el correspondiente ajuste se procede a la prueba de estanqueidad la cual se divide en tres etapas: control baja presión, control alta presión y prueba en carretera.

- Control baja presión.

En esta etapa se realiza con el siguiente procedimiento; primero se carga el depósito con gas, seguido de esto se procede a cerrar la válvula de seguridad del cilindro y se procede a des-gasificar el sistema, luego se debe abrir y cerrar rápidamente la válvula manual de seguridad del cilindro para así lograr una presión parcial en el circuito de gas, posteriormente se procede a la efectuar el control de estanqueidad de los acoples, este proceso puede llevarse a cabo de las siguiente manera: utilizando detectores de fugas homologados o con la aplicación de agua jabonosa. Esto debe realizarse durante tres minutos.

Si se evidencian fugas de gas por los acoples, se deberá; vaciar el circuito, cambiar el acople y efectuar la puesta a presión nuevamente.

- Control alta presión.

La prueba de alta presión busca detectar fugas en la válvula de carga, manómetro, reductor de presión y conexiones de la válvula del cilindro. Para esta prueba se debe contar con un cilindro de pruebas el cual debe contar con 200 bares de gas inerte, el cual se conecta a la válvula de carga para presurizar el sistema. [51]

Los pasos para realizar la prueba son los siguientes; primero se conecta el cilindro de pruebas a la válvula de carga del sistema, se abre dicha válvula y se cierran la válvula manual del cilindro, cuando se haya realizado este proceso se verifica fugas en los componentes del sistema durante un lapso de tres minutos.

- Prueba en carretera.

Para prevenir fugas no detectadas en la dos etapas previas, se procede a la prueba de carretera en la cual, se trata de detectar olor a gas mientras el vehículo es conducido por una ruta segura y a aire libre. Si se llegase a detectar olores del gas se debe proseguir de la siguiente manera: se regresa el automóvil al taller, se apaga el motor, se cierra la válvula del cilindro, después se debe desconectar la batería y abrir la válvula del cilindro. Para finalizar se busca la fuga en todos los componentes del sistema y se procede a reajustar el sistema. [52]

2.1.2.2. Ajuste de los elementos eléctricos de gas natural.

Es primordial revisar el ajuste de los componentes eléctricos del sistema de gas primordialmente la electro válvula de gas y de nafta, este proceso se realiza con la llave conmutadora en una u otra posición.

Para los vehículos con inyección electrónica se enciende el motor antes de ser cargado con gas o con la válvula manual del cilindro cerrada (des-gasificar el sistema, antes de realizar la prueba) y al colocar la llave conmutadora en posición de GNV debe detenerse el motor en forma inmediata. Si esto no ocurre debe realizarse la revisión de las conexiones realizadas.

Para el caso de los vehículos con inyección por medio de carburador, se debe posicionar la llave conmutadora en posición de GNV y se verifica que la electro válvula de gas se ha activado y luego de un corto lapso de tiempo (segundos) se desactiva. [53]

2.1.2.3. Puesta a punto del encendido.

En los vehículos con inyección carburada, poseen correctores electrónicos de avance, pero generalmente se efectúa la calibración de forma manual, cada vehículo cuenta con un determinado grado de avance para el avance de encendido, el cual también depende de la latitud a la que se opera el vehículo, pero por lo general el avance de encendido se realiza entre 8 a 10 grados sobre el avance con funcionamiento a gasolina. [54]

En el caso de los vehículos con inyección electrónica no es necesario efectuar ninguna modificación al sistema de manera manual, puesto que el corrector de avance electrónico del sistema es el encargado de modificar el ángulo y puesta a punto.

2.1.2.4. Regulación de caudales.

La regulación de caudal se efectúa en los motores que poseen carburador, para los motores con inyección electrónica la configuración viene predeterminada por el fabricante del kit de conversión y solo se debe cargar el diseño predeterminado a la unidad de control de gas.

La calibración de caudales se realiza en dos etapas:

- Regulación de caudal máximo.

Para una buena regulación del sistema de gas se debe efectuar primero la regulación máxima, para la realización de la calibración el motor debe encontrarse a la temperatura normal de funcionamiento, luego de alcanzar la temperatura normal, se procede hacer el cambio de combustible de gasolina a gas mediante la llave conmutadora, posteriormente se acelera el motor entre 2500 y 3000 RPM, y

se debe mantener fija la mariposa del carburador durante toda la calibración; se debe girar el tornillo de regulación de la válvula de máxima para lograr la aceleración del motor, se sigue girando mientras las revoluciones siguen aumentando hasta que las revoluciones comiencen a descender, es en ese momento en donde se ha efectuado la regulación máxima de es allí donde se debe fijar la graduación del tornillo con la contratuerca que posee. [55]

- Regulación de caudal mínimo.

Este proceso se realiza después de terminada la regulación máxima, para lograr esta calibración el motor debe estar a temperatura normal de funcionamiento, seguidamente se deja la mariposa de aceleración del carburador en reposo y se debe mantener en esa posición durante la regulación, para la calibración se debe girar el tornillo de regulación mínima que se encuentra en el regulador hasta que se logre el régimen deseado. [56]

2.2. EL GLP Y SU USO COMO COMBUSTIBLE AUTOMOTOR.

Para evaluar y analizar los beneficios y consecuencias del gas licuado del petróleo en el desempeño de los motores de combustión interna, antes de realizar ensayos experimentales, es necesario comprender la influencia de las características físico-químicas del gas licuado de petróleo sobre los procesos de combustión que se producen en el interior de los motores de combustión interna.

A continuación se explicaran las características principales del GLP y se hace un paralelo con otros combustibles de aplicación en los motores, con el fin de establecer: la diferencia, ventajas y desventajas que implica la implementación de GLP con respecto a los demás combustibles.

2.2.1. Propiedades del GLP.

El gas licuado de petróleo es un hidrocarburo derivado del petróleo por proceso de refinación y del gas natural por proceso licuefacción del mismo, generalmente el butano y el isobutano se mezclan con propano en varias proporciones, dependiendo del uso que se le quiera dar al combustible. Esta mezcla de hidrocarburos en proporciones variables a condiciones normales es gaseosa, pero al comprimirla pasa a estado líquido, el GLP se licua para su almacenamiento y transporte, pero su utilización es en estado de vapor.

- Propano.

EL propano (figura 26) químicamente es un compuesto orgánico, cuya molécula saturada, está compuesta por tres átomos de carbono y ocho de hidrógeno (formula C₃H₈) y cuenta con un poder calorífico aproximado de 28300 Kcal/m³. Es además, un gas incoloro e inodoro y es particularmente utilizado como combustible portable dado que su punto de ebullición es de -42 °C. Por lo cual es un combustible de quemado limpio, de fácil vaporización y mezclado con el aire. [57]

Figura 26. Propano.

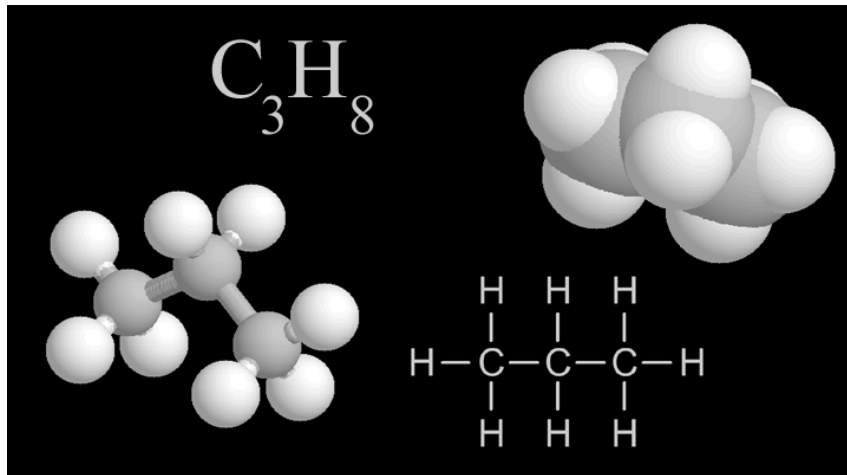


Imagen libre.

- Butano.

El butano es hidrocarburo parecido al propano figura 27, salvo que su molécula, también saturada, está compuesta por cuatro átomos de carbono y diez de hidrogeno (formula C₄H₁₀), cuenta con un poder calorífico aproximado de 22000 Kcal/m³. Su punto de ebullición es aproximadamente de -0.6 °C, por lo cual su proceso de vaporización es menos efectivo que el propano, por tal razón se mezcla con el propano en lugar de usarse por sí mismo. [58]

Figura 27. Butano.

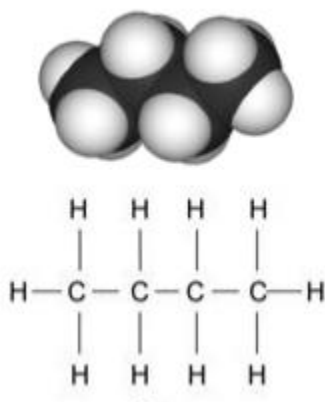


Imagen libre.

- Diferencias entre el butano y el propano.

La principal diferencia entre ambos hidrocarburos es la temperatura de licuado (cambio de estado gaseoso a líquido), para el caso el propano es licuado a 42,1 °C y el butano a 0,5 °C, por lo tanto las condiciones ambientales influyen en el almacenamiento de cada producto. Algunas de las propiedades físico-químicas para ambos gases son las siguientes tabla 3. [59]

Tabla 3. Diferencias entre butano y propano.

PROPIEDAD	PROPANO	BUTANO
Formula general.	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Masa molecular (g/mol).	44	58
Aspecto físico.	Gas, inodoro, insípido.	Gas, inodoro, insípido.
Punto de ebullición.	-42,1	-0,5
Calor latente de vaporización (KJ/kg).	425,51	385,76
Densidad a 20 °C (kg/L).	0,505	0,580
Tensión de vapor a 20 °C (Psi).	156,5	31,1
Temperatura crítica (°C).	96,8	152
Presión crítica (Psi).	597,57	533,54
Punto de inflamación (°C).	-104	-60
Temperatura de auto ignición (°C).	540	405

The linde group, Ficha de datos de seguridad.

2.2.1.1. Contenido energético.

Se expresara el contenido energético del GLP, gas natural, gasolina y diésel en la unidad térmica británica (BTU) que representa la cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit.

El contenido de energía de un combustible que es medido en BTU no expresa la cantidad de energía que debe usarse para vaporizar el agua que se produce por la combustión. La cantidad de agua producida cambiara según la fuente energética y de la misma forma variara la cantidad de energía que debe ser suministrada para ser vaporizada. Dicha energía se pierde y no puede ser utilizada por el motor de combustión interna. Características energéticas de los tres combustibles:

- Gas natural.

La capacidad de energética del gas natural vehicular está directamente relacionada a la fuente de gas utilizada y dependerá del contenido de metano y gas natural. En rangos típicos el GNV en condiciones de 2.400 Psi y 70 °F (21.1 °C) se encuentre alrededor de 19.760 BTU/m³. [60]

- Gasolina.

La capacidad energética de la gasolina es la más elevada en contenido de energía por unidad de volumen. Lo cual es ocasionada por la mezcla compleja de productos derivados del petróleo y aditivos que generan un alto contenido de energía, sin embargo esta misma composición química tan rica en términos energéticos, ocasiona que se genere una mayor probabilidad de combustión incompleta al ser implementado en los motores. El contenido de BTU también está asociado a la calidad del combustible y se estima que cuenta con 115.000 BTU/galón. [61]

- GLP.

El contenido de energía del GLP está cercano a los 83.000 BTU por galón líquido. Debido a que el GLP no es propano puro, el contenido de energía cambiara mínimamente según el porcentaje de butano y demás gases que se encuentren presentes en cantidad neta del combustible utilizado. [62]

2.2.1.2. Densidad de vapor.

La densidad de vapor es una clase de medida del peso específico en que un volumen de gas es comparado con una cantidad igual de aire. La densidad de vapor de aire es de 1.0, en donde cualquier combustible que su densidad sea menos a uno (1) será más liviano que el aire y todo número mayor que 1 será entonces más pesado que el aire.

El gas natural posee una densidad de vapor de 0.68, por lo cual este hidrocarburo es más liviano que el aire y este subirá si es descargado en la atmósfera, lo cual lo hace un combustible seguro para la implementación en los motores. Dado que, al generarse: alguna fuga, daño del sistema, accidentes y ruptura de componentes del sistema el gas subirá rápidamente y se dispersará, con lo cual se reduce el peligro de incendio. [63]

En el caso del propano y el butano, estos dos gases son más pesados que el aire; dado que sus densidades relativas de vapor se encuentran en 1.57 y 2.1 respectivamente. Su comportamiento al igual que los combustibles líquidos como la gasolina y el diésel se acumularán a nivel del suelo al momento de ser liberados a la atmósfera, representando un peligro mucho mayor de incendio. [64]

2.2.1.3. Límites de inflamabilidad.

El límite de inflamabilidad en el aire de los combustibles hace referencia a la relación de oxígeno que debe haber para que el hidrocarburo sea quemado, de tal manera una mezcla en donde se contenga demasiado combustible y muy poco oxígeno no quemará; del mismo modo, ocurrirá en el caso contrario en donde demasiado oxígeno y muy poco combustible no generará calcinación. En la tabla 4 se mostrara los límites de inflamabilidad de los combustibles gaseosos como un porcentaje de combustible que debe estar presente en un volumen de aire para que la combustión se genere. Si el porcentaje de gas es menor al límite inferior no se producirá combustión; así mismo, si el porcentaje supera al límite mayor tampoco lo harán.

Tabla 4. Límite de inflamabilidad (porcentaje gas-aire).

LIMITE DE INFLAMAVILIAD	GAS NATURAL	GASOLINA	PROPANO	BUTANO
% de gas en mezcla (gas-aire), límite inferior.	5.3	1.4	2.0 a 2.4	1.5 a 1.9
% de gas en mezcla (gas-aire), límite mayor.	15	7.6	7.0 a 9.5	5.7 a 8.5

INDURA. Hoja de fatos de seguridad de materiales (GLP). NCh 2245 Of. 03.

2.2.1.4. Temperatura de encendido.

Se cataloga temperatura de encendido a la condición física (temperatura) necesaria para que la materia combustible comience a quemar y se mantenga sin necesidad de añadir calor exterior; cuando la sustancia, en contacto con el aire se oxida espontáneamente, aumenta su temperatura dado que la reacción de oxidación es exotérmica. Si la disipación de calor es difícil, conforme aumente la temperatura se oxidara más rápidamente y desprenderá calor más rápido, hasta que en cierto punto dicho calor hará que la temperatura llegue a el punto en el que se produce la ignición del combustible y desde ese momento la combustión se mantendrá por si sola. En la tabla 5 se muestra la cantidad de temperatura mínima necesaria para el encendido de los combustibles.

Tabla 5. Temperatura de encendido.

TEMPERATURA	GAS NATURAL	GASOLINA	PROPANO	BUTANO
Grados Celsius (°C).	649	315	521	510
Grados Fahrenheit (°F),	1200	600	969,8	950

INDURA. Hoja de fatos de seguridad de materiales (GLP). NCh 2245 Of. 03.

2.2.1.5. Velocidad de llama.

El termino llama hace referencia al producto visible, en forma de radiación electromagnética, emitida por los gases calientes de la reacción química exotérmica entre un combustible y el oxígeno del aire. La velocidad de la llama es una medida de cuán rápido se quemara el combustible, generalmente se miden en pies por segundo (ft/s) o en metros por segundo (m/s). En la tabla 6 se muestra

la velocidad de llama de algunos de los combustibles principales en los motores de combustión interna.

Tabla 6. Velocidad de propagación de llama.

UNIDADES	GNV	GLP C3	GASOLINA
Ft/s	1,48	1,48	1,12
m/s	0,451104	0,451104	0,341376

INDURA. Hoja de datos de seguridad de materiales (GLP). NCh 2245 Of. 03.

2.2.1.6. Relación estequiométrica.

La relación estequiométrica es la relación ideal de la mezcla de aire-combustible para la cual todo el combustible y el oxígeno son implementados en el proceso de combustión.

La cantidad de aire que ingresa al cilindro de un motor es fundamental para quemar el volumen de combustible para la operación del motor, entre más aire se requiera para quemar un combustible menor será la cantidad de combustible posible para introducir en el cilindro. En la tabla 7, se muestra la relación estequiométrica de tres hidrocarburos, de la cual, el carburante que menor cantidad de aire necesita para quemar 1 lb combustible es la gasolina, seguido del GLP.

Tabla 7. Relación estequiométrica.

COMBUSTIBLE	RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA
Gasolina.	14.7:1
GLP.	15.6:1
GNV.	16.4:1

F. Payri, J. M. (2011). "Motores de combustión interna alternativos". Editorial Reverté.

2.2.1.7. Calificación de octanaje.

El octanaje, que también se conoce con el nombre de número de octano, hace referencia a la cantidad de octanos presentes en un combustible. Un octano es una clase de hidrocarburo que dispone de 8 átomos de carbono y el octanaje es la escala que permite clasificar el poder antidetonante de los combustibles, en el proceso de compresión en el cilindro que hace parte de un motor. [65]

La cantidad de octanos es importante para los motores, porque cuando se logra emplear un índice más elevado de compresión sin que el combustible detona²¹ se genere entonces un incremento en la eficiencia, en definitiva el octanaje refleja la calidad del combustible. Si el combustible posee alto octanaje se evitan las detonaciones prematuras y se incrementara la liberación de energía útil. Además, permite un mayor avance del encendido sin detonación o cascabeleo²², lo que permite una mejor combustión del motor sin riesgo de daño. En la tabla 8 se indica el índice de octano de algunos combustibles.

Tabla 8. Octanaje.

COMBUSTIBLE	INDICE DE OCTANO
Gasolina sin plomo.	87-97
GLP (HD-5)	107
Gas natural.	115-130

F. Payri, J. M. (2011). "Motores de combustión interna alternativos". Editorial Reverté.

2.2.1.8. Arranque en clima frío.

El GLP y el gas natural poseen mejores características de arranque en frío debido a que poseen un punto de ebullición más bajo y permanecerán como vapor aún a temperaturas bajas. Además, por su cualidad de formarse en mezcla homogénea con el aire entra en los cilindros, con la cual es una ventaja notoria en el encendido en frío, puesto que si el motor es dedicado a gas natural o a GLP no se requerirá de ningún enriquecimiento previo para el arranque como es necesario para los motores dedicados a gasolina, en estos es indispensable enriquecer la mezcla en una relación de 5 a 10 veces para asegurar el inicio de trabajo del motor. [66]

²¹ Detonación, es una combustión rápida y violenta de la mezcla aire/combustible en la cámara de combustión del motor, después del encendido por chispa o arco eléctrico de la bujía. Durante la detonación, se tiene dos o más frentes de llama que chocan entre si originado una fuerte onda expansiva, que golpea los pistones con gran fuerza.

²² Cascabeleo también llamado "pistoneo", es la percepción de golpeteo en el motor y es debido a la existencia de detonación en el interior del motor. Debido a que la presión de los gases al interior de la cama de combustión sube excesivamente, resultando en grandes fuerzas que actúan sobre los pistones o émbolos del motor, acto que puede llegar a romperlos.

2.2.1.9. Seguridad del combustible.

Cada uno de los combustibles destinados a la operación de motores de combustión interna presentan riesgos y estos están asociados con la forma en de almacenamiento, la inflamabilidad, la toxicidad del combustible y la posibilidad de derrames y salpicaduras.

El almacenamiento de GLP se realiza en cilindros y estos poseen características físicas más resistentes a la ruptura y perforación con relación a un tanque de gasolina o diésel. Para el caso de una colisión en un vehículo que opere dedicado o dualmente con GLP el deposito que lo contiene será menos probable que deje escapar combustible, sin embargo en un suceso extremo donde se ve afectado la integridad y ruptura del cilindro o de una tubería de alta presión, el GLP fugaría hacia el suelo por ser de una densidad relativa mayor que la del aire (2.01; aire=1), podría generar peligro de combustión al presenciarse alguna chispa en el entorno.

Cuando el gas licuado se fuga a la atmosfera este se vaporiza de inmediato, mezclándose con el aire (ambiente), y se forman súbitamente nubes inflamables y explosivas, las cuales al ser expuestas a fuentes de ignición (chispas, flama y calor) producen un incendio o explosión. En el caso de un vehículo y/o motor de combustión interna el múltiple de escape que puede alcanzar temperaturas de 435°C y una nube de vapores de GLP generaran una explosión. Otras fuentes, de ignición en vehículos son las conexiones eléctricas de vehículo que pueden estar averiadas y provocaran la ignición de los vapores de GLP. [67]

En el ámbito toxicológico, el gas licuado de petróleo no es toxico; es un asfixiante simple que posee propiedades anestésicas y que en altas concentraciones puede generar mareos. Hasta la fecha no se evidencia información veraz sobre características carcinogénicas, mutagénicas, órganos que afecte en particular o que desarrolle algún efecto toxico a la población humana.

2.2.2. **Ventajas y desventajas del uso de GLP.**

De las características descritas anteriormente se pueden analizar las siguientes ventajas y desventajas del GLP.

2.2.2.1. Ventajas.

Como ventajas del GLP como carburante se pueden enumerar las siguientes cualidades:

- ✓ Alto poder calorífico.
- ✓ Facilidad de uso y transportación.

- ✓ Alta eficiencia de combustión.
- ✓ Combustible limpio, sin residuos significativos de azufre o metales contaminantes.
- ✓ No tóxico.
- ✓ No corrosivo.
- ✓ Puede almacenar gran cantidad de energía en un espacio reducido.

2.2.2.2. Desventajas.

La principal desventaja asociada con el uso de GLP tiene que ver con el almacenamiento y la seguridad. Debido a su facilidad de cambio de fase (gas-liquido), el almacenamiento en tanque es del 80% de la capacidad real del contenedor puesto que debe ser dejado un margen para la presión. Además, como el gas es más pesado que el aire, tiende a sentarse en lugares bajos mientras se está disipando, lo que lo hace vulnerable a ignición por agentes externos.

2.2.3. Tecnologías para el uso de GLP en vehículos.

La conversión y construcción de motores de combustión interna operados con GLP han alcanzado una buena demanda en varios países, su uso y mejoramiento de tecnología ha venido en aumento, en la actualidad se encuentran motores que operan con GLP: dedicados, bi-combustibles y duales, los cuales en aplicación vehicular posee ventajas respecto a otros combustibles (gasolina y diésel), como bajas emisiones de NOx²³ y de PM. “Análisis de pozo a las ruedas demuestran que un vehículo movido por GLP genera un 14% y un 10% menos de emisiones de CO₂²⁴ en comparación a sus equivalentes de gasolina y diésel respectivamente, adicionalmente, 20 vehículos a GLP emiten la misma cantidad de NOx que uno potenciado a diésel” informe final- tomo I UPME (2014), por lo cual su uso en el sector automotriz en motores diésel se ha visto en incremento en países de las regiones de: Norteamérica, Europa y Asia. [68]

El uso del GLP en el sector automotriz se ha focalizado en motores pequeños con cilindrajes que oscilan entre los 1000 cc y los 2500 cc, a los cuales se diseñan y se adaptan kits de conversiones, sin embargo, la fabricación de motores dedicados a GLP aumento en los últimos años en donde empresas productoras de vehículos como: Ford, Toyota, Nissan, Kia, Mitsubishi, volvo, Mercedes Benz entre

²³ Óxidos de nitrógeno (NOx), es un término genérico que hace referencia a un grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂)

²⁴ Dióxido de carbono (CO₂), es un gas incoloro, denso y poco reactivo, que forma parte de la capa de la atmosfera más cercana a la tierra. Tiene un gran impacto en el llamada efecto invernadero y su concentración ha aumentado en las últimas.

otros, han introducido al mercado vehículos con sistemas de GLP directamente de fábrica.

Debido a los inconvenientes que posee el GLP para ser adaptado a los vehículos los cuales principalmente son: seguridad en el manejo del combustible en el vehículo, suministro y carga del sistema con GLP, baja cobertura de infraestructuras (estaciones de servicio) para el repostaje de combustible GLP, autonomía del combustible y el incremento de peso al automotor debido a los cilindros de almacenamiento. Por estos motivos el diseño, seguridad, disposición y fabricación de los kits ha cambiado y evoluciona a través del tiempo conforme a las exigencias del mercado vehicular, por ende las tecnologías en kits de conversión se clasifican por el sistema de inyección que posee el motor al cual será adaptado y estas son las siguientes: sistema catalizado, sistema carburador, sistemas inyección, sistema secuencial. Los cuales poseen elementos básicos como los cilindros de almacenamiento y la tubería de suministro, en la tabla 9 se especifican los elementos que componen a cada uno de las anteriores tecnologías de kits de conversión de GLP. [68]

Tabla 9. Sistemas de conversión de GLP según el sistema de inyección del vehículo.

Elementos.	SISTEMAS			
	Catalizado	Carburador	Inyección	Secuencial
Reductor de presión	X	X	X	X
Indicador de nivel		X	X	
Manómetro	X	X	X	X
Tubería	X	X	X	X
Válvula de carga	X	X	X	X
Electroválvula gasolina		X		
Kit de venteo	X	X	X	X
Unidad de control electrónica	X		X	X
Mezclador	X	X	X	
Electroválvula GLP	X	X	X	X
Sensor sonda lambda	X			X
Registro manual		X		
Multiválvula	X	X	X	X
Emulador OBD	X			

Emulador de la combustión			X	
Registro manual			X	
Relés			X	

Universidad nacional de Colombia. Grupo de investigación en combustibles alternativos.

2.2.4. Elementos del equipo de conversión.

El sistema de conversión que se instala en los vehículos son sistemas sencillos y fáciles de instalar, con lo cual se busca la menor cantidad de modificaciones del motor y del vehículo con la finalidad de que si es necesario desmontar el equipo de GLP del automotor el vehículo quede en las mismas condiciones en las que se encontraba antes de la instalación del sistema. Los equipos pueden ser instalados en un lapso de 8 a 12 horas sin importar las características de inyección del vehículo, tanto si es carburado o de inyección (monopunto, multipunto) y suelen ser instalados con garantías de un año o hasta los 30.000 a 40.000 km dependiendo el fabricante.

El sistema consta de los siguientes componentes:

2.2.4.1. Depósito de almacenamiento.

Estos depósitos o también llamado cilindros de almacenamiento pueden ser cilíndricos o toroidales²⁵, estos deben contar con los certificados de calidad de acuerdo a la Norma ASME Se. VIII, Div. 1. [69]

En el mercado, los depósitos se pueden encontrar de diferentes capacidades tabla 10, en los cuales se almacena el GLP a presiones de 10 Bar o 150 libra fuerza por pulgada cuadrada.

Tabla 10. Características de los cilindros de acero para almacenamiento de GLP.

TIPO DE CILINDRO				
Capacidad bruta (litros).	Capacidad neta (litros).	Diámetro (mm).	Longitud (mm).	Peso (Kg).
33,12	26,50	244	750	15,50
42,58	34,06	244	950	20,00
52,04	41,63	300	800	20,05
66,24	53,00	300	990	25,00

²⁵ Toroidales, depósitos de combustible de geometría toroide. Es la superficie de revolución generada por una curva plana cerrada simple que gira alrededor de una recta exterior coplanar con la que no se interseca. Su forma se corresponde con la superficie de los objetos que, en el habla cotidiana, se denomina: argolla, anillo, aro, rosca, donas o donuts.

80,43	64,34	360	850	26,50
94,63	75,70	360	1000	31,00

Universidad nacional de ingeniería, lima Perú.

2.2.4.2. Multiválvulas.

Las multiválvulas o válvulas independientes para el depósito de almacenamiento de GLP es uno de los componentes más complejos del kit de conversión y es la encargada de numeras funciones dentro del sistema para garantizar su buen funcionamiento y seguridad. Las funciones primordiales de toda Multiválvula son las siguientes: [70]

- Retirar el GLP en fase líquida del cilindro a través de un tubo de escape.
- Determinar el nivel de carga del cilindro, mostrando en un medidor situado en la misma multiválvula en el conmutador.
- Bloquear el flujo de GLP de la boca de repostaje o al motor utilizando válvulas manuales para aislar, si es necesario.
- Válvula de limitante de llenado del depósito al 80%, accionado por un flotador, permite bloquear el suministro de carga cuando el nivel de combustible líquido llega al 80% de la capacidad máxima, con la finalidad de evitar sobrepresiones en el interior del cilindro por efecto de altas temperaturas.
- Válvula de escape por sobrepresión, calibrada para abrir a 27 ± 1 bar para descargar la sobrepresión que se crea en el interior del cilindro para evitar la explosión del depósito.
- Válvula termofusible, consta de una aleación eutéctica²⁶ que funde a $120 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ para liberar la sobrepresión que se crea al interior del cilindro debido a una alta temperatura evitando la explosión del mismo.
- Válvula de exceso de flujo, que interrumpe el flujo de GLP en la salida del depósito cuando la velocidad del flujo se hace excesiva.

²⁶ Eutéctica, es una mezcla de dos componentes con punto de fusión (solidificación) o punto de valorización (licuefacción) mínimo, inferior al correspondiente a cada uno de los compuestos en estado puro. Esto ocurre en mezclas que poseen alta estabilidad en estado líquido, cuyos componentes son insolubles en estado sólido.

Figura 28. Multiválvula de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.3. Válvula de llenado externo.

Este elemento es por el cual se realiza el llenado de GLP al depósito, es una válvula de retención que durante el llenado permite por diferencia de presión la introducción del gas a los cilindros de almacenamiento y durante la operación normal del vehículo evita que el gas fluya hacia la atmosfera. Dicha válvula se puede colocar en distintos lugares del vehículo, según las necesidades del usuario, pero generalmente se ubica lo más cerca del depósito.

Figura 29. Válvula de llenado de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.4. Vaporizador.

Este elemento es el encargado de transformar al GLP de fase líquida a gaseosa y regula la alimentación de GLP al motor (grafica 30), hasta él llega el GLP en estado líquido por tuberías de alta presión (2,5 a 30 bar) y sale en estado gaseoso por tuberías de baja presión (1 bar). El cambio de fase del GLP es efectuado por el regulador de dos maneras; la primera por transferencia de calor, el cual es extraído del circuito de refrigeración del motor (regasificación del GLP), de lo cual se beneficia el motor gracias al retorno de refrigerante más frío, la segunda es por cambio de presión en el circuito del sistema de GLP. Además, dispone de una válvula de seguridad que evita que la presión de baja aumente por encima de 2,25 veces la presión máxima de funcionamiento. [71]

En el regulador se pueden realizar tres ajustes diferentes para la puesta a punto del motor con respecto al sistema GLP, estas son:

- Ajuste del regulador con respecto al tamaño del motor.
- Ajuste de alimentación de GLP en frío o ralentí.
- Ajuste de alimentación de GLP en altas revoluciones o crucero.

Para los anteriores ajuste el regulador trabaja en un rango de temperaturas que comprende desde los -20 °C hasta los +120 °C.

Figura 30. vaporizador de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.5. Tubería.

La tubería de conexión entre elementos del sistema de conversión a GLP es una tubería hecha de cobre reforzado con protección exterior de plástico y es la encargada de conectar: la válvula de llenado con el depósito en la válvula de llenado con parada automática, de igual manera, el depósito desde la válvula de abastecimiento al motor, con la válvula electromagnética de GLP que se instala previa al vaporizador.

Figura 31. Tubería de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.6. Tubo de plástico.

Este tubo es el encargado de proteger la tubería de alta presión en el compartimiento en el cual se ubica el depósito (maletero), eliminando la posibilidad de que algún objeto que se deposite pueda: presionar, fracturar, doblar y picar la tubería de cobre. Además, sirve para la ventilación del sistema en caso de fugas.

2.2.4.7. Válvula electromagnética para GLP.

Esta válvula es la encargada de abrir o cerrar el paso de GLP al regulador y es accionada desde el interior del vehículo (conmutador). Generalmente es instalada directamente al vaporizador grafica 32.

2.2.4.8. Válvula electromagnética para gasolina.

Son válvulas utilizadas en los sistemas de conversión a GLP en vehículos con inyección por carburador y su función es la de abrir o cerrar el paso de gasolina figura 32, es accionada desde el interior del vehículo (conmutador). Las válvulas electromagnéticas en ningún momento en la operación del motor estarán abiertas a la vez (gasolina y GLP) esto con el fin de evitar exceso de carburante en los cilindros del motor, con lo cual, este pueda detener su marcha debido a la variación en la relación estequiométrica.

Figura 32. Válvulas electromagnéticas para gasolina y GLP.



Imagen libre.

2.2.4.9. Unidad de mezcla.

Este componente es el encargado de suministrar el GLP al motor, ya sea al carburador o al múltiple de inyección (vehículos multipunto). Es un elemento específico para cada modelo de vehículo, dado que, depende de: los elementos de fijación, flujo de GLP, tamaño y potencia del motor.

Grafica 33. Unidad de mezcla.



Imagen libre.

2.2.4.10. Manguera reforzada.

Es una manguera que está cubierta con malla de acero inoxidable, la cual es la encargada de conectar el vaporizador con la unidad de mezcla y abastece de GLP, en estado gaseoso al motor.

Grafica 34. Manguera reforzada GLP.



Imagen libre.

2.2.4.11. Conmutador.

Este elemento es instalado en el tablero de instrumentos del vehículo, permite accionar las válvulas electromagnéticas a fin de que el usuario pueda elegir entre utilizar gasolina o GLP. Para realizar el cambio de combustible no es necesario detener el motor. Además, funciona como indicador de nivel de combustible GLP que se encuentra en el depósito.

Grafica 35. Conmutador GLP.



Imagen libre.

2.2.4.12. Emulador.

Componente electrónico utilizado en vehículos con inyección electrónica multipunto, el cual emula el funcionamiento del sistema de inyección, aun cuando no esté en operación, cuando el motor está funcionando con GLP. De esta manera, las señales que se reciben del sistema de inyección en los instrumentos no indican error por el no uso.

Grafica 36. Emulador de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.13. Sensor de oxígeno.

Este sensor le permite al sistema de control electrónico conocer la calidad de la mezcla del combustible cuando se está usando GLP, con el fin de poder regular convenientemente la alimentación del combustible al múltiple de admisión o al sistema de inyectores de GLP.

Grafica 37. Sensor de oxígeno.



Imagen libre.

2.2.4.14. Inyectores.

Son los encargados de suministrar de manera secuencial el GLP a cada cilindro del motor, esta función se atribuye a los inyectores separados e independientes entre ellos que reciben la señal electrónica del controlador electrónico.

El inyector recibe el combustible a una presión constante y lo distribuye a cada uno de los colectores de aspiración de los cilindros del motor en la cantidad adecuada.

Grafica 38. Inyectores de GLP.



Imagen libre.

2.2.4.15. Unidad de control electrónico.

Esta unidad también conocida como la computadora del sistema de GLP (ECU), es la encargada de preparar directamente los tiempos de inyección de los inyectores de combustibles original de gasolina y convertirlos en el tiempo de inyección de GLP. Esto para garantizar las estrategias definidas por el fabricante del vehículo con respecto a la manipulación y las emisiones.

Siendo este elemento es el encargado de mantener la relación estequiométrica aire/gas constante, durante el tiempo que el motor esté funcionando alimentado por el gas GLP, una vez calculado el tiempo de inyección, envía una señal eléctrica, de una duración determinada (milisegundos) al mando de inyectores para que este deje pasar el gas hacia los colectores de aspiración. Está dotado de un software específico para la programación y puesta a punto del sistema (especificaciones dadas por el modelo), así como de una auto-calibración para obtener una correcta alimentación a gas del motor.

Grafica 39. Unidad de control electrónico del sistema GLP.



Imagen libre.

2.2.5. Recorrido del GLP desde su carga hasta la combustión en el motor.

El GLP es introducido desde la válvula de carga hasta el cilindro de almacenamiento, de allí el GLP en estado líquido es conducido por medio de tubería de alta presión hasta el evaporador pasando por un filtro que retiene las posibles impurezas presentes en este; a dicho recorrido se le conoce como circuito de alta presión figura 40. A la entrada del evaporador va instalada una válvula electromagnética de corte de GLP, conectada a un conmutador situada en el tablero de mandos del vehículo.

Figura 40. Circuito de alta presión.

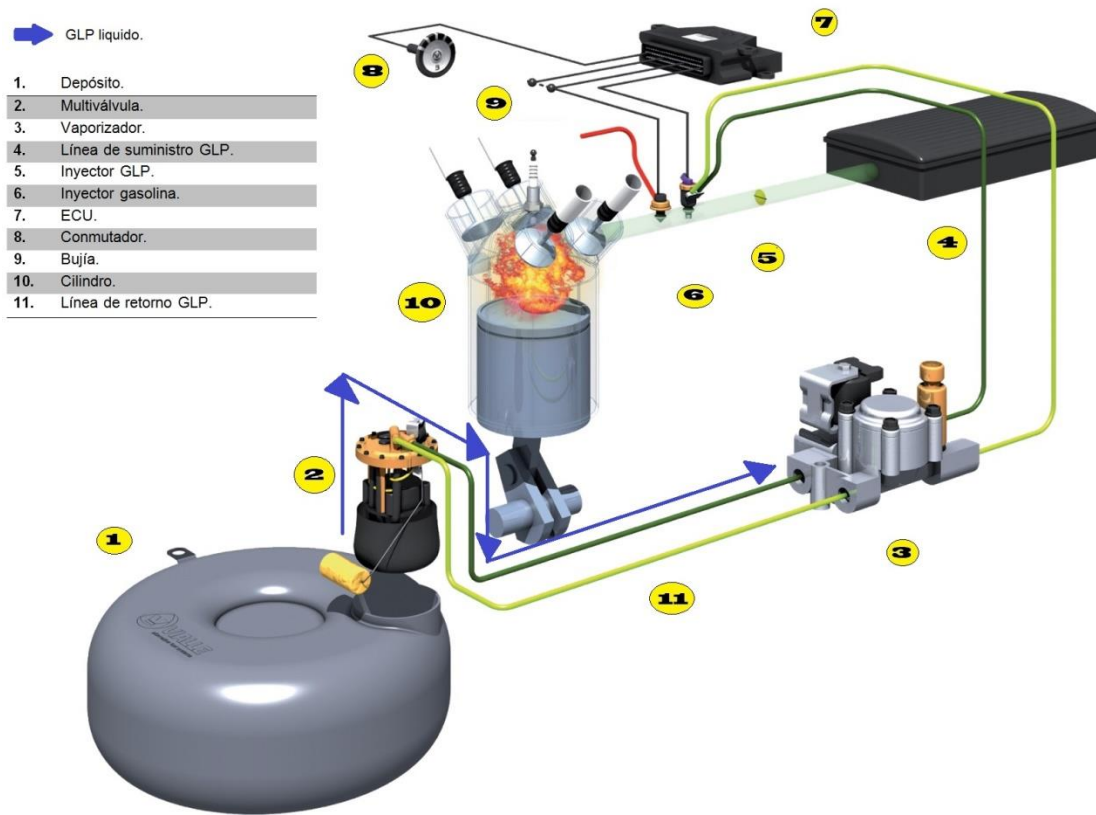


Imagen libre. Elaboración propia.

El GLP en el interior del evaporador es regulado, vaporizado y dosificado para ser suministrado al motor, en esta fase el GLP cambia de fase de estado líquido a gaseoso perdiendo presión figura 41. La pérdida de presión en el gas hace que pierda temperatura generando la posibilidad de llegar a su punto de congelación, por ende se hace necesario calentarlo utilizando una derivación del sistema de refrigeración del sistema. Esto se realiza, haciendo pasar agua caliente o refrigerante por el interior del vaporizador, dicho sistema de refrigeración del motor al vaporizador es conocido como circuito de calefacción.

Figura 41. Circuito de calefacción.

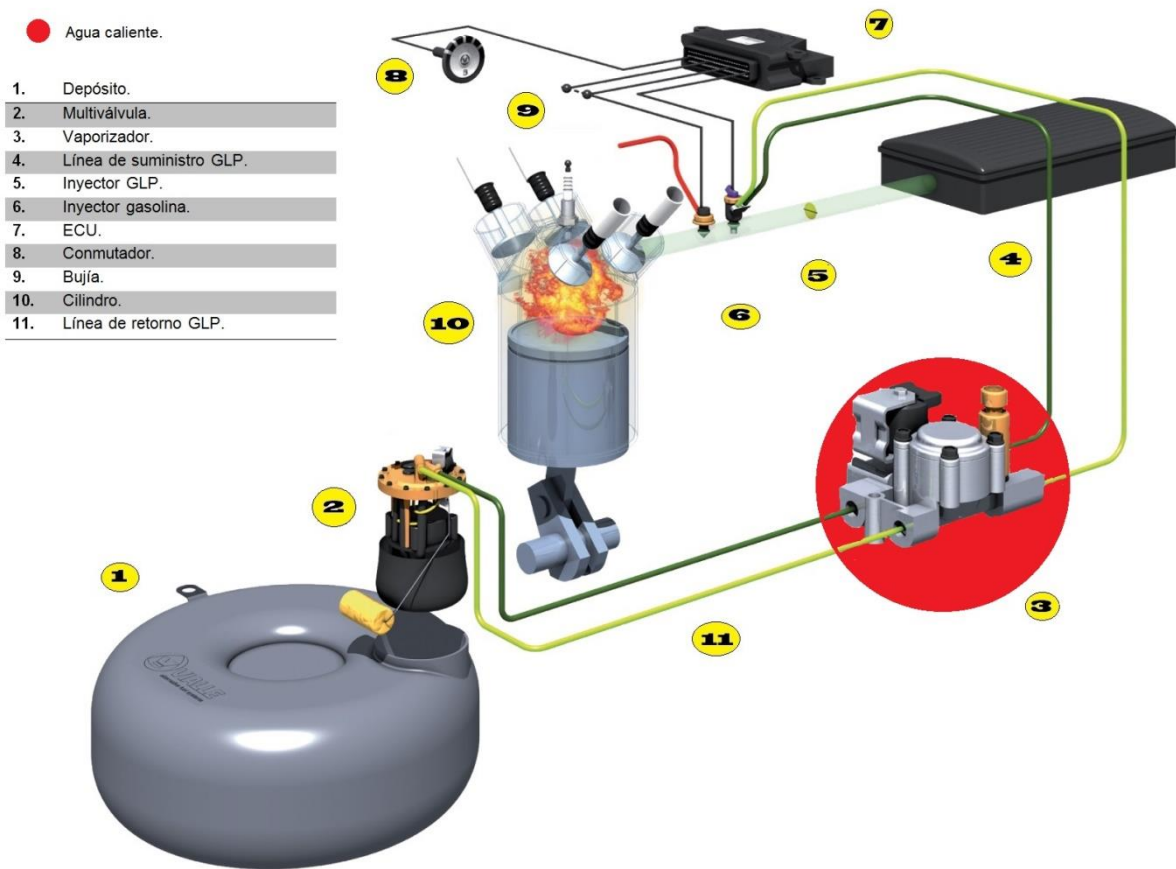


Imagen libre. Elaboración propia.

Por medio de la manguera reforzada el gas es conducido desde el vaporizador hasta la unidad de mezcla pasando previamente por la válvula limitadora de caudal; a este recorrido se le conoce con el nombre de circuito de baja presión figura 42. El mezclador tiene la función de otorgar la mezcla ideal de aire/gas para que el motor logre una óptima combustión, el cual debe ser instalado en el múltiple de admisión o en el carburador. Dado que, el GLP es suministrado a una presión inferior a la atmosférica los cilindros deben aspirar el gas, de igual manera el nivel del depósito del carburador es inferior al del surtidor de la gasolina y si no hay vacío en el colector de admisión este no saldrá.

Figura 42. Circuito de baja presión.

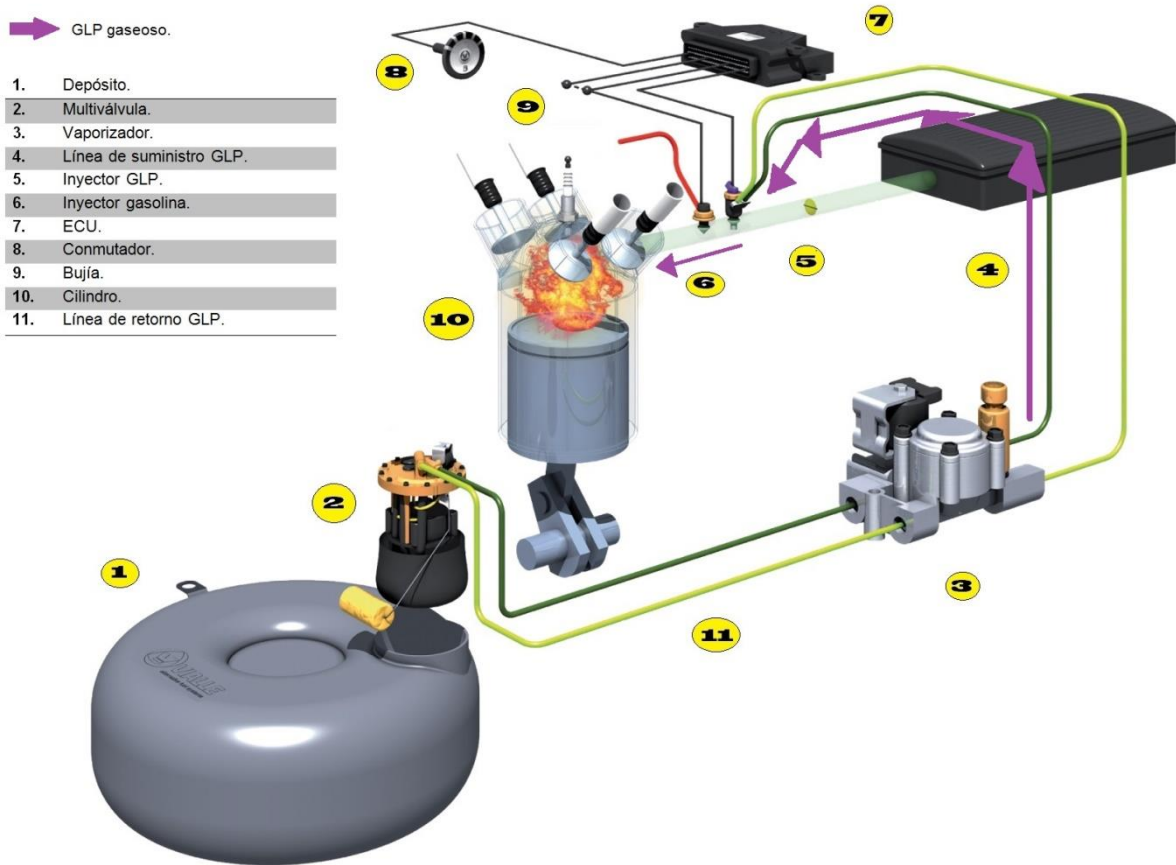


Imagen libre. Elaboración propia.

En el habitáculo del vehículo se encuentra instalada una llave conmutador la cual es un dispositivo electrónico que sirve para seleccionar el tipo de combustible con el cual funcionara el motor. Este elemento hace imposible que los dos combustibles puedan alimentar a la vez al motor.

Para vaporizar el GLP se necesita un gran cantidad de calor, por ende si el clima es demasiado frío, los motores que poseen este sistema se ponen en marcha con gasolina y cuando alcanzan su temperatura optima de operación pasan a funcionar con GLP; en motores a inyección electrónica, este paso puede ser automático.

2.2.6. Comparación técnica entre motores con diferentes combustibles.

Con base en investigaciones anteriores y estudios ya realizados del comportamiento del GLP en diversos motores operados a gasolina y diésel, se muestran los siguientes resultados:

2.2.6.1. Motor Cummins ISBe 220 31.

Estudio realizado en Australia en el año 2013 (Surawski, 2014) y analizado por la Universidad Nacional de Colombia, facultad de ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Plantean: un motor accionado por compresión con normativa de emisiones EURO III, al cual fue le adaptado un sistema para operar de forma dual con GLP; el sistema consta con un inyector de GLP ubicado antes del turbo cargador, para lograr variar la cantidad de suministro de GLP, se modificó el tiempo de duración en el que el inyector se encuentra abierto y la frecuencia en que lo hace. El motor se acopló a un dinamómetro para cargarlo y ser estudiado. Para el análisis de flujo de combustibles se implementó; para el diésel se utilizó un flujómetro y para el GLP se realizó el cálculo a partir de la diferencia de peso del cilindro de gas antes y después de cada prueba. [72]

Tabla 11. Especificaciones del motor Cummins ISBe 220 31.

Característica.	Valor.
Modelo motor.	Cummins ISBe 220 31
Desplazamiento (cc).	5900
Diámetro por carrera (mm).	102 x 120
Potencia máxima (KW/rpm).	162/2500
Torque máximo (KG m/rpm).	820/1500
Cilindros.	6 en línea
Relación de compresión.	17.3:1
Normativa de emisiones.	Euro III
Aspiración.	Turbo cargador con enfriamiento.

K. Surawski 2014.

Las propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales son: diésel con bajo contenido de azufre y GLP, en la tabla 12, se muestran las características de cada combustible.

Tabla 12. Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas del motor Cummins ISBe 220 31.

Propiedad	Diésel con bajo contenido azufre.	Gas licuado de petróleo.
Densidad (Kg/L).	0,838	0,51
Poder calorífico inferior (MJ/kg).	42,8	46,4
Poder calorífico superior (MJ/kg).	45,5	50,4
Calor latente de vaporización (kJ/kg).	230	426
Contenido aromáticos (% volumen).	24,4	0
Hidrocarburos aromáticos policíclicos. (% volumen).	2,9	0
Relación aire combustible.	14,5	15,7
Relación hidrogeno – Carbono (-).	1,7	2,67
Etano (%volumen).	-	1,6
Propano (%volumen).	-	97,1
Butano (%volumen).	-	1,3
Flash point (°C).	74,8	-104
Número de cetano.	55,8	5
Contenido de azufre (mg/kg).	6,1	<1

K Surawski, 2014.

La prueba consta de la utilización de los combustibles examinados en tres casos: solo diésel, baja concentración de GLP y alta concentración de GLP. Además, se incluyeron pruebas en cinco casos: a una velocidad del motor de 1500 rpm y un porcentaje de carga de 25%, 50% y 100%, ya una velocidad del motor de 2500 rpm un porcentaje de carga de 50% y 100%. [72]

Los consumos de diésel y de diésel-GLP para cada uno de los tres casos a las velocidades y cargas se muestran en la tabla 13. En la cual se halla: que al incrementar el porcentaje de concentración de GLP aumenta el consumo total de combustible y se muestra la eficiencia térmica la cual es inversamente proporcional al consumo específico de combustible (a mayor eficiencia térmica menor será el consumo de combustible para alcanzar la misma potencia). En las pruebas se evidenció que la eficiencia térmica disminuye al aumentar la concentración de GLP, es decir que el consumo de específico de carburante aumenta. [72]

Tabla 13. Consumo de combustible y eficiencia térmica en sistema diésel y dual diésel-GLP en un motor Cummins para distintas condiciones de carga y concentración de GLP.

Velocidad del motor (rpm)	Carga (%)	Concentración de GLP (%)	Consumo diésel (kg/h)	Consumo GLP (kg/h)	Eficiencia térmica.
1500	25	0	8,0	0	32,2
1500	25	22,1	6,4	1,7	29,5
1500	25	29,2	6,0	2,3	28,9
1500	50	0	13,8	0	35,4
1500	50	17,7	11,9	2,4	33,9
1500	50	27,0	10,4	3,6	33,0
1500	100	0	27,5	0	35,8
1500	100	14,1	23,5	3,6	35,7
1500	100	23,7	20,6	6,0	35,6
2500	100	0	33,7	0	37,4
2500	100	14,0	29,4	4,4	37,4
2500	100	16,7	26,7	4,9	39,2
2500	50	0	18,3	0	34,5
2500	50	23,4	15,6	4,4	31,6
2500	50	26,1	14,5	5,0	32,6

K. Surawski, 2014.

2.2.6.2. Chevrolet, vitara JX 1,6 modelo 1994.

Estudio realizado en Ecuador 2008, por Diego Armando Yugla Lema bajo la supervisión de la Escuela politécnica del Ejército (sede Latacunga). Plantean: para la realización un motor Suzuki 1,6 (especificaciones tabla 14), accionado por inyección a gasolina del vehículo Vitara JX del 1994, al cual le fue adaptado un equipo de conversión a GLP de procedencia Italiana de la marca LOVATO AUTOGAS, el cual consta de: una boca de llenado, un tanque de almacenamiento cilíndrico de 20 Kg (más brida, correa y anclaje), un multiválvula de GLP, tubería de alta presión, un conmutador electrónico, un vaporizador, un emulador de inyectores tubería de baja presión y un mezclador que se acoplo a la entrada de la toma de aire del motor. El vehículo se acopló a un dinamómetro para ser estudiada la potencia y torque suministrado siendo operado en gasolina y en GLP. Para el análisis de emisiones se utilizó un analizador de gases y para determinar el consumo específico de combustible se realizó en rutas primarias y secundarias. [73]

Tabla 14. Especificaciones del motor Suzuki 1,6 Litros.

Características.	Valor.
Modelo de motor.	G16B
Número de cilindros.	4 en línea
Posición.	Delantero longitudinal
Cilindrada (cm ³)	1590
Diámetro por carrera (mm)	75 x 90
Relación de compresión.	9,5:1
Sistema de encendido.	ESA
Sistema de inyección.	MPFI
Distribución.	4 válvulas por cilindro (16v)
Potencia máxima (HP).	75 a 5200 rpm
Par máximo (Nm).	123,48 a 3100 rpm
Bomba de alimentación.	29-40. 6 Psi (2-2.8)
Capacidad del tanque de gasolina (litros).	45,42 (12 galones)

Escuela politécnica del ejército.

Las propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales son: gasolina sin contenido de azufre y GLP, en la tabla 15 se muestran las características de cada combustible.

Tabla 15. Propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas del motor Suzuki 1,6 litros.

Propiedad	GLP	Gasolina
Volumen de masa a 15 °C (Kg/L).	0,557	0,750
Poder calorífico (Kcal/Kg).	11070	10500
Índice de octanos.	95 a 110	94 a 100
Presión a -15 °C (bar).	1	-
Presión a +15 °C (bar).	4	-
Presión a +50 °C (bar).	15	-
Porcentaje de propano (%).	80	-
Porcentaje de butano (%).	20	-

Escuela politécnica del ejército.

La prueba consta de la utilización de los combustibles (solo gasolina y solo GLP) examinados en tres casos; análisis de rendimiento del motor, análisis de emisiones de gas y rendimiento del combustible.

En la tabla 16, se ven los resultados obtenidos en la prueba de rendimiento del vehículo en el dinamómetro, se mostró una pérdida de 2,4 HP al ser operado con GLP de potencia con respecto al desempeño con gasolina, lo cual se expresa en una pérdida de un 3,8% en potencia.

Tabla 16. Rendimiento del motor con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros.

Vitara JX cc/ Suzuki 1,6 litros.		Gasolina	GLP
Potencia.	Máx. (HP)	62,6	60,2
	r.p.m.	5295	5995
	%	100	96,2
Torque.	Máx. (lbf.ft)	70,4	60,2
	r.p.m.	2715	3095
	%	100	85,5

Escuela politécnica del ejército.

En la tabla 17, se muestran los resultados obtenidos del motor en analizador de gases, en la cual se presenta una reducción del 37% de emisiones de todos los gases aproximadamente cuando es utilizado el motor con GLP respecto a los resultados al ser operado con gasolina. [73]

Tabla 17. Emisiones de gases con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros.

Gases	Gasolina	GLP	% de disminución
HC	234 p.p.m.	167 p.p.m.	29 %
CO	1,76 % Vol.	0,16 % Vol.	81 %
CO ₂	11,34 % Vol.	11,06 % Vol.	2.5 %
O ₂	2,23 % Vol.	3,05 % Vol.	Aumento 36.7%

Escuela politécnica del ejército.

En la tabla 18, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento de combustible, en la cual se detalla el porcentaje de consumo en cada recorrido.

Tabla 18. Consumo de combustible con sistema gasolina y GLP en un motor Suzuki 1,6 litros.

Propiedades	Gasolina	GLP	% de ahorro
Densidad a 17 °C (Kg/L)	0,75	0,510	32% menos a la gasolina.
Peso específico (Kg/gal).	2.48	1.94	31,7% GLP menos que la gasolina.
Recorrido por galón.	40Km	35,6Km	11% menos respecto a la gasolina.
			15.9% gal de GLP

Depósito lleno. (galones-Kg).	12 – 34	10,2 – 20	menos que la gasolina, 41,1% de Kg.
Recorridos.	Gasolina	GLP	% de recorrido.
1.	480 Km/12gal	360 Km/10.2gal	25% menos con GLP.
2.	480 Km/12gal	480 Km/13,5	12,5% gal de GLP más que la gasolina
3.	235Km/5,87gal	235/6,65gal	13,3% más gal de GLP que la gasolina

Escuela politécnica del ejército.

2.2.6.3. Motogenerador Cummins DFEH.

Estudio realizado en Colombia 2014, por la Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica (sede Bogotá). Plantean: para la realización de las pruebas un grupo electrógeno Cummins DFEH 400 kWe²⁷ compuesto por un motor Cummins diésel de combustión interna (especificaciones tabla 19), al cual le fue adaptado un equipo de conversión a GLP, el cual consta de un montaje general de: una cisterna de 11000 gal de capacidad a presión superior a la de condensación, un tanque pulmón donde la presión se disminuye a 30 psig²⁸ y un kit Bi-fuel que suministra el GLP al turbocargador del motogenerador mediante control automático. Dicho kit funcionaba con una electroválvula que controlaba el flujo de GLP que ingresaba al sistema reportando el grado de sustitución de diésel por GLP, el gas empleado en el sistema se mezclaba con la corriente de aire justo antes del turbocargador de tal manera que estas dos sustancias entraban premezcladas a los cilindros del motor.

Las pruebas de: eficiencia energética, emisiones de gases y distribución de la energía en el sistema, se calcularon con los siguientes instrumentos; un termohigrómetro Amprobe TR300 para determinar las propiedades del aire (temperatura y humedad), una termocupla tipo K para la temperatura de los gases de combustión, un analizador de gases Bacharach Model-300, un analizador de redes Fluke 434/PWR para el seguimiento de la calidad de la señal eléctrica, finalmente se determinó el consumo de combustible mediante la diferencia entre los flujos de entrada y salida del motor. [74]

²⁷ kWe, unidad de estándar de energía (sistema internacional de medidas) que hace referencia a kilovatios eléctricos.

²⁸ Psig, unidad anglosajona de presión que denota libra fuerza por pulgada cuadrada relativa o manométrica, que toma como cero el valor de la presión atmosférica (14,7 Psia).

Tabla 19. Especificaciones del motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.

Característica	Valor
Desplazamiento. (m ³ - in ³).	15 – 912
Diámetro del cilindro por carrera pistón (mm).	137 x 169
Velocidad del pistón (m/s).	10,1
Relación de compresión.	17:1
Dimensiones: largo, ancho y alto. (mm)	2269 x 1332 x 1669
Peso (Kg).	1658
Generación (KW).	400
Frecuencia del generador (Hz).	60

Universidad Nacional de Colombia. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado de petróleo.

Las propiedades de los combustibles utilizados en las pruebas experimentales son: diésel B4 y GLP, en la tabla 20 se muestran las características de cada combustible.

Tabla 20. Propiedades de los combustible utilizados en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.

Propiedad (%peso)	GLP	Propiedad (%peso)	Diésel B4
Nitrógeno.	0,05	Carbono.	86,55
Etano.	2,07	Hidrógeno.	12,95
Propano.	66,65	Oxígeno.	0,45
Iso-butano.	16,32	Azufre.	0,05
Butano.	14,87		
Iso-pentano.	0,04		
Total.	100	Total.	100
Densidad (Kg/Nm ³).	2,039		
LHV (KJ/Kg).	45879	LHV (KJ/Kg).	43567

Universidad Nacional de Colombia. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado de petróleo.

Las pruebas realizadas se realizaron en cuatro distintos niveles de carga: 25%, 50%, 75% y 100% de potencia eléctrica y se esperaba hasta llegar a un estado estable para tomar mediciones del consumo de: combustible, temperatura, humedad del ambiente, temperatura de entrada de aire y caracterización de gas de salida. [74]

Los resultados de la prueba de eficiencia (tabla 21), del sistema alcanzo su máximo punto de al 100% de carga cuando se trabajó únicamente con diésel ese valor es equivalente a 39%, levemente superior al 35% resultante de la operación diésel-GLP. Se evidencia que como la eficiencia se acerca a los valores máximos

en modo diésel cuando se utiliza diésel-GLP, aunque a mayor carga menor porcentaje de GLP en la mezcla, lo cual brinda buenas oportunidades para la implementación de GLP en el motor Cummins sin afectar el desempeño energético. [74]

Tabla 21. Consumo energético y eficiencia total en modo diésel y dual para diferentes niveles de carga en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.

carga	Potencia	Modo diésel		Modo dual			
		E _{térm.} Diésel	Ef	sustitución	E _{térm.} Diésel	E _{térm.} GLP	Ef
%	kWe	kWth	%	%	kWth	kWth	%
50	200	559,04	35,78	39,3	464,61	300,31	26,15
75	300	779,72	38,48	33,3	639,55	318,72	31,31
100	400	970,48	39,98	28,5	814,49	324,02	35,13

Universidad Nacional de Colombia. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado de petróleo.

Los gases de combustión se consideraron compuestos como: CO₂, CO, NO_x, SO_x y O₂. los cuales fueron censados en el sitio de emisión, logrando establecer los flujos de cada compuesto para los diferentes niveles de carga y los diferentes modos de mezcla; para modo diésel, la relación de equivalencia aire-combustible (λ) se mantiene constante a 1,5 aproximadamente. Mientras para el modo dual este varía entre 1,5 y 1,8.

En la tabla 22, se muestra los resultados de la prueba de emisiones. En la que se puede ver como la adición de GLP en el sistema aumenta la cantidad de material resultante de la combustión incompleta, dado que, el CO pasa de 460 ppm (partes por millón), a más de 1400 ppm, pero al aumentar la carga provoca una mayor relación equivalente aire combustible y a su vez genera mezclas más pobres de combustible y por tanto disminución del CO. Además, al incluir GLP a la mezcla se produjo la disminución en la cantidad de SO_x generado y una mayor concentración de NO_x resultado del Nitrógeno contenido en el combustible. Al igual, se evaluaron los flujos de cada uno de estos compuestos en función de la potencia generada; para una potencia de 400 kWe en modo diésel se emiten aproximadamente 306 Kg/h de CO₂, 0,72 Kg de CO, 2,224 de NO_x y 0,084 Kg de SO_x. Datos diferentes a los obtenidos con el sistema dual en el mismo nivel de carga donde se emitieron 285 Kg/h de CO₂, 3,79 Kg de CO, 3,19 de NO_x y 0,077 de SO_x. [74]

Tabla 22. Consumo de combustible, relación de equivalencia, A/F estequiométrica y resultados reportados del análisis de gases en el motogenerador Cummins DFEH motor QSX15G9.

Potencia KWe	GLP Kg/h	Diésel Kg/h	Equivalencia Δ	A/F stoi	CO ₂ %	CO Ppm	SO ₂ Ppm	O ₂ %
Modo diésel								
200	0	46,19	1,49	14,09	9,7	479	20,8	6,9
300	0	64,43	1,50	14,09	9,7	468	21,0	7
400	0	80,19	1,52	14,09	9,7	463	21,1	7,2
Modo dual								
200	23,56	38,39	1,53	14,42	10,4	2998	15,43	7,3
300	25,01	52,83	1,63	14,47	9,9	2183	14,22	8,1
400	25,42	67,30	1,74	14,55	9,4	1440	15,23	8,9

Universidad Nacional de Colombia. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado de petróleo.

Con base a los resultados determinaron la distribución de la energía en el sistema motogenerador Cummins. La temperatura de promedio de los gases de escape fue 480 °C, mientras que el ambiente tuvo una temperatura alrededor de los 19 °C y 40 % de humedad relativa. Debido al aumento en la cantidad de combustible no quemado en los gases de combustión dual, la energía emitida relacionada con estos compuestos pasó de 2 a 8 kW/h para un nivel de carga máxima equivalente a 400 kWe, valor que es menor a la cantidad de energía que se perdió debido al calor sensible de los gases de salida. Para una operación de 25 % de carga, este flujo energético equivale a 150 kW/h en modo diésel y 200 kW/h en modo dual y para el nivel de carga máxima las pérdidas son alrededor de 300 y 350kW/h. [74]

CAPITULO 3.

3. METODOLOGÍA PARA BANCO DE PRUEBAS.

En el presente capítulo se mostrara los diversos elementos que deben ser adquiridos para la construcción del banco de pruebas y las consideraciones que hay que tener en cuenta para ser elegidos. Además, da a conocer: las instalaciones, recursos y pasos para la instalación de un KIT de GLP a un motor de combustión interna y los ajustes que se deben realizar a dicho motor para que funcione de la manera más eficiente. Con base en lo anterior se planteara un proceso metodológico para la posterior realización de pruebas experimentales de eficiencia energética del GLP en el conjunto: motogenerador a gasolina y Kit de conversión GLP.

3.1. PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

3.1.1. Introducción a los motogeneradores.

Los motogeneradores son máquinas accionadas por motores. Las cuales transforman la energía mecánica a través de campos magnéticos y convierte el movimiento en energía eléctrica. Este proceso de transformación de energía se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (estator), que cuenta con varias partes: el estator, en su interior está cubierto por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos y el rotor, parte interna del estator que gira accionado por la turbina. Conformado por un eje y por unos circuitos, que se transforman en electro imanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente. Cuando el rotor gira a gran velocidad, debido a la energía mecánica aplicada en las turbinas por el motor, se producen corrientes eléctricas en los hilos de cobre del interior del estator. Dichas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de suministrar energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él. [75]

Desde el siglo XVIII una larga lista de investigadores y científicos han permitido conocer las leyes físicas que vinculan el campo magnético con la energía eléctrica. Algunos de los mayores representantes de este fenómeno y que han presentado teoremas y unidades de medida son: Volt, Amper, Ohm, Watt, Gauss, Lenz o Faraday entre muchos otros, que otorgaron los fundamentos y/o desarrollo del generador eléctrico básico (alternador).

Dos de las fórmulas clásicas de los generadores establecidas por los pioneros anteriores son:

- El voltaje producido por un generador elemental de una espira dentro de un campo magnético y a una velocidad dada:

$$V = \beta \times L \times v$$

V= voltios.

β =Inducción magnética.

L=Longitud de la espira.

v = Velocidad de giro.

- La frecuencia de la corriente alterna generada en Hz con la velocidad angular de giro y con el número de pares, de polos (1 Norte + 1 Sur) característico para la construcción de un generador.

$$Hz = P \times \frac{n}{60}$$

Hz= Frecuencia.

P= Numero de pares de polos.

n=Velocidad en rpm.

Gracias a la creación del generador moderno resultado del trabajo Michael Faraday y Joseph Henry en 1831, cuyo descubrimiento también dio lugar al motor eléctrico, micrófono, bocina, transformador y galvanómetro. Se habla que en la actualidad más del 95% de la energía eléctrica mundial se suministra mediante generadores. [76]

3.1.2. Motor de encendido provocado (MEP).

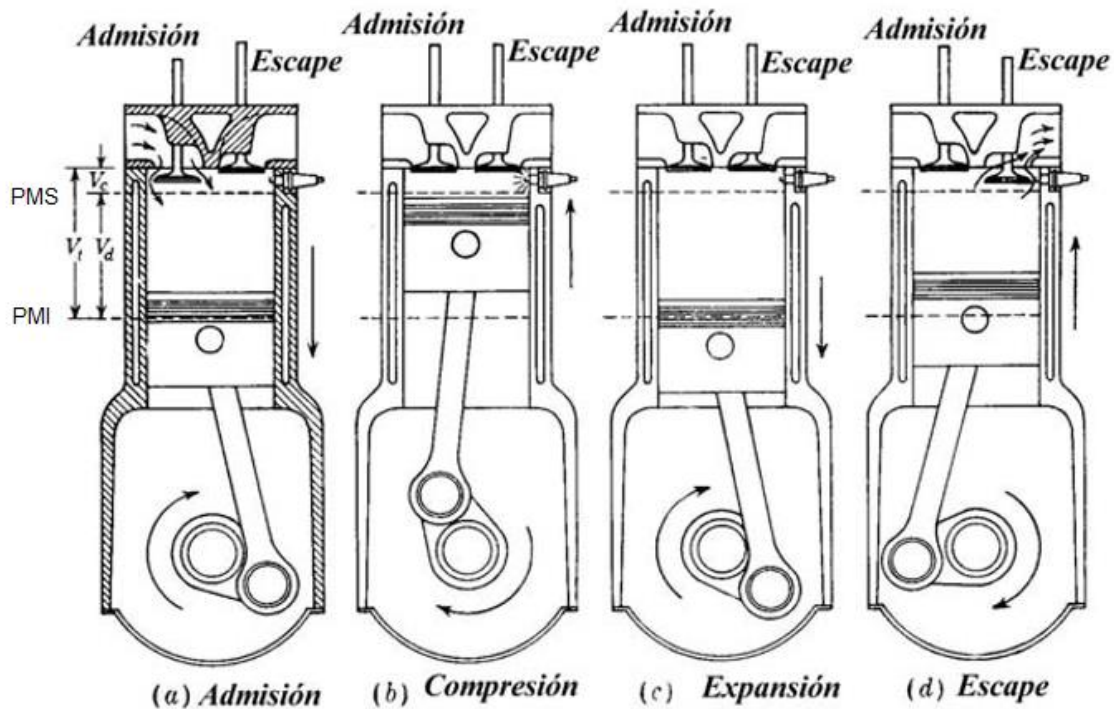
También llamado como motor Otto, fue inventado por el ingeniero alemán Nikolaus Otto en el año de 1876 basado en los principios de Beau de Rochas. Desde su invención se han realizado importantes modificaciones desde el modelo original, generando la optimización de sus prestaciones y la reducción de agentes contaminantes de los gases residuales que son liberados al ambiente. Además, de la mejora en productos antidetonantes han hecho a los combustibles con un índice de mayor rendimiento. [77]

Los motores MEP operan con base a un ciclo de cuatro tiempos. Cada cilindro del motor requiere de cuatro tiempos de su pistón, para que se genere la secuencia de eventos que producen una carrera de potencia figura 43, los tiempos son los siguientes: [78]

- Carrera de admisión: Es el momento en el cual el pistón inicia su recorrido desde el punto muerto superior (PMS) y termina con el pistón el punto muerto inferior (PMI). En este periodo se succiona la mezcla aire/combustible al interior del cilindro, con el fin de incrementar la masa de en el cilindro, la válvula de admisión abre ligeramente antes del PMS (avance a la apertura de admisión o AAA) y cierra después del PMI (retraso al cierre de admisión o RCA).
- Carrera de compresión: se realiza cuando las dos válvulas están cerradas y la mezcla aire/combustible al interior del cilindro es comprimida hasta una pequeña fracción de su volumen inicial. Hacia el final de la carrera de compresión, se inicia la combustión y la presión dentro del cilindro incrementa rápidamente.
- Carrera de expansión: sucede cuando el pistón está en el PMS y termina en el PMI en la medida que los gases a elevada temperatura y presión empujan el pistón hacia abajo forzando a girar la manivela. Durante esta fase se logra obtener cerca de cinco veces más trabajo que el realizado por el pistón durante la carrera de compresión. en el transcurso del pistón cuando este se aproxima al PMI la válvula de escape se abre para iniciar el proceso de escape y cae la presión en el cilindro.
- Carrera de escape: es la fase en donde los gases quemados salen del cilindro; primero, porque la presión en el cilindro puede ser más alta que la presión en los conductos de escape y segundo porque son barridos por el propio movimiento del pistón hacia el PMS. A medida que el pistón se aproxima al PMS se abre la válvula de admisión y justo después se cierra la válvula de escape y el ciclo inicia de nuevo.

Los motores de cuatro tiempos requieren, para cada cilindro, dos revoluciones del cigüeñal para cada carrera de potencia.

Figura 43. Ciclo de operación MEP de cuatro tiempos.



Heywood, J. B. (1988), "Internal Combustion Engine Fundamentals". Mc Graw Hill, New York.

Debido a que la compresibilidad del aire y a que la combustión no puede producirse a volumen constante, es necesario realizar modificaciones respecto a lo descrito anteriormente en los momentos de apertura y cierre de válvulas, de modo que estos no coinciden con los puntos PMS y PMI, sino que son efectuados con adelantos y retrasos respecto a estos puntos.

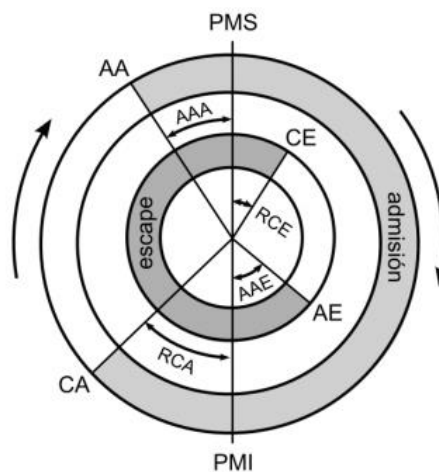
Según la secuencia de carreras anteriores, se definen de la siguiente manera: [78]

- AAA: avance en la apertura de admisión, como el ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de la válvula de admisión hasta el PMS.
- RCA: retraso en el cierre de admisión, como el ángulo girado por el cigüeñal desde el PMI hasta que se cierra la válvula de admisión.
- AE; avance al encendido, como el ángulo girado por el cigüeñal desde el salto de chispa en la bujía o desde el inicio de la inyección de combustible hasta que el émbolo se encuentra en el PMS.

- AAE: avance en la apertura de escape, como el ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de la válvula de escape hasta el PMI.
- RCE: retaso en el cierre de escape, como el ángulo girado del cigüeñal desde el PMS hasta que se cierra la válvula de escape.

El ángulo de nominado cruce de válvulas, es el periodo en el que las válvulas de admisión y escape se encuentran abiertas al mismo tiempo y es la suma de los valores AAA más el RCE. Dichos ángulos suelen ser representados con un gráfico como el de la gráfica 44.

Grafica 44. Diagrama de la distribución de un motor de cuatro tiempo.



F. Payri, J. M. (2011). "Motores de combustión interna alternativos". Editorial Reverté.

3.1.3. Propiedades geométricas motores MEP.

Para poder hablar de las propiedades geométricas de los motores es preciso especificar y denotar los parámetros geométricos grafica 45, los cuales son:

S= Carrera.

PMI= Punto muerto inferior ($\alpha = 180^\circ$).

D= Diámetro del pistón.

S/D= relación carrera diámetro.

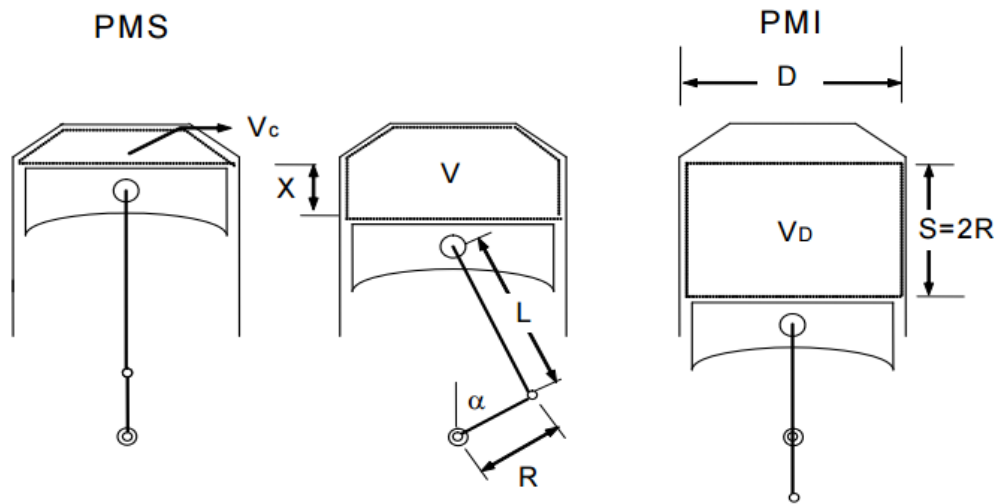
R_c = Radio muñequilla.

L= Longitud Biela.

α = Ángulo girado cigüeñal.

PMS= Punto muerto superior ($\alpha = 0^\circ$).

Grafica 45. Parámetros geométricos.



F. Payri, J. M. (2011). "Motores de combustión interna alternativos". Editorial Reverté.

De los parámetros anteriores se plantean las siguientes ecuaciones para determinar el área y los volúmenes:

- Área del pistón.

$$A_p = \frac{\pi(D^2)}{4}$$

- Volumen desplazado.

$$V_D = \frac{\pi(D^2)}{4} S$$

- Volumen del cilindro y la cámara de combustión.

$$V = A_p(X) + V_C$$

$$X = f(\alpha, L, R)$$

V_C = Volumen de la cámara de combustión.

- Cilindrada del motor.

$$V_T = Z(V_D)$$

Z= Número de cilindros.

V_D =Volumen desplazado.

Con base en lo anterior las propiedades geométricas de los motores MEP son:

- Relación de compresión.

Es la relación entre el máximo volumen formado por el cilindro (V_D+V_C) y el volumen mínimo correspondiente a la cámara de combustión (V_C).

$$R_C = \frac{V_D + V_C}{V_C} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}}$$

- Velocidad media del pistón.

Media aritmética de las velocidades instantáneas del pistón, la ecuación está en función de la carrera S y la velocidad del motor N.

$$V_P = \frac{S \times 2 \times N}{60000} \left[\frac{m}{s} \right]$$

3.1.4. Presión media efectiva.

Presión media efectiva o PME es una presión teórica que si actuara sobre el embolo durante la carrera de potencia completa, se generaría la misma cantidad de trabajo que el producido por el ciclo real. Es obtenida de la división del trabajo del ciclo por el volumen desplazado en el cilindro por ciclo:

$$\text{Trabajo por ciclo} = \frac{P \times i}{n}$$

Donde "i" es el número de revoluciones del cigüeñal por cada carrera de potencia del cilindro, dos para motores MEP de cuatro tiempos y uno para motores de dos tiempos, entonces:

$$PME = \frac{P(Kw) \times i \times 10^3}{V_D(dm^3) \times N(rev/s)} [kPa]$$

La presión media efectiva se toma como parámetro para comparar el desempeño de máquinas MEP y MEC de igual tamaño. Por lo tanto la máquina que tiene un valor de PME entregara más trabajo neto por ciclo y en consecuencia, se desempeñara mejor.

3.1.5. Relaciones de aire/combustible y combustible/aire.

Las relaciones son el número que expresan la cantidad, en masa o en volumen de aire aspirado por un motor para una cantidad unitaria de combustible. Dicha relación es función del combustible, del tipo de motor, de su regulación y de la carburación.

Para el ensayo de motores, normalmente se miden el flujo másico de aire \dot{m}_a y el flujo másico de combustible \dot{m}_f . La relación entre estos flujos es útil al momento de definir las condiciones operativas del motor:

$$\text{Relación aire combustible} = \frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

$$\text{Relación combustible aire} = \frac{F}{A} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}$$

El rango de funcionamiento normal para un MEP usando gasolina como combustibles es:

$$12 \leq A/F \leq 18 \therefore (0.056 \leq F/A \leq 0.083)$$

Debido, a que la composición de los productos de la combustión es diferente para mezclas pobres y ricas y que además la relación combustible/aire (dosado) depende de la composición del combustible, se considera que es un parámetro más informativo el dosado relativo, que se define como la relación entre el dosado de funcionamiento del motor y el dosado estequiométrico: [79]

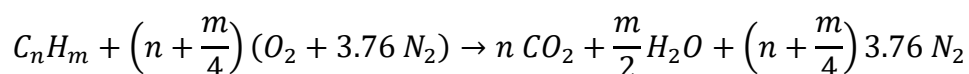
- Dosado (F), es el parámetro que caracteriza la mezcla combustible/aire.

$$F = \frac{\text{Masa combustible}}{\text{Masa aire}} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{m_{fcc}}{m_{acc}}$$

\dot{m} = Gasto másico (kg/s).

m_{cc} = Masa por cilindro y ciclo (kg).

- Dosado estequiométrico (F_e), es el dosado que tiene que haber en una mezcla aire/combustible para que en la relación de combustión no sobre aire ni combustible.



$$F_e = \frac{12n + m}{\left(n + \frac{m}{4}\right)(28 + 3.76N_2)}$$

Es una propiedad del combustible.

Para los combustibles usables $F_e \in \{1/14.5, 1/15.5\}$.

- Dosado relativo (F_r) o riqueza.

$$F_r = \frac{F}{F_e} = \begin{cases} > 1 & \text{Rico (exceso de combustible)} \\ = 1 & \text{Estequiométrico} \\ < 1 & \text{Pobre (defecto de combustible)} \end{cases}$$

- Coeficiente de exceso de aire (λ).

$$\lambda = \frac{1}{F_r}$$

- Rangos usuales de dosado relativo.

$$MEC \rightarrow F_r \in \{0.04, 0.7\}$$

$$MEP \text{ automoción} \rightarrow F_r \in \{0.9, 1.3\}$$

$$MEP \text{ industrial} \rightarrow F_r \in \{0.6, 0.8\}$$

3.1.6. Consumo específico de combustible.

Un parámetro útil y que es comúnmente utilizado en el estudio de motores es el consumo específico de combustible (sfc), ya que relaciona el flujo másico de combustible por unidad de potencia de salida, esto representa una medida de eficiencia de un motor usando el combustible suministrado para producir trabajo.

[80]

$$sfc \left(\frac{g}{kw \times h} \right) = \frac{\dot{m}_f \left(\frac{g}{h} \right)}{P(kw)}$$

3.1.7. Rendimiento volumétrico.

El rendimiento volumétrico N_v , se suele emplear como parámetro que indica la efectividad del proceso de llenado del cilindro en el motor y se usa solo con motores de cuatro tiempos los cuales tiene un proceso distinto de indicción. Es definido como la relación entre el flujo del aire que entra en condiciones reales de operación del motor y el flujo de aire que entraría teóricamente a llenar el cilindro a las condiciones del sitio: [81]

$$N_v = \frac{2 \times \dot{m}_a}{\rho_{air} \times V_d \times N}$$

$\dot{m}_a =$ Flujo másico de aire.

$\rho_{air} =$ Densidad del aire.

$V_d =$ Volumen del cilindro.

$N =$ Número de revoluciones del motor.

La densidad del aire en la admisión puede ser tomada como: la del aire a las condiciones ambiente del lugar, en tal caso N_v mide la capacidad de bombeo de todo el sistema de admisión (suele ser lo más usual), o puede ser tomada como la densidad del aire en el múltiple de admisión, en tal caso N_v mide la capacidad de bombeo del puerto de admisión y la válvula solamente (suele ser la menos empleada). Los valores máximos de N_v para motores de aspiración natural están en el rango de 80 a 90%. [81]

3.1.8. Factores para la elección de un motogenerador.

La elección de un motogenerador se basa en diversos parámetros como lo son: tipo de combustible, tipo de conexión, motor de cuatro o dos tiempos, nivel de sonoridad, tipo de refrigeración, tipo de encendido, cantidad de fases (monofásicas y trifásicas), con tecnología Inverter (AVR) o sin ella, velocidad de giro de la máquina, velocidad sincrónica y la cantidad de potencia generada. A continuación se explicaran las más relevantes: [82]

- Velocidades de giro.

La tensión y la frecuencia de la corriente alterna generada están directamente relacionadas con la velocidad de giro, en los generadores comerciales están universalmente establecidas las siguientes velocidades: para 50 Hz (red europea 400/230 V) de 1500 rpm de dos pares de polos y 3000 rpm para un par de polos, y para 60 Hz (red americana 440/110 V), 1800 rpm de dos pares de polos y 3600 rpm de un par de polos. Además, se relaciona la velocidad con el tamaño del generador, de lo cual se plantea para los motores lo siguiente: los motores MEC

de mediano-gran tamaño giran a 1500 rpm (1800, red americana) y están previstos para trabajo en servicio continuo. Para los motores gasolina, gas y pequeños MEC la velocidad de 3000 rpm (3600, red americana) el servicio de estos equipos es de carácter servicio intermitente. [83]

- Velocidades sincrónicas.

La velocidad de giro es constante y este régimen permanente está ligado con la frecuencia de la red a la que está conectada y al número de pares de polos. Estos polos (1 Norte + 1 Sur), están situados diametralmente para crear el campo magnético de excitación y es posible situar pares múltiples pares de polos dando lugar a máquinas de 1, 2, 3, 4, 5 e incluso más.

Aplicando la fórmula ($Hz = P \times \frac{n}{60}$), para obtener 50 o 60 Hz (países americanos y mariana), aparecen las posibles velocidades sincrónicas según el número de pares de polos para el que se construya su bobinado. [84]

Tabla 23. Velocidad sincrónica por la cantidad de pares de polos.

Frecuencia	Pares de polos.					
	1	2	3	4	5	6
50 Hz	3000 rpm	1500 rpm	1000 rpm	750 rpm	600 rpm	500 rpm
60 Hz	3600 rpm	1800 rpm	1200 rpm	900 rpm	720 rpm	600 rpm

Pablo García. Academia de física del CBTIS 162.

- Potencia generada.

La potencia generada por el motogenerador es la relación de paso de energía por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía que suministra en un momento determinado, la unidad de dicha potencia en el sistema internacional de unidades es el vatio (Watt).

La manera por la cual se determina la cantidad de potencia requerida por un motogenerador está directamente asociada al consumo de kilo vatios (KW) y/o kilo voltio amperio (KVA) que consumen determinados objetos, por lo cual, la potencia requerida sería la que supla la suma de todas las cargas de los dispositivos a conectar, por ejemplo: un computador 220 W, un microondas 800 W, un bombillo de 15 W y un televisor de 60 W. se suman todas las cargas: [85]

$$220 W + 800 W + 15 W + 60 W = 1095 W \text{ ó } 1.1 KW.$$

La resultante de la suma de todas las cargas será pues la capacidad mínima que se busca en un motogenerador.

- Tipo de combustible.

Los combustibles con los cuales operan los motogeneradores pueden ser: gasolina, Diésel y gas natural. Los motogeneradores que operan con Diésel suelen ser generadores de tamaño medio-grande y pueden trabajar en uso continuo, a diferencia de los operados por gasolina y gas natural que suelen ser de tamaño pequeño-medio, trabajando en lapsos de 4 a 6 horas. [86]

- Tipo de conexión.

Hace referencia al modo de fijación de la máquina al ambiente donde será utilizado, estos entonces serán fijos o portátiles; los generadores fijos o grupos electrógenos, son equipos anclados o colocados de manera que no se muevan ni se puedan trasladar. Los generadores portátiles son aquellos que pueden ser trasladados con relativa facilidad y no necesitan ser anclados para su operación.

- Motor de cuatro o dos tiempos.

Los generadores de dos tiempos son más ruidosos y económicos, pero consumen menos combustible y suelen dar más autonomía. Los motores de cuatro son más silenciosos y más costosos, pero poseen una vida útil más prolongada.

- Tecnología Inverter (AVR).

Esta es una característica muy importante, ya que esta tecnología permite que un generador se comporte de una manera estable y no fluctuante, las fluctuaciones en la tensión eléctrica o voltaje pueden generar daños a los dispositivos conectados a la máquina.

3.2. PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL KIT DE GLP.

Para la elección del equipo a instalar, es necesario saber: tipo de motor, condiciones del motor, tipo de encendido del motor y las condiciones mecánicas y eléctricas del mismo, para de esta manera poder determinar la tecnología a implementar. Los kit de GLP son clasificados por los sistemas de alimentación y son denominados generaciones las cuales van desde la primera hasta la quinta, dichas generaciones son:

- Primera generación.

Este sistema es implementado en vehículos carburados y consta de los siguientes componentes:

- Válvula de llenado.
- Depósito de combustible.

- Manómetro indicador de carga.
- Conectores y tapones de tuberías.
- Tubería de alta presión.
- Filtro de combustible.
- Reductor o vaporizador.
- Dosificador.
- Conmutador.

- Segunda generación.

También denominada Lazo abierto, este sistema es implementado en motores a inyección mono punto o multipunto, pero excluye el uso del sensor de oxígeno.

Los componentes de este sistema son los mismos de la primera generación, con la diferencia, de que es agregado un emulador de pulsos de inyección, para que cuando exista la conmutación de la alimentación de gasolina a GLP, no se genere códigos de falla y un mal funcionamiento del sistema.

- Tercera generación.

También llamado sistema Lazo cerrado, es implementado en motores con alimentación de combustible por inyección mono punto o multipunto, incluyendo el uso del sensor de oxígeno.

Este sistema es muy parecido al de segunda generación, la única diferencia es que se le adiciona al kit el uso de las señales del sensor de oxígeno y un sistema de control electrónico (ECU) adicional para el sistema GLP, esto con el propósito de mejorar la relación estequiometría aire/combustible, para así contar con un mejor desempeño en el vehículo y reducir las emisiones contaminantes.

- Cuarta generación.

Sistema dedicado a la admisión mono punto, con dosificaciones de combustible a cada cilindro; es decir, vehículos diseñados para trabajar directamente a GLP. Estos equipos se conectan en paralelo con los equipos originales de gasolina.

Componentes del sistema:

- Válvula de llenado.
- Depósito de combustible.
- Válvula de reguladores de presión.
- Manómetros indicadores de carga.
- Conectores y tapones de tuberías.
- Tuberías de alta presión.

- Mangueras de baja presión.
- Filtro de combustible.
- Inyector mono punto gasolina/GLP en motores mono punto.
- Válvula de control de gases y dosificadores en motores multipunto.
- Conmutador.
- ECU GLP.
- ECU gasolina.

En los motores dedicados a GLP, ambos controladores electrónicos (ECU) adquieren las señales directamente de los sensores.

- Quinta generación.

Sistema dedicado a la admisión multipunto, estos equipos se montan en serie con el sistema original de gasolina.

Este sistema es muy similar al de cuarta generación, con la excepción de contar con inyectores independientes para cada cilindro, suministrando el GLP de manera secuencial a cada cilindro del motor; de igual manera las ECU de gasolina y GLP adquieren las señales directamente de los sensores.

3.3. **NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS REFERENTES A GLP.**

- NTC 2303.

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

- NTC 3768.

Vehículos automotores. Funcionamiento de los vehículos con GLP. Centro de servicio especializado para conversión y mantenimiento de sistemas de carburación en motores con funcionamiento dedicado a gasolina por dedicado a GLP o dual GLP/gasolina.

- NTC 3769.

Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP, estaciones de servicio para suministro de GLP.

- NTC 3770.

Sistemas biocombustibles GLP/gasolina o dedicados a GLP.

- NTC 3771.

Vehículos automotores. Funcionamiento de vehículos con GLP. Conversión de motores de combustión interna con sistema de carburación dedicado a gasolina por carburación biocombustible (GLP/gasolina) o dedicado GLP.

- NTC 3853.

Equipo, accesorios, manejo y transporte GLP.

- NTC 4786-3.

Transporte de mercancías peligrosas. Carrotaques para transporte terrestre. Parte 3: gas licuado de petróleo GLP.

- NTC 5281.

Recipientes para almacenamiento de GLP utilizado como combustible.

3.4. INSTALACIÓN DE EQUIPO DE CONVERSIÓN DE GLP.

La instalación del kit de conversión se realiza de manera secuencial, de forma que todos los componentes instalados tengan un lugar específico y sean siempre implementados en los vehículos del mismo modo. Esto con el fin de disminuir la cantidad de errores que puedan llegar a cometerse por falta de concentración y desorden durante la instalación.

Ya que los componentes de; la primera, segunda y tercera generación son similares, salvo ciertos componentes únicos en cada sistema, se explicará de forma breve el proceso de instalación de kit de tercera generación. De igual manera, las tecnologías de cuarta y quinta generación son similares, se explicará el modo de instalación del sistema de quinta generación.

3.4.1. Instalación del kit de tercera generación.

Las principales operaciones que se realizan para las partes de alta presión, tuberías y partes mecánicas son las siguientes:

Se instala el vaporizador y este debe ser ubicado en el chasis del vehículo guardando ciertas distancias con: el suelo, el radiador, el motor o alguna pieza móvil del sistema de distribución. De ninguna manera debe ser fijado al motor o a alguna pieza fijada al motor. Se deben usar mangueras de agua para aislar el sistema de refrigeración del motor para que este pase por dentro del vaporizador y haga contacto con la superficie de transferencia de calor. [87]

Una manguera une la salida de GLP a baja presión del vaporizador con el mezclador. Este debe ser colocado previo al cuerpo de mariposa, por lo que es necesario cortar la línea de suministro de aire para colocarlo. Además, se debe asegurar que no haya fugas de aire en la conexión del mezclador de lo contrario la calibración final no será ideal. [88]

Para la instalación de los depósitos de combustible (cilindros), se debe acoplar primera mente sus componentes afines: multiválvula de GLP, válvula de carga con el manómetro de control de cargas, las tuberías de cobre, que transportaran el gas desde la parte posterior hasta la frontal del vehículo. Terminada la instalación de los tanques (cilíndricos o toroidales) se procederá a realiza la prueba de estanqueidad especificada en el capítulo 2 (2.1.2.1. control de estanqueidad).

Las principales operaciones que se realizan para las partes electrónicas son las siguientes:

Los componentes como la unidad del sistema de lazo cerrado, el emulador de inyectores, el emulador OBD son ubicados en el chasis de los vehículos en una zona donde no sean afectados por el calor producido por el motor. También, se debe permitir que cada cableado y sus conectores respectivos accedan a la posición de los componentes electrónicos sin ejercer una fuerza excesiva en su conexión. Cuando el cableado esta culminado, se instala el conmutador dentro de la cabina según lo indicado por el cliente. [89]

3.4.2. Instalación del kit de quinta generación.

Las principales operaciones que se realizan para las partes de alta presión, tuberías y partes mecánicas son las siguientes:

El vaporizador debe ser instalado cerca de los equipos de aspiración del aire para la ventilación y la calefacción de la cabina, con una distancia mínimo de 650 mm del suelo y 150 mm de los tubos del sistema de escape, a su vez, el evaporizador debe ser ubicado de forma vertical con fácil acceso por si es necesario realizar regulaciones u operaciones de mantenimiento. Además, debe ser posicionado en un lugar más elevado que el punto de máxima altura del radiador y su manguera de entrada, con el fin de evitar la formación de burbujas en el sistema de refrigeración. Las mangueras del sistema de refrigeración que se adaptan al evaporizador para calentar la expansión del gas dentro del evaporador deberán ser conectadas al sistema de refrigeración, de manera que el fluido refrigerante antes de ingresar al radiador, circulen por el evaporizador.[90]

La instalación del depósito de combustible es idéntica para cada generación, por lo cual se debe tener en cuenta lo descrito en el punto 3.4.1 de este capítulo.

Acto seguido se maquina los agujeros para las toberas en el múltiple de admisión, se coloca el riel de inyectores con las mangueras de alimentación y el filtro de gas. Después, las mangueras que conectan al riel con el filtro y el filtro con el evaporizador. Cada una de las conexiones debe ser totalmente impermeable es por eso que se aconseja el uso de abrazaderas para cada unión de mangueras. [91]

Las principales operaciones que se realizan para las partes electrónicas son las siguientes:

La cantidad de elementos electrónicos en un kit de quinta generación es superior a la de uno de tercera generación, la unidad de control electrónica de GLP es asegurada al chasis del auto, en la lámina de la parte posterior del tablero, es necesario dejar un espacio libre para poder pasar el cableado del ramal y conectarlo a la unidad de control sin que el cableado se vea afectado por temperatura o fuerzas externas. Para finalizar, se ubica el conmutador selector de combustible dentro de la cabina del auto, en el tablero, al alcance visual del conductor y se realiza todo el cableado eléctrico que conecta a todos los componentes electrónicos entre sí, junto con el sistema de control electrónico del Kit y la ECU de gasolina original del auto.

3.5. REGULACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE CONVERSIÓN GLP.

Para garantizar el debido funcionamiento del kit instalado, es necesario realizar una apropiada calibración de los elementos instalados y así obtener una conversión éxitos. En las instalaciones de primera y segunda generación se usa el evaporizador para calibrar la marcha lenta (ralentí) y altas revoluciones (cruce) esto de acuerdo al tipo de motor y sus condiciones. Para la tercera generación se usa el evaporizador para calibrar la marcha lenta y usando un computador se registran los valores adecuados para la máxima y mínima apertura del régimen de pasos del actuador eléctrico mecánico, sino se cuenta con el software adecuado se suele controlar la lectura del voltaje del sensor de oxígeno para que cicle entre 0.6 y 0.7 voltios. [92]

Para la calibración de los equipos de quinta generación se usa únicamente la computadora personal y el software especial suministrado por el proveedor. Una vez que sea realiza un mapa de los tiempos de inyección de gas para un

determinado tipo de auto, es posible grabarlo y simplemente cargarlo en los siguientes vehículos con las mismas características.

3.6. Metodología para etapa experimental.

Para el desarrollo del proyecto en su etapa experimental y teniendo en cuenta la información de este documento. Se debe realizar una serie de pasos, de los cuales, los más relevantes son: se realizará la elección del motogenerador con base en el alcance del proyecto y el presupuesto que se posea para su elaboración, paralelamente se seleccionará el kit de conversión de GLP más apropiado para el motogenerador y de acuerdo con las normas colombianas del capítulo 3 (3.3, Normas técnicas colombianas referentes a GLP).

Se debe realizar el montaje requerido para la obtención de datos en la medida de las posibilidades logísticas. Para lo cual, se deberá construir una estructura en la cual sea acoplado el motogenerador y partes del kit de GLP, paso siguiente, se procederá a el proceso de evaluación de preconversión del motogenerador con el ánimo de verificar las condiciones reales en las que se encuentra, hecho esto, se comenzará con la instalación de todos los componentes del kit las cuales abarcan: partes mecánicas, válvulas, sistema de carga, sistema de almacenamiento de combustible, circuito de alta presión, tuberías, evaporizador, electroválvulas, circuito de baja presión, circuito de calefacción, mezclador, sistema eléctrico, conmutador, inyectores, emulador, relés y demás componentes que sean requeridos.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta son los requerimientos tecnológicos y humanos entre los que comprende: herramientas, equipos especializados para toma de datos, equipos de consumo eléctrico, equipos neumáticos, determinación de la cantidad de personal y sus tareas específicas, logística, almacenamiento y requisitos legales.

Luego de haber realizado las acciones anteriores, se procederá a la recolección de datos, los cuales serán por: medición de flujo másico, determinación de la cantidad de combustible, combustión teórica, características del combustible, balances energéticos, formación de productos, determinación de contaminantes y porcentaje de carga al motogenerador.

CAPÍTULO 4.

En el siguiente capítulo se hablara del proceso que correspondiente a la realización del banco de pruebas, en el cual se especifica: la evaluación de preconversión que se le debe realizar al motor estacionario antes de la instalación del kit GLP, la instalación detallada del kit de conversión a GLP (1, 2 y 3 generación) al motogenerador, la instrumentación requerida y la adquisición de datos experimentales.

4. PROCESO PARA PRUEBAS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

4.1. PRECONVERSIÓN PARA MOTORES CARBURADOS.

La preconversión permite establecer la evaluación y la viabilidad del paso del combustible predeterminado del motor a GLP, para así: determinar si el motor está en buenas condiciones de trabajo para el cambio de combustible, verificar si cumple las exigencias del GLP con respecto al sistema de enfriamiento y comprobar que los sistemas eléctricos del motor funcionen correctamente. Para lo cual se realizan las siguientes pruebas al motor:

4.1.1. Estado de arranque.

Para esta prueba se debe realizar los siguientes pasos: [92]

- Evitar que el motor prenda (aplicar lo más sencillo, conectar el cable de alta de la bobina de encendido a masa-motor), y de esta manera se obtiene un mayor esfuerzo de arranque.
- Conectar voltiamperímetro que permita la lectura simultanea (V y A) o las dos unidades independientes.
- Dar arranque por 15 segundos continuos y observar:
 - ✓ Amperaje del arranque (tabla 24), este valor debe estar acorde con: el tamaño del motor (cilindrada) y con el índice de compresión del motor.
 - ✓ Caída del voltaje de la batería, que debe ser 9.6 V o mayor, que es el voltaje mínimo necesario para hacer funcionar el sistema de encendido.

Tabla 24. Amperaje del consumo de arranque.

MOTOR A GASOLINA	CONSUMO DEL ARRANQUE
1.000 a 2.000 cc	90 a 120 Amperios
2.200 a 3.600 cc	150 a 180 Amperios
3.600 a 4.500 cc	180 a 250 Amperios

Prestolite indiel – Automotive System, «Manual de taller motores de arranque»
2004- 2005.

4.1.2. Estado del sistema de encendido.

En el sistema de encendido, cualquiera que sea su tipo, lo primero a verificar es la alimentación de los elementos utilizados en el: bobina de encendido, modulo electrónico, sistema de control electrónico del sistema de encendido. Posteriormente se verifican los siguientes componentes:

4.1.2.1. Bobina de encendido.

Se debe comparar los valores de los bobinados, le aislamiento a la carcasa o base, el valor de la resistencia externa (si la hay) y verificar la alimentación directa de la bobina por señal de arranque. Además, el valor de las resistencia (s) del primario y secundario de la bobina. [94]

4.1.2.2. Distribuidor.

Esta es la parte funcional del sistema de alto voltaje y debe verificarse: el estado físico de la tapa, cables y rotor, la resistencia de los cables de alta y del carbón central de la tapa, la efectividad de los capuchones de aislamiento en la tapa y bujías. Por último, la calidad o tipo de los cables con el sistema utilizado. [94]

4.1.2.3. Sensor y/o captador de la señal de encendido.

Según el tipo de encendido puede estar ubicado en: el mismo distribuidor y en la parte delantera (polea) o trasera (volante) del cigüeñal. Para este elemento se debe verificar: el valor de la resistencia de la bobina y el valor de la tensión o señal producida, según sea el tipo. [94]

4.1.2.4. Avances de tiempo (chispa).

El avance de tiempo, tiene como fin obtener el mayor rendimiento térmico/mecánico de la mezcla combustible/aire, al darle el tiempo necesario para combustión y para que este tiempo se efectúe de acuerdo a la velocidad (rpm) del motor. Este parámetro se obtiene mediante los siguientes avances; Avance inicial, es normalmente un dato dado por el fabricante, valido para nivel de mar y a marcha mínima (ralentí). Este se debe incrementar de acuerdo con la altura de

utilización y el funcionamiento del motor sobre el nivel del mar; el incremento normal es de 1,8° de avance por cada 500 metros de altura del sitio donde funcione. Avance centrifugo, este avance se realiza por medio de pesas/rpm para desplazar o adelantar el giro del eje donde toma la señal el sensor y por avance por vacío, el cual por medio de un diafragma se logra que el soporte del sensor gire en sentido contrario al eje de referencia produciendo adelanto, efecto producido por el trabajo del vacío contra un resorte que devuelve el sensor a su sitio. [94]

La comprobación de los avances anteriormente descritos se describen en la pruebas dinámicas del motor (4.1.4.2 y en 4.1.4.3 del capítulo 4).

4.1.2.5. Bujías de encendido.

Normalmente se debe comprobar: su grado térmico, el tipo y profundidad de los electrodos y la calibración de los electrodos.

4.1.3. **Comprobaciones mecánicas.**

Dependiendo del estado y prestación del motor, se deben realizar una serie de comprobaciones en diferentes sistemas mecánicos del mismo, esto con el objetivo de verificar las condiciones reales en la cual se encuentran. Las pruebas que se realizan son las siguientes:

- Calibración de válvulas, para esta verificación se debe seguir el método indicado por el fabricante e igualmente su condición, si se realiza con el motor frío o caliente. Como también, se debe tener en cuenta la disposición de las válvulas en la culata para identificar las de admisión y las de escape.[95]
- Distribución mecánica, se realiza para los motores cuya distribución es efectuada por mediante correa dentada y tensor, para lo cual, se hace necesario revisar: la tensión de la correa y las marcas de sincronización. [95]
- Medición de compresión en los cilindros, para esta prueba se debe; Primero, desmontar las bujías y mantener la mariposa de aceleración a la máxima aceleración. Segundo, se toma cilindro a cilindro los valores de compresión dando arranque y este valor debe ser relativo al índice de compresión del motor. [95]
- Prueba de hermeticidad para cilindros (estanqueidad), esta prueba se realiza para complementar la medición de compresión, a fin de verificar donde está la falla posibles de baja compresión. para lo cual se realiza el siguiente procedimiento:[95]
 - ✓ Colocar el pistón en PMS de compresión.

- ✓ Frenar el motor para que no gire.
- ✓ Se retira la bujía y en su lugar se conecta una manguera de presión de aire, se libera presión de aire en y se observa o determina por donde escapa el aire.

4.1.4. Pruebas dinámicas de los sistemas del motor.

4.1.4.1. Marcha mínima del motor.

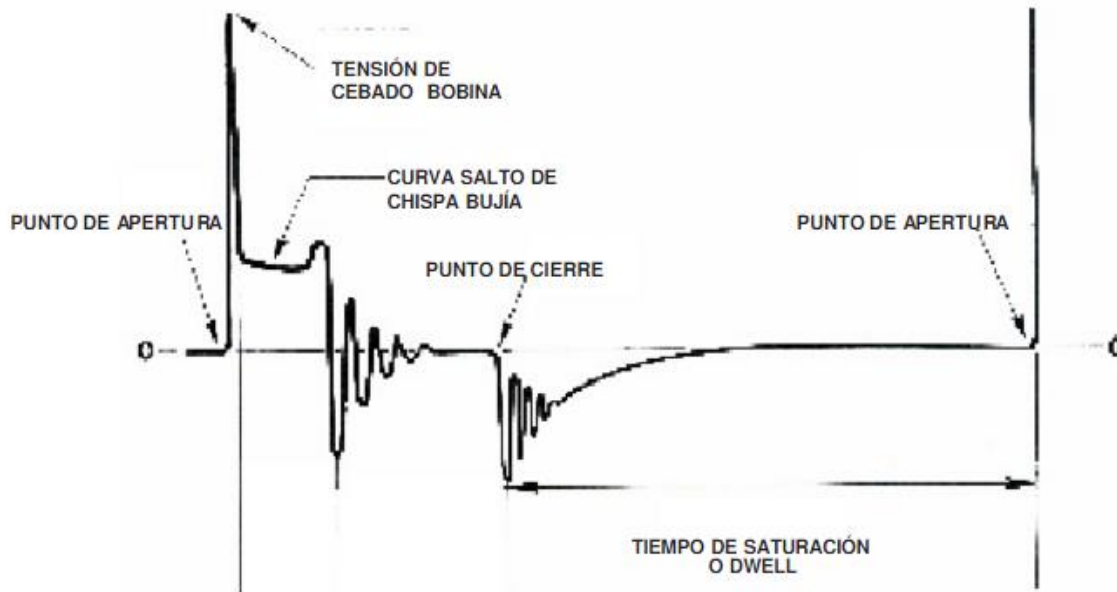
Para los motores carburados debe revisarse cuidadosamente todo el conjunto, en especial el eje de la válvula de aceleración (mariposa), verificando que no hayan juegos o desgastes que permitan un adecuado ajuste ralentí. Las acciones a verificar son:

- Velocidad de giro del motor (rpm), deben estar en un rango de 750 a 800 revoluciones a nivel del mar y entre 800 y 900 revoluciones para alturas mayores sobre el nivel del mar. [96]
- Calado inicial de la chispa, se debe comprobar con lámpara estroboscópica. Para la realización de la prueba se desconecta la manguera de vacío al vacío del distribuidor y se retira la tapa momentáneamente para la prueba.[96]
- Medición del valor de vacío en el múltiple de admisión, el valor debe ser estable; si hay movimiento (saltos de aguja del manómetro), se debe verificar la causa de la anomalía (posibles fugas de vacío).[96]
- Tiempo de saturación del primario de la bobina de encendido en milisegundos, siendo la bobina un transformador, debe tener el 63% del tiempo, para crear el magnetismo necesario del correspondiente para un cilindro, de acuerdo al número de rpm a que este el motor. [96]
- Verificar los sistemas reguladores de contaminación, como lo son: ventilación positiva del cárter, recirculación de gases de escape, canister o control evaporativo del sistema. [96]
- Análisis de gases, esta prueba permite conocer el proceso real de combustión y estado del motor y debe estar acorde con las pautas del DAMA²⁹ en cuanto a año y modelo. [96]
- Utilizando un osciloscopio, se debe verificar (figura 46): tensión de cebado de la bobina, tensión de salto de la chispa en la bujía y la calidad de la bobina (oscilaciones).[96]

²⁹ DAMA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente.

Figura 46. Tensión de cebado y chispa de bujía.

[95][



[95]

4.1.4.2. Prueba dinámica de avances.

Esta prueba se realiza en tres fases las cuales son las siguientes: [97]

- Centrifuga, mediante la lámpara estroboscópica comparar los valores de rpm del motor con lecturas sobre la polea del cigüeñal.
- Por vacío, mediante la lámpara estroboscópica tomar los valores de avance sobre la polea/cigüeñal contra los valores de vacío aplicados mediante una pistola de vacío, por medio de una manguera sobre el diafragma/vacuum del distribuidor o módulo.
- Comprobar el funcionamiento del carburador en intermedia, alta y con carga de ser posible.

4.1.4.3. Prueba dinámica del vacío, motor en todas las rpm.

Esta prueba se realiza para garantizar que no haya fugas en el múltiple de admisión y un cierre hermético de las válvulas de admisión.

De presentarse inestabilidad de la aguja del manómetro de vacío, comprobar que no existan fugas del vacío por los activadores (diafragmas) de los mandos de aire/combustible, válvulas del sistema EGR, vacuum del distribuidor, ventilación del cárter, entre otros. [97]

4.1.4.4. Comprobación del sistema de enfriamiento del motor.

Se debe determinar el tipo de enfriamiento, el cual puede ser:

- Radiador con tapa presurizada y vaso de recuperación del líquido de enfriamiento.
- Vaso de expansión y con válvula presurizada.
- Verificar la mezcla del líquido refrigerante, que puede estar compuesta así, por ejemplo: glicerina 15% más agua y/o alcohol al 26% más agua a una temperatura de -4 °C. Además, para refrigerantes con base en Glicol/etileno es recomendable que sus componentes antioxidantes no contengan cromatos³⁰ y que su contenido sea de cloruros por su capacidad regenerativa. [97]

4.1.5. Análisis de gases de escape.

La realización de esta prueba tiene como fin primordial, determinar el valor y comportamiento de los diferentes gases de escape y relacionarlos con los valores permitidos en un proceso de combustión eficiente. Con el análisis de gases es posible determinar las fallas en los parámetros requeridos en un proceso de combustión, como son: preparación adecuada de mezcla, estado y control de la temperatura, calidad y tiempo del arco de encendido, estado mecánico del motor, estado y funcionamiento de los sistemas de control de emisiones. Además, de determinar si las emisiones de gases que genera el motor están dentro de los rangos correctos establecidos en las normas. [98]

Las pruebas de análisis de gases se realizarán: en marcha mínima, marcha alta y en aceleración.

³⁰ Cromatos, son sales que tiene en común la presencia del ion cromato(CrO_4^{2-})

4.2. INSTALACIÓN DE ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL KIT DE CONVERSIÓN A GLP (1ª, 2ª y 3ª) GENERACIÓN.

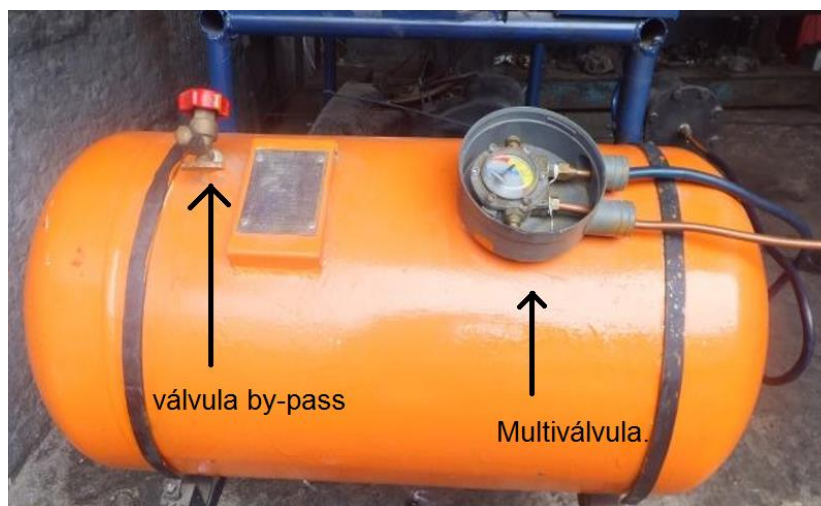
4.2.1. Instalación multiválvula y sistema de carga GLP.

Estos elementos son ensamblado al depósito de almacenamiento, el cual posee dos orificios: uno para el alojamiento de la multiválvula en donde ira también el sistema de carga y el otro que sirve de desfogue. Para la instalación de estos componentes se procede de la siguiente manera: [99]

- Se prepara la multiválvula de acuerdo al tamaño del tanque colocando y regulando la entrada del flotador y la tubería de ingreso de gas al tanque.
- Se asegura la multiválvula en el tanque de almacenamiento.
- Para el sistema de carga, se prepara la manguera que servirá para cargar el gas desde un tanque domestico al de almacenamiento. Esta se instalara a la multiválvula.
- En el orificio de desfogue, se acoplara una válvula by-pass para poder abrir y cerrar cuando se esté cargando el combustible. dicha válvula tiene el propósito de corregir la sobrepresión dentro del depósito antes de que esté sea llenado hasta volumen máximo consentido (80% del total del cilindro).

Para la instalación de la multiválvula está totalmente prohibido la obstaculizar el funcionamiento de la varilla del flotador, y que se puede perjudicar su movimiento y limitando de esta manera el trabajo efectivo de la válvula.

Grafica 47. Multiválvula y válvula by-pass.



[91] y Elaboración propia.

4.2.2. Instalación depósito de almacenamiento.

El tanque de almacenamiento de GLP habitualmente es colocado dentro del vehículo y este es fijado de manera que no pueda moverse de su posición, para evitar averías de los elementos adaptados a él.

El depósito de gas será asegurado en soportes de acero inoxidable o de acero recubierto con pintura antioxidante, de ser necesario estos serán reforzados en las zonas de anclaje para evitar deformaciones en la estructura. Además, se deben recubrir las abrazaderas del soporte con juntas de caucho para evitar el contacto de metal con metal, asegurando que no se generen daños al tanque por fricción, entre él y las abrazaderas. [99]

4.2.3. Instalación circuito de alta presión.

Los elementos que componen este circuito son:

- Tubería de alta presión, por donde transitara el GLP en fase líquida.
- Recubrimiento de plástico para proteger la tubería de alta presión del medio ambiente.
- Filtro de gas, el cual es el encargado de atrapar las suciedades que pueda contener el GLP.
- Dispositivos de ajuste colocados en las conexiones, las cuales aseguran la hermeticidad del sistema.

El circuito va desde la multiválvula ubicada en el tanque, hasta el evaporador. La tubería de alta presión es fijada a la salida del GLP líquido en la multiválvula, para después pasar hasta el filtro de gas y de ahí salir hasta el evaporador ver grafica 40. [99]

4.2.4. Instalación del evaporador.

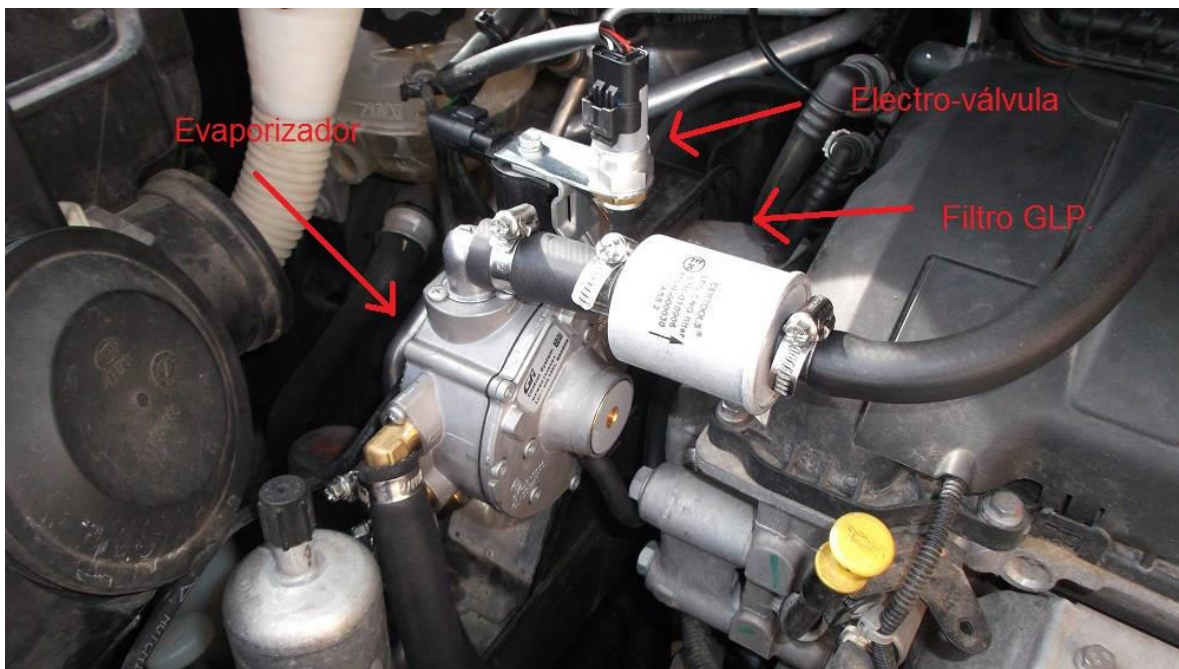
Para la instalación del evaporador se debe fijar una platina en la cual se fijara posteriormente el evaporador. Esta platina se acoplara la estructura que contiene al motor de tal forma que se ubique: a la mayor altura posible, a una distancia prudente del sistema de escape y de la batería, que su plano frontal quede en posición vertical y paralelo al eje longitudinal del motor ver grafica 48. [99]

La instalación será correcta si se toman las siguientes indicaciones:

- Ubicarlo en una posición más baja respecto al nivel del agua del radiador.

- El tapón de purga del aceite no debe estar situado sobre la bobina de encendido,
- Con el fin de evitar que entre impurezas en el reducto, limpiar la tubería de GLP, antes de conectarla.
- Comprobar que no haya fugas de gas en las uniones entre elementos.
- Controlar el funcionamiento del termostato verificando que el reductor se caliente.
- Cada vez que se vacíe el circuito de refrigerante del motor habrá que reponer el nivel del líquido y purgar todo el sistema.

Grafica 48. Instalación evaporador, filtro de GLP y electro-válvula.



[91] y elaboración propia.

4.2.5. Instalación del circuito de baja presión.

Los elementos que componen este circuito son:

- Mangueras de caucho, por las cuales transita el GLP en fase gaseosa.
- Regulador de caudal o válvula de máxima que tiene como funcionamiento limitar el caudal de GLP hasta lograr una adecuada mezcla aire/GLP.
- Abrazaderas o elementos de ajuste.

Este circuito va desde el evaporizador hasta el carburador, la manguera es fijada a la salida del evaporizador para luego seguir hasta el regulador de caudal máximo y de ahí finalmente al mezclador. Para el correcto funcionamiento de este sistema,

se debe verificar que ninguno de sus elementos entre en contacto con la partes del motor, con el fin de evitar el desgaste por fricción entre elementos ver grafica 42. [100]

4.2.6. Instalación del circuito de calefacción.

Los elementos que constituyen este circuito son:

- Mangueras de caucho, utilizadas para la circulación del refrigerante caliente proveniente del sistema de refrigeración de motor.
- “T” de material sintético, para adaptar el circuito de calefactor de GLP con el sistema de refrigeración del motor.
- Abrazaderas o elementos de fijación.

El circuito va desde el evaporador hasta el sistema de refrigeración del motor. En el evaporador se encuentran dos entradas específicas para este circuito, en donde se conectan las mangueras, que luego se adaptan al sistema de refrigeración del motor utilizando unas “T” de material sintético ver grafica 41. [100]

4.2.7. Instalación del mezclador.

El mezclador es el encargado de suministrar al motor la cantidad de combustible, directamente proporcional al aire aspirado por el mismo (mezcla aire/combustible).

La realización e instalación del mezclador va ligada directamente a el tipo de motor al cual se adaptara. [100]

4.2.8. Instalación del conmutador.

Para este proceso se debe seguir los siguientes pasos: [100]

- Ubicar el lugar en donde se fijara el conmutador ver figura 49.
- Realizar correctamente las conexiones eléctricas dentro del motor. Para esto se deben acatar las instrucciones que vienen en el manual del distribuidor.

Para la instalación eléctrica del conmutador se realizan los siguientes pasos:

- Eliminar los terminales de color amarillo, blanco y verde del conmutador, debido a que este debe ser automático.
- Conectar el cable azul del conmutador al switch del motor.
- Colocar un fusible en el terminal de color rojo para casos de cortocircuitos. Este de ser de 5 a 10 Amperios.
- Conectar el cable de color rojo a la corriente (cable que va del conmutador a la bobina).

- Conectar el cable de color café al cable que va a la primera bujía, ya que esta tiene la función de leer la señal negativa de la bobina.

Nota: los colores de los cables pueden variar según el fabricante, el modelo o tipo de conmutador, por lo cual se debe seguir las instrucciones del fabricante al momento de la instalación.

Grafica 49. Instalación llave conmutadora.



[91] y elaboración propia.

4.3. INSTRUMENTACIÓN PARA MONTAJE DEL BANCO Y OPTENCION DE DATOS.

La correcta conversión de un motor a un sistema de combustible gaseoso no sólo se reduce a la calidad de los equipos a ser instalados y su respectiva calibración, también influye la calidad de herramientas, equipos, materiales y accesorios usados. De igual manera suceda con el proceso de obtención de datos experimentales, para lo cual se describen a continuación las herramientas y equipos necesarios para ambos fines:

4.3.1. Herramientas y equipos de diagnóstico para la preconversión.

Herramientas de uso especializado:

- Herramientas de comprobación eléctrica (tester).
- Multímetro digital auto-rango (uso automotriz).
- Comprobador de baterías / consumo del arranque.
- Lámpara de tiempo estroboscópica.
- Probador de inyector de combustible.

Herramientas mecánicas de medida:

- Calibradores de espesores.
- Calibradores de roscas.
- Calibradores de tipo pie de rey.
- Micrómetros.
- Comparador de caratula.
- Medidor del momento de torsión.

Herramientas neumáticas:

- Manómetro para compresión.
- Comprobador de estanqueidad de cilindros del motor.
- Vacuómetros.
- Bomba manual de presión y de depresión.
- Herramientas neumáticas de trabajo rápido.

Herramientas hidráulicas:

- Manómetros de presión.
- Caudalímetro.

Equipos de análisis y diagnóstico.

- Osciloscopio tipo automotriz.
- Escáner / diagnosticador para sistemas computarizados.
- Analizador de gases de escape.

4.3.2. Equipamiento para realización de la conversión.

- Equipo de ensayo neumático de mínimo 200 bar de gases inertes.
- Manómetro calibrado con rango de 0 a 5.000 PSI (0 a 350 bar).
- Manómetro calibrado con rango de 0 a 30 PSI (0 a 2 bar).
- Manómetros patrones o equipos patrones para controlar los manómetros anteriores.
- Extintores tipo ABC a razón de 100grs por metro cuadrado de área.
- Torquímetro con rango mínimo 0 a 25 Kg.
- Un juego completo de llaves combinadas milimétricas y en pulgadas.
- Un juego completo de llaves tipo "dado" milimétricas y en pulgadas.
- Un juego completo de llaves tipo "Allen" milimétricas y en pulgadas.

- Pinzas, alicates, destornilladores y martillos.
- Un juego completo de llaves para conexiones de tuberías.
- Calibrador de roscas.
- Un taladro de hasta 13 mm de diámetro con juegos de brocas y sierras de copa.
- Una amoladora de banco y una portátil.
- Una lámpara estroboscópica de puesta a punto.
- Un tacómetro portátil.
- Un vacuómetro portátil.
- Un compresometro con juego de adaptadores.
- Herramientas de uso específico en mecánica automotriz, tales como llaves para bujías, llaves de anillos abiertos para tuercas de tubos, sondas de láminas y de alambre, etc.
- Un soporte de sujeción de cilindros para la colocación de válvulas de cilindro con adaptadores para ajuste de las mismas.
- Un gato o equipo hidráulico con capacidad suficiente para elevar un auto.
- Equipos de diagnóstico electrónico, mínimo un multímetro digital y un osciloscopio.
- Un cautil de soldadura de estaño.
- Analizador de gases homologado en el país, debe ser capaz de medir CO, HC, CO₂ Y O₂. Además, debe contar con tacómetro y sonda para medir temperatura del aceite, así como una impresora para el registro de los valores.
- Un detector portátil de fugas de gas, capaz de detectar metano, propano, etano, butano, gasolina, etc.
- Un equipo de soldadura eléctrica.
- Un compresor neumático de potencia no menor a 2 hp.
- Un equipo de pintura automotriz.

4.3.3.

- Flujómetro.
- Analizador de gases.
- Termohigrómetro para determinar las propiedades del aire.
- Una termocupla tipo k para la determinar la temperatura de los gases de combustión.
- Un analizador de redes para el seguimiento de la calidad de la señal eléctrica.
- Un osciloscopio.

CONCLUSIONES.

- El panorama internacional del GLP es favorable para Colombia, puesto que la oferta mundial estimada hasta el 2020 tiende a crecer a un ritmo del 2.3% anual, en donde Norteamérica seguirá puntuando como una de las regiones con mayor producción e importación hacia el resto del mundo, con más de 7 millones de toneladas. Además, La oferta nacional se ha incrementado gradualmente en el país, se proyecta una producción para el 2016 de: 28.000 BLS/día, 10,2 millones de BLS/año lo que equivale a 864 mil toneladas por año gracias a las reservas de Piedemonte. Y para el año consiguiente se estima que la producción alcanzara los 42.000 BLS/día, unos 15,33 millones de BLS/año lo que equivale a 1,3 millones de toneladas. lo que ratifica la confiabilidad de suministro de GLP en el país. [37, 38] Con lo anterior se espera la potenciación del GLP en los sectores petroquímico y como combustible automotor.
- El GLP es un producto subvalorado en Colombia que no cuenta con el respaldo nacional ni políticas energéticas para la masificación y diversificación de su uso en aplicaciones como: transporte, procesos industriales, calefacción, combustible para motores, agricultura, generación de energía y usos domésticos y comerciales. Además, se necesita políticas y reglamentos técnicas basadas en estándares internacionales para abrir el sector como combustible automotor (Autogás) y combustible para embarcaciones marítimas (Nautigas).
- En las investigaciones realizadas por la Universidad Nacional De Colombia [72, 74]: para el motogenerador Cummins (ISBe 220 31) diésel operado con diésel-GLP, con un alto porcentaje de propano (97,1%) y un mínimo de butano (1,3%) y sometido a porcentajes de carga del 25%, 50% y 100% y a velocidades de 1500 rpm y 2500 rpm, se observó que la eficiencia térmica disminuye al aumentar la concentración de GLP, pero al reducir la cantidad de propano (66,65%) y aumentar el butano (14,87%) en el motogenerador Cummins DFEH, se evidencio como la eficiencia al ser operado en modo dual (diésel-GLP) se aproxima a los valores máximos en modo diésel. De lo cual podemos concluir que la eficiencia de GLP en los anteriores motores está directamente relacionado al tipo de concentración de butano y propano que se use en la prueba y que a mayor concentración de butano en el GLP mejor será la eficiencia térmica.

RECOMENDACIONES.

Para la buena realización de la etapa experimental en un sistema motogenerador de alimentación gasolina-GLP, se deben de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Asegurar que el motor este en buen estado antes de realizar la conversión. Esto incluye la correcta operación del sistema de refrigeración, la calidad de chispa, buena compresión en los cilindros, conductos de lubricación limpios y en buenas condiciones.
- Se debe respetar el mantenimiento preventivo del motor, incluyendo el sistema de alimentación por GLP, ya que estos alteran el buen funcionamiento de los equipos y por ende el rendimiento del motor.
- La instalación de GLP se debe realizar por personal calificado y según las instrucciones del proveedor o fabricante del kit de conversión.
- El abastecimiento y manipulación del GLP debe realizarse en lugares bien ventilados y debe evitarse la implementación de elementos que puedan crear cargas electroestáticas.
- Realizar la correcta calibración de la mezcla aire/combustible, mediante el uso de un analizador de gases.
- Con los análisis obtenidos, se recomienda el combustible GLP para que se introduzca en pruebas experimentales en motogeneradores y en vehículos de transporte público y privado.

REFERENCIAS.

- [1]. World Energy Council, Conseil Mondial De D'Énergie «recursos energéticos globales» Septiembre de 2016. Artículo, [En línea]. Available: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/Traduccion-Estudio-Recursos-Energeticos1.pdf>
- [2]. Agencia Internacional de la Energía (AIE) «World Energy Statistics and Balances 2010».
- [3]. José María Marín Quemada y Enrique San Martín González. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Departamento de economía aplicada, «El futuro de los combustibles fósiles».
- [4]. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), ISBN 978-958-97855-7-7 «Plan energético nacional 2006-2025 Contexto y Estrategias». Diciembre 2006.
- [5,6]. República de Colombia ministerio de minas y energía, unidad de planeación minero energética «Cadena del petróleo 2013». Diciembre 2013.
- [7]. Statistical review of world energy Septiembre de 2016. Artículo, [En línea]. Available: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/primary-energy.html>
- [8]. Comisión de regulación de energía y gas Colombia. Septiembre de 2016. Artículo, [En línea]. Available: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/gas-natural/historia-gas>
- [9]. Revista de la industria energética Colombiana, ISSN 2322-794X «Colombia energía» Edición N° 14.
- [10]. República de Colombia ministerio de minas y energía, unidad de planeación minero energética «Cadena del gas natural en Colombia» ISBM 958-97885-9-1.
- [11]. República de Colombia ministerio de minas y energía, unidad de planeación minero energética «Balance de gas natural en Colombia 2015-2023» Febrero de 2015.

- [12]. UPME y República de Colombia ministerio de minas y energía, «Proyecciones de Demanda de GAS Natural 2015-2029» Revisión diciembre 2015.
- [13]. UPME y República de Colombia ministerio de minas y energía, «Balance de Gas Natural en Colombia 2015-2023» Febrero de 2015.
- [14]. UPME y República de Colombia ministerio de minas y energía, «Plan Transitorio De Abastecimiento de Gas Natural» Versión junio 2016.
- [15]. Gas licuado del petróleo agosto 2016 [En línea]. Available: <https://www.minminas.gov.co/gas-licuado-de-petroleo-glp-1>
- [16]. Gas licuado de petróleo Agosto 2016 [En línea]. Available: <http://www.minetur.gob.es/energia/glp/Paginas/Index.aspx>
- [17]. Propiedades del GLP, artículo, [En línea]. Available: http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/glp_butano_y_propano/paises/peru/repsolgas/propiedades_del_glp/
- [18]. Instituto Argentino de la energía “General MOSCONI”. «Informe sobre la situación actual del gas licuado del petróleo». Noviembre 2002.
- [19]. World LP Gas Association, artículo, [EN línea]. Available: <http://www.wlpga.org/about-lpg/>
- [20]. World LP Gas Association, « World LP gas association Annual report 2012» octubre 2016. artículo, [EN línea]. Available: <http://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/09/wlpga-annual-report-2012-final.pdf>
- [21]. Quandl, «Total production by country» octubre 2016, artículo, [EN línea]. Available: <https://www.quandl.com/collections/energy/liquefied-petroleum-gas-total-production-by-country>
- [22]. United Nations «UNdata» octubre 2016. [EN línea]. Available: <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aLP>
- [23]. Repsol- YPF. Francisco Jiménez, director de seguridad y medio Ambiente «la seguridad en la distribución y manipulación del G.L.P.» artículo, [EN línea]. Available: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd46/LSI_Cap15.pdf.
- [24]. Textos científicos, «Almacenamiento y transporte de Gas Licuado de Petróleo» Octubre 12 del 2014 artículo, [EN línea]. Available: <http://www.textoscientificos.com/petroleo/gas-licuado-petroleo/almacenamiento-transporte>

- [25]. Gobierno de España. Ministerio de industria, Energía y turismo. Secretaria de estado y energía «Transporte y distribución», octubre del 2016. Artículo, [EN línea]. Available: <http://www.minetur.gob.es/energia/GLP/Transporte/Paginas/transporte.aspx>
- [26]. Gobierno Bolivariano de Venezuela. Ministerio del poder popular para la energía y petróleo. Petroleos de Venezuela S.A. (PDVSA) «Los gasoductos». Octubre del 2016. Artículo, [EN línea]. Available: http://www.pdvsa.com/PESP/Pages_pesp/aspectostecnicos/transporte/transporte_hidro3.html
- [27]. Escuela Nacinal De Nautica Manuel Belgrano. Arquitectura naval. Gilardoni. «BUQUES GASEROS» 2007. Artículo, [EN línea]. Available: <http://www.maniobradebuques.com/pdf/articulos/buquesgaseros.pdf>
- [28]. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 13.01.26:05 «Transporte de gas licuado de petróleo (GLP) a granel. Especificaciones». Febrero 2005, [EN línea]. Available: http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2016-05-10_11-30-51134372.pdf
- [29]. Alejandro Hurtado de Mendoza Martin. Escuela Técnica De Ingenieros De Minas y Energía, departamento de ingeniería química y combustibles. Proyecto fin de carrera, «Camión Cisterna de GLP». Septiembre 2013 [EN línea]. Available: http://oa.upm.es/22103/1/PFC_Alejandro_Hurtado_de_Mendoza_Martin.pdf
- [30]. Petroblogger, UNI Peru. Rafael Osorio. «Transporte de gas licuado de petróleo GLP». Marzo 2013. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/transporte-gas-licuado-petroleo-glp.html>
- [31]. Agencia de regulación y control hidrocarburífero ARCH. Ecuador «Comercialización de gas licuado de petróleo (GLP) en el Ecuador». Febrero 2014. [EN línea]. Available: <http://www.scpm.gob.ec/wp-content/uploads/2014/02/2.1-Henry-Alb%C3%A1n-ARCH-Comercializacion-de-GLP-en-el-Ecuador.pdf>
- [32]. DG DISTRIGAS S.A. «Abastecimiento de gas propano para redes de distribución de gas propano indiluido». Paraná octubre 2006.
- [33]. Compañía logística de hidrocarburos (CLH) S.A. Titán 13,28045. Madrid España. «Instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos» 2011.

- [34]. ENERGAS. Ente nacional regulador del gas. «Norma mínima para el diseño, construcción y mantenimiento para plantas de gas licuado de petróleo de bajo volumen de almacenamiento para sistemas de distribución por redes instaladas en vía pública». Norma N.A.G. 155 del 2000.
- [35]. República de Colombia, Superintendencia de servicios públicos domiciliarios «Estudio sectorial gas natural y gas licuado de petróleo» septiembre 2007.
- [36]. Word LPG Association W LPGAS, «Statiscal Review of global LP Gas» 2006.
- [37]. República de Colombia Ministerio de minas y energía. Unidad de planeación Minero Energético UPME. «Cadena del gas licuado del petróleo 2005» diciembre 2005, Bogotá Colombia.
- [38] República de Colombia Ministerio de minas y energía. Unidad de planeación Minero Energético UPME. Ángela Inés Cadena Monroy directora general. «Cadena del gas natural licuado del petróleo 2013» diciembre 2013, Bogotá Colombia.
- [39]. República de Colombia, Ministerio de minas y energía, Ecopetrol «Red de transporte» octubre 2016 [EN línea]. Available:
http://www.ecopetrol.com.co/especiales/mapa_infraestructura.htm
- [40]. República de Colombia, Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, Sistema único de información de servicios públicos SUI. «Servicio de GLP» octubre 2016 [EN línea]. Available:
<http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=7>
- [41]. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. Norma técnica colombiana NTC 3853, I.C.S. 75.180.00 «Equipo, Accesorios, manejo y transporte de G.L.P.» septiembre 28 de 1998.
- [42]. República de Colombia, Ministerio de comercio, industria y turismo MinCIT. «Reglamento técnico para cilindros y tanques estacionarios utilizados en la prestación del servicio público domiciliario de Gas Licuado del Petróleo, GLP, y sus proceso de mantenimiento» Resolución No, 180196 de febrero 21 de 2006.
- [43]. República de Colombia ministerio de minas y energía MINMINAS. «Gas licuado del petróleo, histórico». Octubre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <https://www.minminas.gov.co/historico1>

- [44]. República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. Unidad de planeación Minero Energético UPME. Ángela Inés Cadena Monroy directora general. «Cadena del gas natural licuado del petróleo 2013» diciembre 2013, Bogotá Colombia.
- [45]. República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. Unidad de planeación Minero Energético UPME. ISBM 958-97885-9-1 «Cadena del Gas Natural en Colombia» versión 2003-2005.
- [46]. República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. MINMINAS «Gas Natural Comprimido Vehicular». Octubre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <https://www.minminas.gov.co/gas-natural-comprimido-vehicular1>
- [47]. Roció Linares Zambrana. Universidad Andina Simón Bolívar, área de economía y gerencia, Tesis curso de maestría en gerencia del gas 2004-2005, «Efectos socioeconómicos de la conversión de vehículos a GNV: caso de estudio Santa Cruz» La paz Bolivia 2006.
- [48]. Andreina Jessy Rivas Torres. Universidad Simón Bolívar Decanato de Estudios de Postgrado Coordinación de Estudios en Gerencia y Economía Especialización en Gerencia del Negocio del Gas, «El proyecto Autogás en la región metropolitana de caracas, Venezuela» Caracas, abril de 2012.
- [49]. Miguel Baquero Aguas, Omar Ávila Jaime. Universidad de la Salle, Ingeniera de Diseño y Automatización Electrónica. «Automatización y diseño del sistema mezclador de combustible en vehículos con equipos de conversión en vehículos con equipos de conversión a gas natural» Bogotá D.C. 2008.
- [50]. Mauricio Herrera, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas Escuela Ingeniería de la Organización «Modelación de la difusión de la tecnología intrasectorial: el caso de las estaciones de servicio de GNV en el Valle de Aburrá». Medellín 2010.
- [51]. Milciades Cortijo Lázaro, Universidad Nacional de Ingeniería, «Evaluación de la factibilidad técnica y económica de la instalación de un gasocentro virtual de gas natural vehicular en la ciudad de Huacho». Lima, Perú 2011.
- [52]. Pablo Lloret Bassecourt, Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño «Estado de la tecnología en la cadena de valor del gas natural: aplicaciones a nuevos productos y servicios»

- [53]. Eduardo Quiroga Ramos, Universidad Tecnología Nacional U.T.N. «Una solución tecnológicamente viable para la reducción de las emisiones en vehículos de inyección electrónica secuencial, pulsados a gas natural» Argentina 2012.
- [54]. Carlos Díaz Suarez, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, «Diseño de gestión integrado mediante NTC ISO 9001:2008, NTC ISO 14001:2004 y NTC ISO OHSAS 18001:2007 para la organización tecnogas motor GNV LTAD» Bogotá D.C. 2015.
- [55]. Patricia Pérez Palomino, Pontificia Universidad Católica Del Perú, «Propuesta de conversión del parque automotor de Lima y Callao para el uso de gas natural» Lima 2010.
- [56]. José Herrera Vera-Tudela, Pontificia Universidad Católica Del Perú, «Especificaciones técnicas de un talles de conversión de vehículos a GNV y GLP» Lima noviembre 2009.
- [57]. Hermogenes Diaz Grattelly, Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de Ingeniería Mecánica «Proyecto de instalación de una planta de gas licuado de petróleo en la ciudad de Tingo Maria» Lima 2009.
- [58]. Geovanny Rocca Martinez, Universidad de oriente núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Ingeniería Química, Cursos especiales de grado, «Diseño de una red de distribución de gas natural para uso doméstico en el sector las Cocuizas del municipio Maturín del Estado Monagas» Barcelona agosto 2011.
- [59]. Alejandro Guevara Granja, Juan Vinuesa Játiva. Universidad Escuela Politécnica del Ejército, facultad de Ingeniería Mecánica. «Diseño mecánico de una planta de alimentación de gas licuado de petróleo de 1600 toneladas métricas de capacidad» Sangolquí junio 2005.
- [60]. ING maría Fernanda López Lozano, Universidad de Cuenca, facultad de ciencias químicas, maestría en planificación y gestión energéticas. «Explotación del gas natural en el sector fabril del parque industrial de Cuenca» Cuenca Ecuador 2014.
- [61]. Jesús Camarillo Montero. Universidad de Veracruzana, facultad de ingeniería mecánica eléctrica, maestría en ingeniería energética. «Estudio de la combustión de ignición alimentado con mezclas gasolina-etanol anhidro e hidratado a distintas concentraciones» Xalapa Equez agosto 2011.

- [62]. ING. Luis Pesantes Monserrate, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Centro de Educación Continua, Diplomado en formulación y gestión de proyectos. «Optimización de la comercialización y distribución gas licuado de petróleo (GLP) para uso doméstico en el sector urbano marginal de los Guasmos en garrafas de 10 kilos» Guayaquil Ecuador 2006.
- [63]. Carlos Acevedo Álvarez, Universidad de Antioquia, facultad de ingeniería mecánica, departamento de mecánica. «Estudio sobre la influencia de la composición química de los principales gases naturales colombianos sobre el rendimiento de la conversión y el desempeño mecánico de los motores a gas en Colombia» Medellín Colombia julio 2003.
- [64] Organismo Superior de la Investigación en Energía y Minería. Osinergmin «propiedades aproximadas del GLP». Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/pages/GFH/1430.htm>
- [65] Matos silva, Pablo José. Tesis Digitales. UNMSM, «Detección de adulteraciones de combustibles de uso en el parque automotor peruano». Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/matos_sp/Concep.pdf
- [66] Guillermo Lira Cacho, Juan C. Condori. Biblioteca central UNI Perú «Un sistema de alimentación dual GLP/gasolina de bajo costo para motores automotrices de pequeña cilindrada» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: http://www.bibliotecacentral.uni.edu.pe/pdfs/TECNIA/2,2005/art_0010.pdf
- [67] Juan Lacoste, Santiago Colicigno, Ezequiel Corti, Maximiliano Yablonski. Universidad nacional de la plata, proyecto de motores «Grupos electrógenos» 2011 la Plata Argentina.
- [68] Universidad Nacional De Colombia, Facultad de ingeniería. Unidad de planeación Minero Energética, UPME «Estudio de tecnologías disponibles para incrementar el uso del gas combustibles en el sector transporte, informe final tomo I» Noviembre de 2014, Bogotá Colombia.
- [69] Francisco Jiménez, Director de seguridad y medio ambiente, Calidad y medio ambiente, Repsol YPF «La seguridad en la distribución y manipulación del G.L.P.» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available:

http://www.f2i2.net/web/publicaciones/libro_seguridad_industrial/lis_cap15.pdf

- [70] Mauricio Barrera, Universidad del Azuay, facultada de ciencia y tecnología escuela de ingeniería mecánica, Trabajo previo a la obtención del título de ingeniero mecánico. «Estudio del sistema GLP como combustible alternativo de uso en vehículos automotrices» 2012 Cuenca Ecuador.
- [71] Especificadores técnicas REF: SCE-GT-500-0001/7, «Especificaciones técnicas» Emisión noviembre de 2004. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.camuzzigas.com/documentos/especificaciones-tecnicas-rev-07.pdf>
- [72] Universidad Nacional De Colombia, Facultad de ingeniería. Unidad de Minero Energética, UPME «Estudio de tecnologías disponibles para incrementar el uso del gas combustibles en el sector transporte, informe final tomo I» Noviembre de 2014, Bogotá Colombia.
- [73] Diego Yugla Lema, escuela politécnica del ejército, sede Latacunga. «Análisis comparativo de parámetros característicos y adaptación de un sistema GLP al motor Suzuki 1.6 inyección gasolina del vehículo Vitara 5P» Diciembre 2008, Latacunga Ecuador.
- [74] Carlos A. Forero, Jorge Arango, Fabio Sierra. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de ingeniería Mecánica y Mecatrónica, ISSN 1815-5944 «Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diésel-gas licuado de petróleo» diciembre 2014. La Habana – Cuba.
- [75] Edgardo Yescas Mendoza, Universidad tecnológica de la Mixteca, facultad de ingeniería electrónica. «Control de una planta generadora de energía eléctrica» Huajuapán de León, Oaxaca noviembre 2003.
- [76] Peter Buban, Marshall L. Schmitt, Electricidad y electrónica básicas, conceptos y aplicaciones – Understanding Electricity And Electronics, Mc Graw-Hill, 1982.
- [77] Jorge Gaviria, Jorge Mora, John Agudelo, universidad de Antioquia, Revista facultad de ingeniería No. 26. Pp 68-78 «Historia de los motores de combustión interna» Junio de 2002. Medellín-Colombia.
- [78] Heywood, J. B. (1988), «Internal Combustion Engine Fundamentals» Mc Graw Hill, New York.

- [79] Jaime Gómez, Escuela técnica de ingenieros aeronáuticos. «Motores alternativos» 2012-2013 Artículo [EN línea]. Available: <http://servidor-da.aero.upm.es/wip/apuntes/cuarto/motores-alternativos-i/Motores%20Alternativos%20I%20-%20Beneyto.pdf>
- [80] Dr. Ing. Mladyslaw Pawlak, Editorial de la universidad autónoma de Nuevo León «Funcionamiento de motores de combustión interna» Monterrey – Linares, N. L. México, septiembre 1984.
- [81] María Zurita Zaldumbide, Escuela Politécnica Nacional Escuela De Ingeniería, proyecto para la obtención del título de ingeniería «creación de un software didáctico para el reconocimiento de las prácticas de motores diésel y gasolina en el laboratorio de termodinámica de ingeniería mecánica» Febrero de 2007, Quito- Ecuador.
- [82] Generadores Eléctricos Bravo, S.L. «1.1. Elegir el generador adecuado I» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.gebravo.com/elegir-el-generador-electrico-adecuado--i.php>
- [83] Generadores Eléctricos Bravo, S.L. «1.0. El generador eléctrico, introducción» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.gebravo.com/que-es-un-generador-electrico.php>
- [84] Scarlet Kassandra Velazquez, Academia de física del CBTIS 162 «3.2.8. Generador de corriente alterna y corriente continua» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <https://sites.google.com/site/fisicacbtis162/services/3-2-8-generador-de-corriente-alterna-y-corriente-continua-1>
- [85] Blog ventageneradores. Net, Generadores eléctricos / Grupo electrógenos «Guía completa para comprar un generador eléctrico: tipos, potencia, cómo, dónde elegir el apropiado» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.ventageneradores.net/blog/guia-completa-para-comprar-un-generador-electrico-tipos-potencia-como-y-donde-elegir-el-apropiado/>
- [86] Inmaculada Fernández, Arsenio Robles. Universidad de Cantabria, Opne course ware, licencia creative Commons 3.0 BY-NC-SA «Centrales de generación de energía eléctrica» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-IV.pdf>
- [87] Vogels VGI, Autogas inyección «Anual técnico, componentes e instalación» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available:

- http://www.vogelsautogas.es/downloads/Manual_tecnico_de_instalacion_Vogels_autogas.pdf
- [88] Petrol Pipe Sistem, KPS «Manual de instalación GLP, versión 1.2» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: file:///C:/Users/cas91_000/Desktop/Tesis%20cas/capitulo%203/Documentos/Manual%20de%20Instalacion%20de%20GLP.pdf
- [89] Productos REGO, «Manual de servicio para el instalador de Gas-LP» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.regoproducts.com/pdfs/L-592.pdf>
- [90] José Landete, Miguel Enguidanos. Federación Empresarial Metalúrgica Valencia, Generalitat Valencia Conselleria D'industria i comers «Guia de instalación de gas» Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.femeval.es/informesymanuales/Documents/Guia%20Gas/files/guia%20gas>
- [91] Pablo Martínez, Breiner Siavicha, Julio Tenesa. Tesis previa para la obtención del título de ingeniero mecánico. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, facultad de ingenierías «Análisis y construcción de un banco funcional con sistema de alimentación dual GLP-Gasolina para el laboratorio de motores de combustión interna» 2011, Cuenca – México.
- [92] OMVL spa, Driving towards the future «Injection System Dream XXI N» manual técnico. Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. http://www.vogelsautogas.es/downloads/Manual_ES_Injection_system_Dream_XXI_N-ESP.pdf
- [93] Prestolite indiel – Automotive System, «Manual de taller motores de arranque» 2004- 2005. Noviembre 2016. Artículo [EN línea]. Available: <http://www.indiel.com.ar/images/catalogos/2010/manual%20de%20arranques.pdf>
- [94] Edwin Martínez, Escuela Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Trabajo de grado para la optar por el título de Ingeniero Mecánico «Reacondicionamiento y construcción de un banco de pruebas de los sistemas de encendido convencional y electrónico de un motor de ignición por chispa» 2009, Bucaramanga – Colombia.
- [95] Leonardo González, Ing. Byron Palacios, Universidad de San Carlos de Guatemala, facultad de ingeniería «Guía del laboratorio de motores de

- combustión interna para la escuela de ingeniería mecánica» Agosto de 2005, Guatemala.
- [96] Ing. Néstor Fonseca, Ing. José Zabala, editorial ECCI, ISBN 978-958-8330-96-9 «Guía de laboratorio inyección y sincronización» primera edición 2012.
- [97] Ing. Rommel Cortez, Universidad Latinoamericana, facultad de ingeniería «Pruebas que se efectúan a los motores de combustión interna» 16 de abril de 2013. Santa Cleta.
- [98] José Santaella, Escola Técnica Superior Enginyria ETSE, titulación en ingeniería técnica industrial especialidad electrónica industrial. «Analizador de Gases para vehículos de gasolina» Febrero de 2010.
- [99] Edison Carranza, Escuela superior Politécnica de Chimborazo, tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. «Construcción de un banco didáctico para el funcionamiento y reconocimiento de artes de un sistema de alimentación por (GLP) en un motor de explosión interna» 2012 Riobamba – Ecuador.
- [100] José Alejandro Herrera, Pontificia Universidad Católica dl Perú, facultad de ciencias de ingeniería, Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico «Especificaciones técnicas de un taller de conversión de vehículos a GNV y GLP» Noviembre del 2009, Lima – Perú.