

Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diesel con la finalidad de reducir la contaminación del aire

Ing. Fernando Chica Segovia
Ing. Fabricio Espinoza Molina
Ing. Néstor Rivera Campoverde
fchica@ups.edu.ec



1. Introducción

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales de mayor importancia en la actualidad, se presenta como el resultado del crecimiento de las ciudades y del progreso desmedido del ser humano. Lo que origina la contaminación principalmente es el resultado de las actividades industriales, vehiculares, comerciales, domésticas, agropecuarias, entre otras.

El crecimiento urbano, la concentración industrial y el aumento descontrolado del transporte son los tres factores más difíciles de resolver, sobre todo, cuando no se tiene leyes estrictas para el control de la contaminación y peor aún si no existe conciencia ciudadana.

La calidad del aire en la ciudad de Cuenca se ha deteriorado en gran medida por el notable crecimiento del parque automotor (9% de crecimiento anual), el aumento en el consumo de combustibles fósiles (9,4% de crecimiento anual), la mala calidad de los combustibles que se comercializan (altos contenidos de azufre en el diesel) en el país, y en menor grado, por la contaminación del aire ocasionada por emisiones industriales, mineras e incendios forestales.

Por ello surge la necesidad de implementar sistemas que sean capaces de mejorar la combustión en los motores endotérmicos y propender a disminuir la contaminación al aire.

Este proyecto busca mejorar la calidad del aire, mediante la aplicación del Gas licuado de petróleo (GLP) como complemento de la energía introducida en los motores endotérmicos de encendido por compresión, con el objetivo principal de reducir las emisiones contaminantes al aire que producen los motores diesel.

El proyecto está centrado específicamente en la reducción de la contaminación del aire, para lograr tal objetivo ha sido necesario desarrollar algunas actividades como, emplazar un motor diesel en un banco soporte que facilita las pruebas respectivas, también

se construyó un sistema de inyección de gas que inyecta GLP en el colector de admisión de forma dual; para poder controlar la correcta inyección del gas se instaló un computador que basado en las lecturas del número de revoluciones del motor, de la temperatura del refrigerante y de la temperatura del aire de admisión, procesa y envía a través de dos actuadores la cantidad necesaria de gas según el requerimiento del motor.

Este sistema permite modificar sus parámetros logrando variar entre otros la cantidad de gas inyectada, esto facilita enormemente que se pueda realizar un sinnúmero de ensayos buscando el equilibrio entre el buen funcionamiento del motor y la disminución de gases contaminantes. En este punto es necesario aclarar que el motor trabaja siempre mediante el ciclo diesel.

Como se explicó anteriormente, el proyecto está centrado en la reducción de la contaminación del aire, por tal motivo en este artículo se presentará la pruebas más relevantes realizadas hasta la presente fecha, ya que según la planificación del proyecto se procederá a realizar un seguimiento completo del sistema por el tiempo mínimo de un año calendario, continuando con los ensayos de funcionamiento y medición de gases contaminantes.

2. Materiales y métodos

Los materiales y métodos usados en este proyecto se describen de la siguiente manera:

2.1 Materiales

Los materiales utilizados en la ejecución del presente proyecto se detallan a continuación:

- Diesel Premium, con un máximo de 0,05% de azufre Norma INEN 1489.
- Mezcla de diesel Premium y GLP al 5,28%
- Mezcla de diesel Premium y GLP al

- 12,5%
- Mezcla de diesel Premium y GLP al 30.8%

2.2 Métodos

La metodología de medición que se usó, es la indicada en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de *Métodos y equipos de medición de emisiones desde fuentes fijas de combustión*, Numeral 4.2 y sus anexos, que expresan lo siguiente:

4.2.2.5 Ubicación de puertos de muestreo. los puertos de muestreo se colocarán a una distancia de al menos ocho diámetros de chimenea corriente abajo y dos diámetros de chimenea corriente arriba de una perturbación al flujo normal de gases de combustión. Se entiende por perturbación cualquier codo, contracción o expansión que posee la chimenea o conducto. En conductos de sección rectangular, se utilizará el mismo

criterio, salvo que la ubicación de los puertos de muestreo se definirá en base al diámetro equivalente del conducto...

Para el análisis de los gases de combustión del motor se ubicó la sonda directamente dentro del tubo de escape (de 50 mm de diámetro) a una profundidad de 300 mm en el centro del tubo.

Equipo Analizador. el equipo usado para la medición es un analizador de celdas electroquímicas según lo estipulado en el mismo texto de legislación ambiental en su numeral 4.2.2.17 al 4.2.2.20.

Las mediciones fueron realizadas con un Equipo de medición de gases de combustión TESTO 350 M/XL. El equipo tiene instalado sensores electroquímicos para detección de gases: O₂, CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂ y sensor de temperatura de gases.

El Equipo TESTO 350 XL fue ajustado y calibrado a las siguientes condiciones:

Tabla I. Datos de calibración del equipo de medición antes de realizar las pruebas (25/03/2010).

Parámetro	Unidad	Rango de detección	Exactitud
Temperatura	° C	40 - 1200	± 0,5% valor medido
O ₂	%v	0 - 25	± 0,8% valor final
CO	Ppm	0 - 10000	± 10% valor medido
NO	Ppm	0 - 3000	± 5% valor medido
NO ₂	Ppm	0 - 500	± 5% valor medido
SO ₂	Ppm	0 - 5000	± 5% valor medido
CO ₂	%v	0 - CO ₂ MAX	Calculado a partir del O ₂
Velocidad	m/s	1 - 30	Factor calib. = 0,67

Tipo de Combustible: Diesel (Líquidos Fuel oil 1).
 Presión Atmosférica dada por altura: 560 mmHg (733mbar).
 Altura: 2560m SNM.
 Factor de Compensación: 1,00.
 Diámetro de detección: 0,050metros (área = 0,0020m²).
 Programa: No. Valores = 12; Tiempo Gas = 2min; Tiempo Aire = 6min; Tiempo Limpiar = 2min. Tiempo total = 10 minutos.

Medición de gases del motor de combustión. La metodología utilizada para la medición de gases en los Motores de Combustión fue basada en la Normativa Ecuatoriana en su Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de *Motores de Combustión Interna*, en el numeral 4.3.6.

Condiciones de la medición y eventualidades

-Condiciones meteorológicas

El clima durante la medición fue con una escasa nubosidad, viento ligero y una temperatura ambiente externa promedio de 19° C.

-Condiciones del proceso

Se realizó las mediciones de concentración de gases de combustión en el tubo de escape del Motor Toyota, modelo 3L. Se realizaron mediciones con los siguientes combustibles:

- Diesel Premium.
- Mezcla diesel Premium-Glp.

Para todos los muestreos, el motor ha sido ajustado de la siguiente manera:

Primera etapa:

1. Operación a 748,8 rpm, durante 2 minutos utilizando diesel Premium.
2. Operación a 1.208 rpm, durante 2 minutos utilizando diesel Premium.
3. Operación a 2.001 rpm, durante 2 minutos utilizando diesel Premium.

Segunda etapa:

1. Operación a 745 rpm, durante 2

minutos utilizando mezcla de GLP al 5,28 % y diesel.

2. Operación a 1.207 rpm, durante 2 minutos utilizando mezcla de GLP al 12,5 % y diesel.
3. Operación a 2.000 rpm, durante 2 minutos utilizando mezcla de GLP al 30,8 %, y diesel.

Eventualidades durante la medición de gases. No se presentaron eventualidades durante los periodos de medición.

Proceso de medición de gases de escape. Se realizó las mediciones de concentración de gases de combustión en el tubo de escape del motor Diesel, marca Toyota, modelo 3L de 2.779 cm³ de cilindrada y de 62KW a 3.800 rpm., a una temperatura ambiente externa promedio de 19° C; además los muestreos han sido realizados en distintas revoluciones y con distintos porcentajes de GLP para obtener varios parámetros para el análisis.

3. Resultados

Los resultados de la medición de gases de escape en la primera etapa se detallan a continuación:

Para el caso del diesel Premium como único combustible se realizaron tres muestreos con las características antes mencionadas.

A continuación se presenta un promedio de las tres mediciones correspondientes a la primera etapa, en la siguiente tabla:

Tabla 2. Datos promedio (3 situaciones correspondientes a la primera etapa) obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión con el combustible Diesel Premium (25/03/2010).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm ³ Corregido al 15% de O ₂ **
Porcentaje de Oxígeno (%O ₂)	17,37	20,49	---
Porcentaje de Dióxido de Carbono (%CO ₂) *	2,63	---	---
Concentración de Monóxido de Carbono (ppm CO)	271,86	319,67	568,56
Concentración de Oxido Nítrico (ppm NO)	222,31	255,00	--
Concentración de Dióxido de Nitrógeno (ppm NO ₂)	51,30	64,87	---
Concentración de Óxidos de Nitrógeno (ppm NOx)	273,64	319,33	940,18
Concentración de Dióxido de Azufre (ppm SO ₂)	4,61	8,33	22,26
Temp. Gases (° C)	63,66	---	---

* Obtenido por la fórmula del CO₂ máximo: $\%CO = (CO_{2m\acute{a}x} * (21\% - \%O_2)) / (21\%)$.

**Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: Motores de Combustión Interna.

La Tabla 3 presenta las concentraciones de la medición y su comparación con el límite promedio de los gases que se han obtenido normativo vigente:

Tabla 3. Comparación de los valores promedio de Concentración de gases de la prueba con Diesel Premium frente a Normativa ambiental Vigente. (25/03/2010).

GAS	Promedio (Mg/Nm ³)	Límite según normativa ¹ (Mg/Nm ³)
Monóxido de Carbono (CO)	568,56	n/a
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	940,18	2.000
Dióxido de Azufre (SO ₂)	22,26	1.500

¹ Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación.

Carga contaminante

La carga contaminante se obtiene por cálculo con la velocidad de gases de chimenea

y el área de la misma, así pues las velocidades medidas en el interior del tubo de escape fueron las siguientes:

Tabla 4. Velocidades de los gases en tubo de escape promedio Diesel Premium (25/03/2010).

Velocidad (m/s)
3,25
3,2
3,57

Por cálculo, se obtuvieron las siguientes cantidades de contaminantes gaseosos que son emitidos por hora desde el escape:

Tabla 5. Carga contaminante emitidas al ambiente por el escape promedio Diesel Premium (25/03/2010).

	Monóxido de Carbono (CO)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	Dióxido de Azufre (SO ₂)
CARGA EMITIDA POR HORA	6,5 gramos/hora	10,8 gramos/hora	0,3 gramos/hora

A continuación se presenta un promedio de las tres mediciones correspondientes a la segunda etapa, en la siguiente tabla:

Para estas pruebas se utilizó mezclas de diesel Premium y GLP en distintos porcentajes,

similar al proceso anterior se realizaron tres muestreos de 2 minutos cada uno, el primero con el motor encendido a 745 rpm; el segundo muestreo con el motor acelerado a 1207 rpm; y, el tercero con el motor acelerado a 2000 rpm.

Tabla 6. Datos obtenidos en el muestreo de Gases de Combustión promedio con “Mezcla de combustible diesel Premium y GLP (25/03/2010).

	Promedios	Máximos	Emisión mg/Nm ³ corregido al 15% de O ₂ **
Porcentaje de Oxígeno (%O ₂)	18,09	19,33	---
Porcentaje de Dióxido de Carbono (%CO ₂) *	2,11	---	---
Concentración de Monóxido de Carbono (ppm CO)	1.418,47	1.620,00	3.725,07
Concentración de Óxido Nítrico (ppm NO)	26,17	51,00	---
Concentración de Dióxido de Nitrógeno (ppm NO ₂)	85,06	99,80	---
Concentración de Óxidos de Nitrógeno (ppm NO _x)	111,31	130,67	480,21
Concentración de Dióxido de Azufre (ppm SO ₂)	2,81	4,67	16,65
Temp. Gases (° C)	89,66	---	---

* Obtenido por la fórmula del CO₂ máximo: %CO = (CO₂máx * (21% - %O₂)) / (21%).

** Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la Legislación Ambiental Libro VI, Anexo 3 en su numeral 4.3.6: Motores de Combustión Interna.

La Tabla 7 presenta las concentraciones promedio de los gases que se han obtenido de la medición y su comparación con el límite normativo vigente:

Tabla 7. Comparación de los valores promedio de Concentración de gases de la prueba con mezcla de combustible diesel Premium-GLP frente a Normativa ambiental Vigente. (25/03/2010).

Gas	Promedio (MG/NM ³)	Límite según normativa ² (MG/NM ³)
Monóxido de Carbono (CO)	3.725,07	n/a
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	480,21	2.000
Dióxido de Azufre (SO ₂)	16,65	1.500

1 Los valores han sido transformados a condiciones normales de 1013mbar de presión y 0° C de temperatura, en base seca y corregidos a 15% de oxígeno como indica la legislación.

Carga contaminante

La carga contaminante se obtiene por cálculo con la velocidad de gases de chimenea y el área de la misma, así pues las velocidades medidas en el interior del tubo de escape fueron las siguientes:

Tabla 8. Velocidades de los gases en tubo de escape promedio mezcla Diesel Premium-GLP (25/03/2010).

Velocidad (m/s)
3,17
3,3
4

Por cálculo, se obtuvieron las siguientes cantidades de contaminantes gaseosos que son emitidos por hora desde el escape:

Tabla 9. Carga contaminante emitidas al ambiente por el escape promedio mezcla Diesel Premium-GLP (25/03/2010).

	Monóxido de Carbono (CO)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	Dióxido de Azufre (SO ₂)
CARGA EMITIDA POR HORA	32,9 gramos/hora	4,2 gramos/hora	0,1 gramos/hora

4. Discusión

Las curvas de Monóxido de Carbono (CO) se mantienen de forma lineal, la diferencia con la situación anterior es que en este caso las concentraciones son mayores.

De igual manera, las curvas de Óxidos de Nitrógeno (NOx) se siguen manteniendo lineales, esta vez se observa una diferencia con respecto a las concentraciones de CO, ya que en el caso anterior con Diesel Premium como combustible, prácticamente estas concentraciones iban a la par; en este caso los NOx son menores al CO.

La generación de Dióxido de Azufre (SO₂) en su comportamiento se mantiene, pero sus concentraciones son menores al caso anterior (con Diesel Premium como combustible).

En lo referente a las cargas contaminantes emitidas se puede concluir, que cuando el motor aumenta sus revoluciones por minuto

(rpm), las emisiones de CO disminuyen, pero las de NOx aumentan. Asimismo, las emisiones de SO₂ no varían considerablemente.

A pesar de que las concentraciones promedio y máxima de todos los gases, no sobrepasan límites normativos estipulados en la legislación ambiental para motores de combustión interna, el trabajo no termina aquí pues las pruebas continuaran por el lapso de un año, realizando los respectivos ensayos de funcionamiento y medición de gases.

5. Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana por instaurar y fomentar la investigación científica buscando la solución a las necesidades actuales y futuras de la colectividad. AL igual que a todas las personas que han colaborado con la realización de este proyecto.

6. Bibliografía

- ALLEY, Roberts: *Manual del control de la calidad del aire*. Ed. McGraw-Hill, México, 2001
- ALONSO, Manuel: *Técnica del automóvil Sistema de inyección de combustible en los Motores diesel*. Ed. Thompson, Madrid, 2001
- BOSCH, Robert: *Manual de la técnica del automóvil*. Ed. Reverte, Barcelona, 1996.
- DE NERVERS, Noel: *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. Ed. McGraw-Hill. Madrid 1989
- GARZON, Guillermo: *Fundamentos de Química General*. , segunda edición, McGraw-Hill. Barcelona 2001
- JOVAJ, M.: *Motores del automóvil*. Ed. Mir. Moscow 1982
- OBERT, Edward: *Motores de combustión Interna Análisis y aplicaciones*. Ed. Continental, México 2001

Notas

- 1 Según Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de Norma de Emisiones para Motores de Combustión Interna, Numeral 4.3.6.
- 2 Según Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 3 de Norma de Emisiones para Motores de Combustión Interna, Numeral 4.3.6.