



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE
ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO**

Jose Carlos Marckwordt Aguilar

Asesorado por el Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE
ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSE CARLOS MARCKWORDT AGUILAR

ASESORADO POR EL ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE
ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 22 de julio de 2016.


Jose Carlos Marckwordt Aguilar

Guatemala, 22 de febrero de 2017

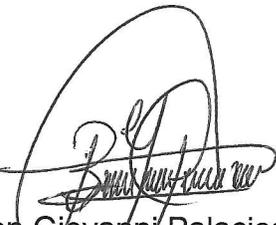
Ingeniero
Roberto Guzmán
Director de la Escuela Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado ingeniero:

Atentamente me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la asesoría del trabajo de graduación **“ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO”**. Presentado por el estudiante **JOSE CARLOS MARCKWORDT AGUILAR** con carné **2011 14740**, el cual cumplió con todos los requisitos y objetivos para los que fue expuesto.

Por lo anterior al haber efectuado el alumno todas las observaciones y recomendaciones que en su oportunidad se indicaron, como asesor del trabajo de graduación, apruebo el contenido de la misma.

Atentamente,


Byron Giovanni Palacios Colindres
Ingeniero Mecánico
Colegiado 5641
ASESOR

Ing. Byron G. Palacios C.
Colegiado No. 5641



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.093.2017

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO** desarrollado por el estudiante **Jose Carlos Marckwordt Aguilar**, CUI 2112-02355-0101, Registro Académico 201114740 recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Coordinador Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



MA Ing. Julio César Campos Paiz
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 2701

Guatemala, marzo 2017



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.136.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO**, del estudiante **Jose Carlos Marckwordt Aguilar**, CUI 2112-02355-0101, Registro Académico No. **201114740** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril de 2017

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

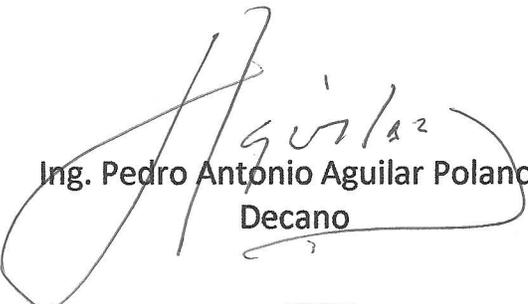


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 175.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES DE CO₂ Y RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE ENTRE LOS MOTORES DE INYECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA CICLO OTTO**, presentado por el estudiante universitario: **José Carlos Marckwordt Aguilar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Carlos E. Marckwordt y Sussan A. Aguilar, quienes con su amor y sabiduría han ayudado a formar un profesional.

Mi hermana

Ale, por su amor y apoyo en todo momento.

**Enrique Marckwordt
(q. e. p. d.)**

Mi abuelito, quien con su amor, cariño y ejemplo me inspiró a dar lo mejor de mí. Siempre estará en mi corazón.

Mimi de Marckwordt

Mi abuelita, por su amor y cariño incondicional.

Mis tíos

Pablo, Karina y Gaby Marckwordt Gonzalez, por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por proporcionarme los conocimientos necesarios para afrontar la vida.
Facultad de Ingeniería	Por fomentar la formación de buenos profesionales.
Escuela de Mecánica	Por brindar sus conocimientos y apoyo a los estudiantes.
Ing. Harry Chew	Por su apoyo y consejos para culminar mi carrera.
Ing. Byron Palacios	Por la asesoría brindada para la realización del presente trabajo.
Mi amiga	Cory Cardona, por su cariño y apoyo durante todos estos años. Y a las demás amistades que pude cosechar a lo largo de mi etapa universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1. Combustión.....	1
1.2. Relación aire-combustible.....	3
1.2.1. Mezcla estequiométrica.....	3
1.2.2. Mezcla rica.....	4
1.2.3. Mezcla pobre.....	5
1.2.1. Factor lambda.....	5
1.3. Fundamentos básicos de las máquinas reciprocantes.....	6
1.4. Fundamentos del ciclo Otto.....	8
1.5. Fundamentos del combustible gasolina.....	12
1.5.1. Características del funcionamiento deseado.....	12
1.5.2. Índice de octano.....	14
1.6. Historia de la inyección de combustible.....	16
2. INYECCIÓN DIRECTA DE GASOLINA ELECTRÓNICA.....	23
2.1. Principio de operación.....	23
2.2. Modos operativos.....	24
2.2.1. Modo estratificado.....	24

2.2.2.	Modo homogéneo-pobre	25
2.2.3.	Modo homogéneo.....	26
2.3.	Unidad de control del motor	27
2.4.	Sistema de admisión	28
2.4.1.	Aleta en el colector de admisión	28
2.4.2.	Acelerador electrónico.....	30
2.4.3.	Potenciómetro para la aleta del colector de admisión.....	30
2.4.4.	Válvula para aleta.....	29
2.4.5.	Medidor de masa de aire con sensor de temperatura	30
2.4.6.	Sensor de presión en el colector de admisión	31
2.4.7.	Sensor de presión para la amplificación de servofreno	31
2.5.	Sistema de combustible	31
2.5.1.	Sistema de combustible de alta presión	31
2.5.1.1.	<i>Rail</i> o tubo distribuidor	32
2.5.1.2.	Bomba de alta presión	32
2.5.1.2.1.	Carrera aspirante.....	33
2.5.1.2.2.	Carrera impelente	34
2.5.1.3.	Válvula de control de presión.....	34
2.5.1.4.	Sensor de presión de <i>rail</i>	35
2.5.1.5.	Válvulas de inyección de alta presión ..	36
2.5.2.	Sistema de combustible de baja presión	38
2.5.2.1.	Válvula dosificadora de combustible	38
2.5.2.2.	Restos de elementos del sistema	38
2.6.	Sistema de escape.....	39
2.6.1.	Elementos que componen el sistema de escape....	41

3.	INYECCIÓN INDIRECTA DE GASOLINA ELECTRÓNICA	43
3.1.	Principio de operación	43
3.2.	Sistema eléctrico/electrónico	44
3.2.1.	Unidad de comando	44
3.2.2.	Sonda lambda.....	44
3.2.3.	Medidor de flujo de aire.....	45
3.2.4.	Interruptor de la mariposa de aceleración	46
3.2.5.	Relé	46
3.3.	Sistema de combustible.....	47
3.3.1.	Bomba eléctrica	47
3.3.2.	Regulador de presión.....	48
3.3.3.	Filtro de combustible	49
3.3.4.	Prefiltro	50
3.3.5.	Válvula de inyección	51
3.3.6.	Depósito de combustible.....	52
4.	EL CO ₂ GAS DE EFECTO INVERNADERO	55
4.1.	Fuentes de CO ₂	57
4.1.1.	Fuentes naturales	57
4.1.2.	Fuentes antropogénicas.....	58
4.2.	Guatemala ante el cambio climático	58
4.3.	Consecuencias del calentamiento global	59
4.4.	Efectos del CO ₂ sobre la biodiversidad	59
4.5.	Efectos del CO ₂ sobre los seres humanos	61
4.6.	Estándares de emisiones.....	62
4.6.1.	Estándares de rendimiento de emisiones de vehículos.....	63
4.6.1.1.	Estándares de emisión de Estados Unidos.....	63

4.6.1.2.	Estándares de emisión de la Unión Europea	65
5.	TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5.1.	Motores a evaluar	67
5.1.1.	Motor GDI.....	67
5.1.2.	Motor MPI	68
5.2.	Descripción de la prueba realizada	68
5.3.	Recolección de datos	70
5.3.1.	Resultado de medición de consumo de combustible	72
5.3.2.	Resultados de mediciones de CO ₂	74
5.4.	Análisis y comparación de resultados	75
5.4.1.	Consumo de combustible en tránsito denso	77
5.4.2.	Consumo de combustible en tránsito fluido.....	79
5.4.3.	Consumo de combustible en carretera	81
5.4.4.	Consumo combinado.....	83
5.4.5.	Discusión de resultados.....	84
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA	91
	APÉNDICE.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Relación entre potencia, economía y relación aire-combustible	4
2.	Nomenclatura para motores recíprocos	6
3.	Ciclo ideal Otto	9
4.	Diagrama P-v del ciclo ideal Otto	9
5.	Motor para ensayo de pruebas ASTM d2699 y d2700	15
6.	Inyección directa de gasolina	23
7.	Aletas en el colector de admisión	28
8.	Efecto de la aleta sobre el aire de admisión	29
9.	<i>Rail</i> o tubo distribuidor	32
10.	Carrera aspirante de la bomba de alta presión	33
11.	Carrera impelente de la bomba de alta presión	34
12.	Válvula de control de presión	35
13.	Sensor de presión de <i>rail</i>	36
14.	Inyector de alta presión	37
15.	Diagrama del sistema de escape	40
16.	Inyección indirecta de gasolina	43
17.	Bomba eléctrica	48
18.	Regulador de presión	49
19.	Filtro de combustible	50
20.	Prefiltro	51
21.	Válvula de inyección	52
22.	Evolución de las normas para motores de ciclo Diésel	65
23.	Evolución de las normas para motores de ciclo Otto	66

24.	Ruta en ciudad	69
25.	Ruta en carretera.....	70
26.	Puerto de conexión OBD-II.....	70
27.	Herramienta de escaneo.....	71
28.	Gráfico de flujo de combustible vs. rpm	75
29.	Comparación de emisiones de CO ₂ para ambos motores.....	76
30.	Comparación de consumo de combustible en tránsito denso	78
31.	Comparación de consumo de combustible en tránsito fluido	80
32.	Comparación de consumo de combustible en carretera	82
33.	Promedio de emisión de partículas	85
34.	Filtro de partículas	86

TABLAS

I.	Especificaciones del motor GDI.....	67
II.	Especificaciones del motor MPI.....	68
III.	Bitácora de mediciones realizadas.	72
IV.	Consumo de combustible para el motor GDI	73
V.	Consumo de combustible para el motor MPI	73
VI.	Flujo de combustible en litro por hora hacia el motor.	74
VII.	Emisiones de CO ₂ producidas por el motor GDI	74
VIII.	Emisiones de CO ₂ producidas por el motor MPI	75
IX.	Cálculo de ahorro económico para condiciones de tránsito denso.....	79
X.	Cálculo de ahorro económico para condiciones de tránsito fluido.....	81
XI.	Cálculo de ahorro económico para condiciones de carretera.....	82
XII.	Cálculo de ahorro económico para un consumo combinado anual	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballo de fuerza
C_p	Calor específico a presión constante
C_v	Calor específico a volumen constante
q	Calor transferido por unidad de masa
cc	Centímetros cúbicos
Δ	Delta
SO₂	Dióxido de azufre
CO₂	Dióxido de carbono
λ	Factor lambda
°	Grados
°C	Grados Celsius
g/km	Gramo por kilómetros; emisión promedio de CO ₂
kg	Kilogramos
km/gal	Kilómetros por galón
kT	Kilotoneladas
mm	Milímetros
MPG	Millas por galón
NO_x	Óxido de nitrógeno
O₂	Oxígeno diatómico
P-v	Presión versus volumen
K	Temperatura absoluta; Kelvin
w	Trabajo
v	Volumen

GLOSARIO

Aleta	Válvula que restringe el flujo de aire.
Autoencendido	Inflamación espontánea y extraordinariamente rápida de la mezcla aire-combustible durante la fase de compresión.
Bobina	Componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y arrollado repetidamente.
Bujía	Dispositivo de un motor de combustión interna donde se produce la chispa eléctrica que inflama la mezcla explosiva comprimida.
Campo magnético	Espacio en el que existen acciones magnéticas debidas a un imán o al paso de una corriente eléctrica por un conductor.
Canister	Recipiente cilíndrico, más alto que ancho.
Carrera aspirante	Movimiento descendente del émbolo de la bomba que aumenta su volumen y la presión desciende.
Carrera impelente	Movimiento ascendente del émbolo de la bomba que aumenta la presión del cilindro.

CFC	Clorofluorocarbonos.
Destilación fraccionada	Separación sucesiva de los líquidos de una mezcla aprovechando la diferencia entre sus puntos de ebullición.
Ecosistema	Comunidad de los seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente.
EFI	Inyección electrónica de combustible.
Estratificado	El combustible se posiciona de forma concentrada en la zona de la bujía.
Gas inerte	Gas no reactivo bajo determinadas condiciones de presión y temperatura.
GEI	Gas de efecto invernadero.
Hexeno	Hidrocarburo líquido saturado que contiene seis átomos de carbono y se emplea como disolvente.
Hidrocarburo	Compuesto resultante de la combinación del carbono con el hidrógeno.
Homogéneo	El combustible se atomiza en modo uniforme en la cámara de combustión.

Inflamar	Encender algo que arde con facilidad desprendiendo llamas inmediatamente.
Isobuteno	Hidrocarburo gaseoso soluble en disolventes orgánicos.
Isoentrópico	Proceso que mantiene la entropía constante.
MOM	Número de octano del motor.
Nafta	Fracción ligera del petróleo natural.
Octano	Hidrocarburo alifático saturado de ocho átomos de carbono.
Orgánico	Sustancia que contiene carbono.
PPM	Partículas por millón.
PME	Punto medio efectivo.
PMI	Punto muerto inferior.
PMS	Punto muerto superior.
Régimen	Estado de una máquina cuando funciona de un modo regular y permanente.

RON	Número de octano de investigación.
RPM	Revoluciones por minuto.
Servofreno	Mecanismo que sirve para minimizar el esfuerzo humano.
Tolueno	Hidrocarburo líquido derivado del benceno.
Xileno	Hidrocarburo similar al tolueno.

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo comparar las emisiones de CO₂ y rendimiento de combustible entre motores de combustión interna que operan bajo el ciclo Otto (encendido por chispa) con la misma cilindrada, pero con diferentes sistemas de inyección de combustible, uno con el sistema de inyección directa (GDI) y el otro con el sistema de inyección indirecta (MPI). Se tomarán las mediciones bajo condiciones de conducción similares y más comunes en la ciudad capital de Guatemala para cada automóvil: tránsito denso, tránsito liviano y conducción en carretera.

Para la toma de datos se utilizó el sistema de OBD-II de cada vehículo. Vale la pena mencionar que el sistema OBD-II, a diferencia del OBD-I, fue creado para monitorear y reducir la emisión de gases de escape en los vehículos. La conexión se realizó con un escáner inalámbrico de red tipo wifi que se vincula con una aplicación para sistema operativo Android. Dicha aplicación recibe la información del escáner y la almacena en archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel (.csv), para que los datos puedan ser analizados posteriormente en una computadora. Con los datos obtenidos se podrá realizar una comparación de los parámetros anteriormente señalados entre los dos sistemas de inyección.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio comparativo de las emisiones de CO₂ y rendimiento de combustible entre los motores de inyección directa e indirecta ciclo Otto.

Específicos

1. Presentar resultados sobre cuál motor ofrece una mayor reducción de emisiones de CO₂ y mejora el rendimiento de combustible, para que el usuario pueda elegir la mejor opción entre ambos sistemas.
2. Recopilar información del impacto de las emisiones de CO₂ sobre el medio ambiente y el ser humano.
3. Investigar sobre el principio de operación del motor de inyección directa y establecer las mayores diferencias con el motor de inyección indirecta.
4. Determinar cómo el sistema de inyección directa o indirecta puede ayudar a mejorar las emisiones de CO₂ y el rendimiento de combustible.

INTRODUCCIÓN

Desde 1876, el año en que Nikolaus A. Otto construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Beau de Rochas y del que Karl Benz, en 1885, patentara el primer vehículo que portaba este motor, los componentes principales del motor de combustión interna (mecanismo biela-manivela) permanecieron intactos, hasta hoy en día. Los principales avances han sido en los subsistemas que lo rodean y que son los encargados de hacerlo funcionar, esto con el propósito de mejorar la química de la combustión, aumentar potencia y el par motor. Las últimas décadas y la llegada del siglo veintiuno han propiciado el aumento de la electrónica en los componentes que rodean al motor, permitiendo así un mayor control en el proceso de combustión.

Los componentes electrónicos han sustituido a los componentes mecánicos encargados de la dosificación del combustible en la cámara de combustión, permitiendo que las nuevas generaciones de vehículos automotrices que salen al mercado se ajusten a los estándares de emisiones de cada país, que cada vez son más estrictos. La creciente preocupación en las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de los precios del petróleo que inició en el 2004, que explotaron con la crisis económica mundial del 2008, han propiciado la investigación de nuevas tecnologías que permiten principalmente aumentar el rendimiento del combustible y reducir la emisión de gases con efecto colateral al planeta Tierra.

Una de estas tecnologías que ha cobrado importancia es la inyección directa de gasolina o GDI, como se le conoce también. Esta tecnología se

plantea como un método de inyección para sustituir a la inyección indirecta convencional de la actualidad. Este es un método de inyección que no es nuevo. De hecho, las fábricas alemanas Gutbrod, con su modelo Superior, y Goliath, con el GP700E, en 1952 introdujeron esta tecnología en vehículos automotrices de dos tiempos, desarrollada por la empresa Bosch para la rama de la aviación y que luego sería introducida en el mítico modelo 300 SL “Alas de Gaviota” de Mercedes Benz, en 1954.

El presente documento es un estudio comparativo de emisiones de CO₂ y rendimiento de combustible entre el sistema de inyección multipunto convencional (MPI), en el cual la mezcla de aire-combustible es realizada antes de la válvula de admisión de la cámara de combustión, y el sistema de inyección directa (GDI), que realiza la dosificación de combustible en el interior de la cámara de combustión.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Combustión

La combustión es una reacción química en la cual se oxida un combustible liberándose una gran cantidad de energía en forma de luz y calor, que se manifiesta visualmente como fuego. En toda combustión existe un elemento que arde, y que se conoce como combustible (en el presente estudio el combustible será la gasolina), y otro que se oxida produciendo la combustión, y se le conoce como comburente. Generalmente el aire es el más empleado en los procesos de combustión, sin embargo, existen procesos especializados donde se emplea el oxígeno puro (O_2).

El aire está compuesto por nitrógeno en un 78 %. Durante el proceso de combustión, el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos. Solamente forma una pequeña cantidad de óxidos nítricos. Sin embargo, el nitrógeno puede influir considerablemente en el proceso de combustión, pues al entrar en grandes cantidades a la cámara de combustión a baja temperatura y saliendo a alta temperatura, absorbe una gran cantidad de energía química que es liberada durante la combustión.

Otro elemento que está presente en el aire y que debe ser considerado es la humedad (vapor de agua). Este puede tratarse como un gas inerte (como en el caso del nitrógeno), pero cuando los gases de combustión se enfrían por debajo de la temperatura de punto de rocío, las gotas de agua pueden combinarse con dióxido de azufre (SO_2), que se encuentra presente en los gases de combustión y se forma ácido sulfúrico. Un elemento extremadamente

corrosivo que ataca directamente a los componentes de los motores y provocan la falla prematura de los mismos.

Para iniciar la combustión no basta solo con poner en contacto el oxígeno y el combustible. Para que esto sea posible es necesario llevar el combustible a su temperatura de ignición. Para la gasolina la temperatura mínima es de 260°C, teniendo además que las proporciones de estos elementos deben estar en niveles adecuados. Esto se amplía más en la siguiente sección.

Los combustibles más comunes son a base de materias orgánicas que contienen carbono e hidrógeno; son conocidos como hidrocarburos. En una reacción completa todos los elementos que forman el combustible se oxidan completamente. Por lo tanto, los productos que se forman son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua, el dióxido de azufre (SO_2), presente en la gasolina que contiene azufre, y también pueden aparecer óxidos de nitrógeno (NO_x), dependiendo de la temperatura, la cantidad de oxígeno en la reacción y, sobre todo, de la presión.

Al contrario, en la combustión incompleta, los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada, dando como resultado compuestos como el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro y altamente tóxico que, al ser respirado en altos niveles, puede provocar la muerte.

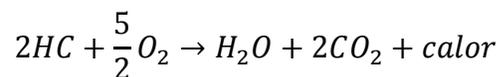
1.2. Relación aire-combustible

Esta se define como la relación entre la masa de aire y la masa de combustible en el proceso de combustión.

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

1.2.1. Mezcla estequiométrica

Como se hizo mención en la sección 1.1, para llevar a cabo una combustión completa es necesario que el combustible y el comburente se encuentren correctamente mezclados en una proporción determinada. A esta relación se le conoce como mezcla estequiométrica. La cantidad de aire necesaria para la combustión completa en un motor a gasolina se determina de la siguiente ecuación balanceada, donde HC representa la fórmula molecular general de un hidrocarburo:



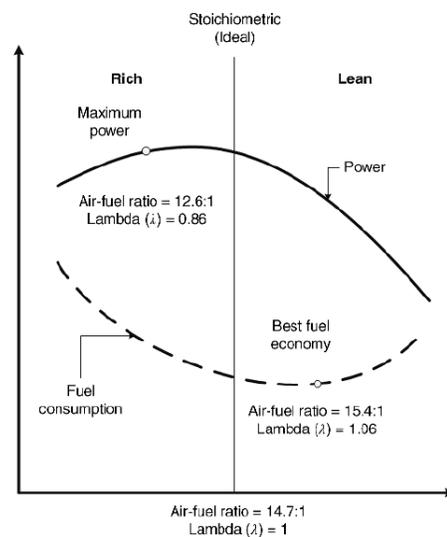
Entonces, teniendo en cuenta que los pesos atómicos del C=12, O=16, H=1, y que el aire se encuentra compuesto principalmente por 21 % de oxígeno, 78 % de nitrógeno y 0,000055 % de hidrógeno, se calcula:

$$1kg HC \times \frac{1 kmol HC}{13 kg HC} \times \frac{5/2 kmol O_2}{2 kmol HC} \times \frac{32 kg O_2}{11 kmol O_2} = \frac{40}{13} kg O_2$$

$$\frac{40}{13} kg O_2 \times \frac{100 kg aire}{21 kg O_2} = 14.7 kg aire$$

Por lo tanto, 1 kg de gasolina y 14,7 kg de aire permiten obtener al motor la máxima potencia y economía del combustible.

Figura 1. **Relación entre potencia, economía y relación aire-combustible**



Fuente: *Potencia, economía y relación aire-combustible*.

<https://www.researchgate.net/figure/260878177>. Consulta: mayo de 2016.

1.2.2. Mezcla rica

Se produce por el exceso de combustible en la mezcla con respecto al aire que ingresa a la cámara de combustión. El combustible excedente no se mezcla con el aire. En la figura 1 se observa que se obtiene la máxima potencia cuando todo el aire se quema en la forma de una relación aire-combustible rica, pero se contamina más el medio ambiente produciendo monóxido de carbono (CO) y hollín. Además, aumenta el consumo de combustible.

1.2.3. Mezcla pobre

Se produce por el exceso de aire en la mezcla con respecto al combustible. En la figura 1 se observa que se obtiene la máxima economía cuando se emplea una mezcla pobre y además se obtiene una menor emisión de contaminantes. Sin embargo, se reduce la potencia, aumenta la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) y aumenta la tendencia al calentamiento del motor.

1.2.4. Factor lambda

Está designado con la letra griega “λ”, representa la relación entre la proporción de aire-combustible que entra al cilindro de un motor de ciclo Otto y la proporción estequiométrica de la mezcla ideal:

$$\lambda = \frac{\textit{masa de aire}_{\textit{aspirada}}}{\textit{masa de aire}_{\textit{estequiométrica}}}$$

- Para mezcla estequiométrica:

Lambda=1

$$\lambda = \frac{14.7}{14.7} = 1$$

- Para mezcla rica:

Lambda<1

Por ejemplo, el caso donde la cantidad de gasolina es 1 kg y la cantidad de aire es 9 kg.

$$\lambda = \frac{9}{14.7} = 0.61$$

- Para mezcla pobre:

$\lambda > 1$

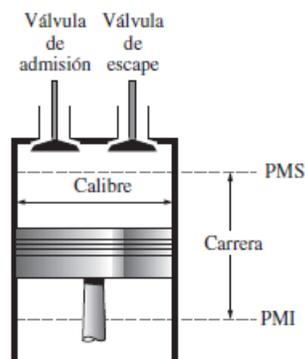
Por ejemplo, el caso donde la cantidad de gasolina es 1 kg y la cantidad de aire es 17 kg.

$$\lambda = \frac{17}{14.7} = 1.16$$

1.3. Fundamentos básicos de las máquinas reciprocantes

La máquina reciprocante es básicamente un dispositivo de cilindro-émbolo (pistón). Es la fuente de poder de la mayoría de transportes que se utilizan en la actualidad. Los elementos básicos se muestran en la siguiente figura:

Figura 2. **Nomenclatura para motores reciprocantes**



Fuente: CENGEL, Yunes. *Termodinámica*. p. 297.

El pistón en el cilindro se alterna entre dos posiciones fijas llamadas punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI). La distancia entre el PMS y el PMI recibe el nombre de carrera del motor. El diámetro del pistón se llama calibre. El aire o la mezcla de aire combustible se introduce por la válvula de admisión y los productos de combustión se desechan por la válvula de escape. Estas medidas son utilizadas para hallar el volumen desplazado por el pistón. El volumen mínimo formado en el cilindro cuando el émbolo está en el PMS se denomina volumen de espacio libre, y el volumen desplazado por el émbolo cuando se mueve entre el PMS y el PMI se llama volumen de desplazamiento. La relación de compresión se obtiene dividiendo entre el máximo volumen formado en el cilindro y el volumen mínimo, dando así el nivel de compresión al que se somete la mezcla en el interior del cilindro:

$$r = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}}$$

Antes del año de 1955, la mayor parte de los motores eran fabricados de carrera grande y de diámetros pequeños, sin embargo, actualmente también se fabrican de carrera más corta, especialmente en los vehículos con motores de alto rendimiento, como los súperdeportivos, llamándoles motores sobre-cuadrados. El motivo de esto es que se reducen las pérdidas por fricción y la inercia, beneficiando los componentes que deben soportar la fuerza centrífuga como los cojinetes. Además, una carrera corta permite que el motor gire a mayores regímenes y hace posible un tamaño de motor más reducido, beneficiando a las prestaciones de dichos vehículos. Sin embargo, esto repercute en el consumo de combustible y en las emisiones de gases, debido a que una cámara de combustión más grande conlleva mayores pérdidas de calor.

La presión media efectiva (PME) es un parámetro de utilidad en el análisis de los dispositivos alternativos. Está definida como la presión media que actuaría sobre el pistón durante la carrera de potencia. El trabajo neto obtenido viene dado por:

$$W_{ciclo} = (PME)(\text{area del pistón})(\text{carrera}) = (PME)(\text{cilindrada})$$

O

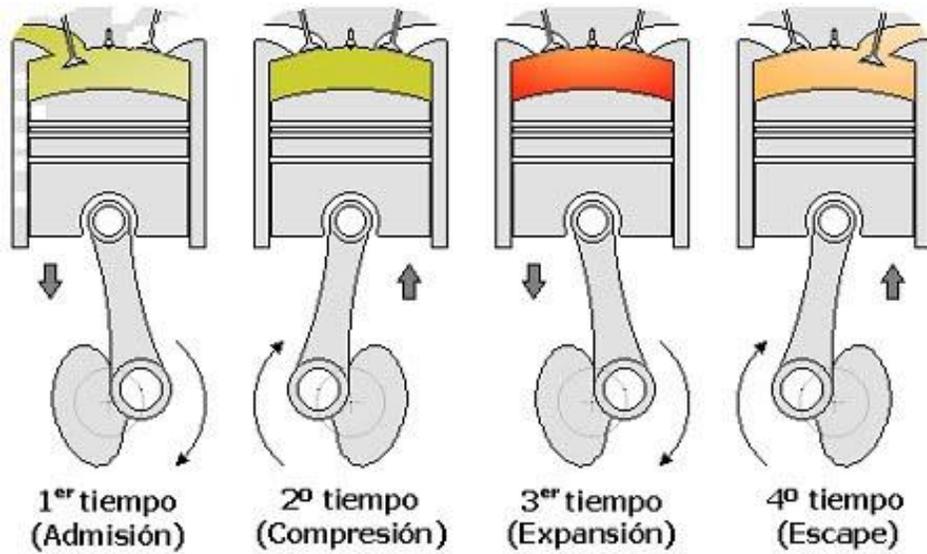
$$PME = \frac{W_{ciclo}}{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}}$$

Las máquinas reciprocantes se clasifican como máquinas de encendido por chispa o máquinas de encendido por compresión, según se inicie el proceso de combustión en el cilindro, ciclo Diésel y ciclo Otto, respectivamente. A continuación se describe el ciclo Otto, relacionado con los motores que utilizan la gasolina como combustible para funcionar.

1.4. Fundamentos del ciclo Otto

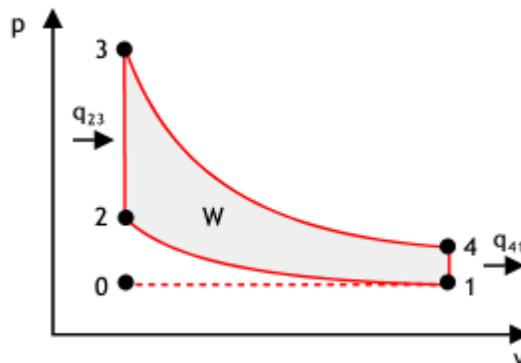
En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el pistón ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Un diagrama esquemático de cada tiempo se presenta en la figura 3 y su diagrama P-v en la figura 4.

Figura 3. **Ciclo ideal Otto**



Fuente: *Ciclo ideal Otto*. <http://josefinadtermodinamica.blogspot.com/2009/11/ciclo-otto-y-ciclo-diesel.html>. Consultado: mayo de 2016.

Figura 4. **Diagrama P-v del ciclo ideal Otto**



Fuente: *Diagrama P-v del ciclo ideal Otto*. <http://www.mspc.eng.br/termo/termo0520.shtml>. Consultado: mayo de 2016.

Para poder realizar un análisis a un nivel manejable se utilizan las siguientes aproximaciones, conocidas como suposiciones de aire estándar:

- El fluido de trabajo es aire que circula de manera continua en un circuito cerrado, comportándose como gas ideal.
- Todos los procesos del ciclo son reversibles.
- El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa.
- El proceso de escape se sustituye por un proceso de rechazo de calor.

Al principio, la válvula de admisión y válvula de escape están cerradas y el pistón se encuentra en su posición más baja (PMI). Durante la carrera de compresión, el pistón se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire y combustible. Un poco antes de que el pistón alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, provocando un aumento de la presión y la temperatura en el cilindro. Los gases de alta presión impulsan al pistón hacia abajo, el cual a su vez obliga a rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión. Al final de esta carrera, el pistón se encuentra en su posición más baja (terminando el primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos de la combustión. Después, el pistón se mueve hacia arriba una vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape), para descender por segunda vez extrayendo una mezcla fresca de aire y combustible a través de la válvula de admisión (carrera de admisión), iniciando así el proceso una vez más. En resumen, el ciclo Otto ideal se compone de los siguientes procesos reversibles:

- 1-2. Compresión adiabática
- 2-3. Suministro de calor a volumen constante

3-4. Expansión adiabática

4-1. Cesión de calor a volumen constante

Como el aire se comporta como un sistema cerrado, el principio de conservación de la energía por unidad de masa es:

$$q + w = \Delta u$$

Donde se ha despreciado los efectos de las energías cinética y potencial. En los procesos adiabáticos de compresión y de expansión, $q=0$ y $q+w=\Delta u$. En los procesos a volumen constante de suministro y cesión de calor, $W=0$ y $q=\Delta u$.

Tomando como base el ciclo de aire estándar frío se obtiene que:

$$q_{entrada} = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

Y:

$$q_{salida} = -q_{41} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

Como el trabajo de salida es $q_{entrada} - q_{salida}$, el rendimiento térmico está dado por:

$$n_t = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = \frac{c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}$$

Tomando en cuenta de que los procesos 1-2 y 3-4 son isotrópicos, y $V_2=V_3$ y $V_1=V_4$.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Sustituyendo estas ecuaciones se obtiene la eficiencia térmica del ciclo:

$$n_{ter} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Donde la relación de compresión es r

$$r = \frac{V_{PMS}}{V_{PMI}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Y donde k es la relación de calores específicos c_p/c_v

1.5. Fundamentos del combustible gasolina

La gasolina es una mezcla de productos cuyo componente principal son los hidrocarburos, acompañados en diferentes proporciones por productos oxigenados, obtenidos mediante la destilación fraccionada. A través de dichas mezclas se ajustan las propiedades del combustible para obtener características de funcionamiento deseadas.

1.5.1. Características de funcionamiento deseadas

- Octanaje: es una escala que mide la capacidad antidetonante de la gasolina cuando se comprime dentro del cilindro de un motor. En general, el mejor combustible es el que tiene un número de octano mayor, debido a que los motores con mayores índices de compresión pueden trabajar sin que se dé una combustión prematura o detonación.

Esta detonación prematura produce un golpe brusco en el pistón y provoca un picado de bielas, pistoneo o cascabeleo, como se conoce popularmente. Es importante controlar este fenómeno para que no se produzcan daños en los pistones, bielas, válvulas y anillos.

- Volatilidad
 - Características de arranque: la gasolina pondrá en movimiento al motor rápidamente. Siempre que una parte de ella tenga bajo punto de ebullición, esto permite que a través de los inyectores se forme la mezcla de combustible a la temperatura ambiente.
 - Características de vaporización: es necesario que el combustible tenga una baja presión de vapor, para evitar que gasolina en estado gaseoso llene las tuberías y el depósito de combustible, comprometiendo el buen funcionamiento de la bomba de gasolina y los inyectores.
- Depósitos gomosos y de barniz: el combustible no debe depositarse en el motor, ni goma ni barniz, formando sellos y tapones que comprometan el buen desempeño del motor y que posteriormente requiera de una limpieza exhaustiva.
- Corrosión: un buen combustible no debe causar corrosión a los componentes del motor.
- Bajo contenido de azufre: la gasolina puede tener alto contenido de azufre dependiendo de su procedencia (zonas volcánicas). El contenido de azufre afecta de dos formas diferentes. Una tiene que ver con la contaminación ambiental por la emisión de óxidos de azufre y otra directamente a las partes del motor como las válvulas, inyectores, camisas de los cilindros y cojinetes. Cuando se producen estos daños

habrá pérdida de potencia del motor, consumo excesivo de aceite, gases de escape que producen irritación a los seres humanos y será necesario la reconstrucción prematura del motor.

- Costo: el combustible debe ser barato.

1.5.2. Índice de octano

El Índice de octano indica la presión y temperatura a la que puede ser sometido un combustible mezclado con aire antes de autodetonar al alcanzar su temperatura de ignición. Por lo tanto, si un combustible no posee un índice de octano suficiente en motores con elevada relación de compresión se producirá el autoencendido de la mezcla, lo cual provoca que la combustión sea demasiado rápida y también una detonación prematura en la fase de compresión. Esto hará que el pistón sufra un golpe brusco y reducirá drásticamente el rendimiento del motor. A dicho fenómeno también se le conoce popularmente como picado de bielas, pistoneo o cascabeleo. Para determinar la calidad antidetonante de una gasolina, se efectúan pruebas en un motor, de donde se obtienen dos parámetros diferentes:

- RON. *Research Octane Number*, que significa número de octano de investigación. Representa el comportamiento en la ciudad. Es una prueba que se realiza a un motor de laboratorio que cumple con la norma ASTM d2699. Trabajando a una velocidad de 600 revoluciones por minuto (rpm) y a una temperatura de entrada de aire de 125°F (51.7°C).
- MON. *Motor Octane Number*, que significa número de octano de motor. Representa el comportamiento en carretera. Es un motor de laboratorio que cumple la norma ASTM d2700, operando a una velocidad de 900 revoluciones por minuto y con una temperatura de aire de 300°F (149°C).

Para propósitos de comercialización y distribución de gasolinas, los productores determinan el octanaje comercial, como el promedio entre RON y MON:

$$\text{Número de octano comercial} = \frac{RON + MON}{2}$$

Figura 5. **Motor para ensayo de pruebas ASTM d2699 y d2700**



Fuente: *Motor para ensayo de pruebas*. <http://www.waukeshacfr.com/f1-f2/>. Consultado: enero de 2017.

Los hidrocarburos que se encuentran presentes en la gasolina tienen un índice de octano muy inferior a los requeridos por las especificaciones comerciales. Esto hace necesario someterlos a reacciones químicas para incrementar dicha propiedad. Se descubrió que algunas sustancias en pequeñas dosis mejoraban el poder antidetonante. El más empleado fue el Tetraetilo de plomo. Sin embargo, se descubrió que este elemento poseía un impacto negativo en la salud de los seres vivos en la tierra, por lo que en la actualidad está prohibido en la mayor parte de los países. Actualmente, se incorporan compuestos oxigenados como éteres y alcoholes que poseen

números de octano superiores a 110 y contribuyen a la sostenibilidad de los recursos.

1.6. Historia de la inyección de combustible

La historia de la inyección de combustible comienza con el carburador que en los años 20 estaba presente en los motores de combustión interna de los automóviles y aviones. Sin embargo, los sistemas de carburador con cámara de flotador dan muchos problemas en los aviones. Principalmente porque un avión está variando constantemente de posición y porque los combustibles, al estar en la altitud del cielo, se congelan. Esto motivó el desarrollo del sistema de inyección de combustible. Es por este motivo que ambos sistemas están ligados.

Nikolaus Otto y Etienne Lenoir presentaron motores de combustión interna en la Feria Mundial de París de 1867. En 1875, Wilhelm Maybach de Deutz fue el primero en convertir un motor de gas para funcionar con gasolina. Este motor usaba un carburador con una mecha suspendida a través del flujo del aire entrante. Los extremos de la mecha estaban sumergidos en un recipiente de gasolina debajo de la mecha. Al arrancar el motor, el aire entrante pasaba a través de la mecha, evaporaba la gasolina y llevaba los vapores del combustible dentro del motor para ser quemado. Hacia finales del siglo, Maybach, Carl Benz y otros habían desarrollado un alto nivel de desarrollo en la tecnología del carburador. Se había desarrollado el carburador de chorro de rocío controlado por un flotador.

En fecha tan lejana como 1883, junto con los que trabajaban en los carburadores, otros estaban experimentando con la inyección de combustible

rudimentaria. Edward Butler, Deutz y otros desarrollaron sistemas precursores de inyección de combustible.

La inyección del combustible realmente tomó vuelo por medio de la aviación, como se mencionó anteriormente. Esta tecnología jugó un papel importante desde el principio en el desarrollo de la aviación práctica. En la Europa anterior a la primera guerra mundial, la industria de la aviación comprobó las ventajas obvias de la inyección de combustible. Los carburadores de los aviones son propensos a congelarse durante los cambios de altitud, limitando la potencia disponible. Las tazas del flotador del carburador son propensas a derramarse y a incendiarse durante todo lo que no sea vuelo normal controlado y nivelado. La primera guerra mundial trajo consigo un énfasis en el incremento en los costos por rapidez y desarrollo. El desarrollo de los carburadores se impuso y la inyección de combustible quedó relegada.

La prosperidad de la posguerra en los años veinte trajo consigo la renovación de cierto interés acerca del desarrollo de la inyección de combustible. A mediados de los veinte, Stromberg presentó un carburador sin flotador para aplicaciones en aeronaves, que es el predecesor de los sistemas actuales.

El auge militar, que comenzó en Alemania nazi, proyectó a la compañía Bosch hacia la evolución de la inyección de combustible en la rama de la aviación. En esos primeros sistemas, Bosch usaba inyección directa, que rociaban el combustible a gran presión dentro de la cámara de combustión, tal como lo hace el sistema de inyección diésel. De hecho, la bomba de inyección que usó Bosch para esos sistemas fue una bomba que se modificó en la inyección de diésel.

Durante la segunda guerra mundial la inyección de combustible dominó los cielos. Ya avanzada la guerra por el continente se hizo empleo de un sistema de inyección de combustible que diseñó la compañía de carburadores S.U. Carburetter de Inglaterra. Tal sistema fue construido en los Estados Unidos por la Simmonds Aerocessories en el motor enfriado por aire Simmonds, que fue desarrollado para usarse en el tanque Patton. Ottavio Fuscaldó fue el primero en incorporar en 1940 un solenoide eléctrico para controlar el flujo del combustible hacia el motor.

Esto llevó a la industria automotriz hacia la moderna inyección electrónica de combustible. Después de la segunda guerra mundial la inyección de combustible se trasladó a tierra. Con la investigación y el desarrollo de la industria aérea cambiados de la inyección de combustible a los motores de chorro, los adelantos que se originaron en la guerra parecían destinados al olvido. Entonces, en 1949, con un auto equipado con inyección de combustible, Offenhauser participó en la carrera de Indianápolis 500. El sistema de inyección lo diseñó Stuart Hilborn y utilizaba inyección directa, en la cual el combustible inyectaba en el múltiple de admisión justamente delante de la válvula de admisión. Era como tener un sistema de inyección regulado para cada cilindro. Podría también compararse con el sistema K-Jetronic de Bosch -usado en los VW, Rabbit, Audi 5000, Volvo y otros en que el combustible no era expulsado en la lumbrera de admisión sino rociado continuamente, a lo que se nombró inyección de flujo constante.

Chevrolet presentó en 1957 el primer motor con inyección de combustible de producción en masa en el Corvette. Basándose básicamente en el diseño de Hilborn, el sistema de inyección de combustible Rochester Ramjet lo utilizó Chevrolet en 1957 y 58. Pontiac en el Bonneville en 1957. El sistema Ramjet utilizaba una bomba de alta presión para llevar el combustible desde el tanque

hasta los inyectores, que lo rociaban continuamente adelante de la válvula de admisión. Un diafragma de control monitoreaba la presión del múltiple de admisión y la carga del motor. El diafragma, a su vez, se conectaba a una palanca que controlaba la posición de un émbolo para operar una válvula. Un cambio en la posición de la válvula operada por el émbolo cambiaba la cantidad de combustible desviado de regreso hacia el depósito de la bomba y alejado de los inyectores. Esto alteraba la relación aire-combustible para satisfacer las necesidades del motor. Este sistema tenía el problema de la falta de compresión por parte de los responsables de su mantenimiento diario. Como resultado, Chevrolet y Pontiac lo suprimieron en su lista de opciones en 1959.

Al mismo tiempo que el sistema Ramjet se desarrollaba, evolucionó el sistema de inyección electrónico de combustible (EFI) el cual tenía como fin la producción en masa. El trabajo de diseño para esos sistemas comenzó en 1952 en la Eclipse Machine División de la corporación Bendix, y en 1961 se patentó como el sistema Bendix Electrojector. Casi simultáneamente, al EFI se le declaró como un proyecto muerto por la gerencia de la Bendix y se archivó. Aunque el sistema Electrojector en sí nunca llegó a la producción en masa, fue el antecesor de prácticamente todos los sistemas modernos de inyección de combustible. Cuando la Bendix descartó al EFI en 1961, el interés renació hasta 1966 en que la compañía comenzó a otorgar permisos de patentes a Bosch. La VW presentó en 1968 el sistema D-Jetronic de Bosch en el mercado de los Estados Unidos en sus modelos tipo 3.

Al principio de los setentas el sistema D-Jetronic se usó en varias aplicaciones europeas, incluyendo SAAB, Volvo y Mercedes, aunque los encargados de dar servicio al sistema no comprendían totalmente cómo funcionaba, el D-Jetronic persistió y los procedimientos de servicio y diagnóstico del EFI se expusieron a los mecánicos de los Estados Unidos. A despecho de

su uso extendido en las importaciones europeas, este sistema fue considerado por la industria de reparación de autos como un fiasco.

Cadillac introdujo el primer sistema EFI de producción en masa en septiembre de 1975. Era equipo estándar en el modelo Cadillac Seville de 1976. El sistema se desarrolló por medio de un esfuerzo conjunto de Bendix, Bosch y la General Motors. Tenía un gran parecido con el sistema D-Jetronic de Bosch. Por este tiempo se habían desarrollado métodos sistematizados de localización de fallas como ayuda en el servicio y reparación de la inyección de combustible.

El sistema Cadillac-Bendix se usó hasta la introducción de la siguiente mejora tecnológica de la inyección de combustible, la computadora digital. Cadillac presentó un sistema de inyección digital de combustible en 1980. Por simplicidad, era un sistema de dos inyectores.

Para la Bendix, la idea del control digital de la inyección de combustible se remonta a sus patentes de 1970, 71 y 73. Los beneficios de la computadora digital incluyen un control más preciso de los inyectores más la habilidad de la computadora de controlar una gran variedad de sistemas de apoyo del motor. Con el uso de una computadora digital, el tiempo de ignición, la operación de la bomba de aire, las funciones del embrague convertidor de par de torsión, y una gran variedad de aspectos relacionados con la emisión, podían controlarse con un solo módulo de control compacto.

En 1965 la inyección de combustible Hilborn se le adaptó al motor V-8 Ford de cuatro levas, desarrollado para autos de Indy. Un motor Lotus de cuatro cilindros y 16 válvulas, equipado con inyección de combustible Lucas, se usó en pocos Scorts Ford europeos modelo 1970. Fue hasta 1983 que una división Ford decidió usar la inyección de combustible de manera formal. Ese año la

Ford Europea comenzó a usar el sistema K-Jetronic de Bosch que usaron ampliamente los fabricantes del norte de Europa desde los primeros años de los años setenta.

Mientras tanto, en 1978, la Ford de Estados Unidos pasó por tres generaciones de carburadores controlados electrónicamente. Los sistemas EECI, II y III se proyectaron para cumplir con las normas cada vez más estrictas de emisión de fines de los setenta y los inicios de los ochenta. Desde una perspectiva extranjera, la Ford y sus competidores de los Estados Unidos tenían el temor de comercializar autos con inyección de combustible o se estaban reservando para perfeccionar sus sistemas.

La Ford introdujo su inyección de combustible centralizada a gran presión (CFI) en el Versailles de 5 litros equipado con EEC III. El uso se extendió en 1981 hasta el LTD y el Gran Marqués. El modelo 1983 vio la introducción de la inyección multipuntos (MPI) en las aplicaciones de 1,6 litros. Con la introducción del sistema EEC IV en los modelos 1984, la carburación resultó la excepción en lugar de la regla para la Ford. Al entrar a los noventa, los únicos Ford todavía con equipo de carburadores, fueron paquetes de equipos especiales como autos policíacos y remolques.

La inyección de combustible ha recorrido un largo camino durante los últimos 20 años, pero su historia se remonta a los primeros días del carburador. Así como las razones más convincentes para utilizar la inyección de combustible tienen que encontrarse en las desventajas del carburador moderno, la falta de refinamiento y la versatilidad de los antiguos carburadores prepararon el camino para hacer los primeros experimentos con la inyección de combustible.

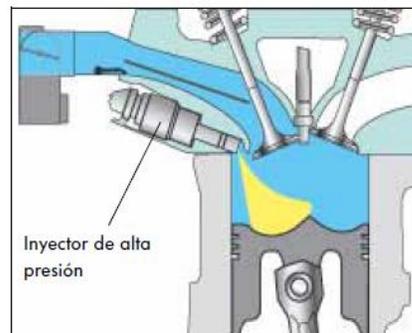
2. INYECCIÓN DIRECTA DE GASOLINA ELECTRÓNICA

2.1. Principio de operación

En los motores de inyección directa de gasolina, la mezcla de aire y combustible se realiza directamente en la cámara de combustión. Durante el ciclo de admisión solo se arrastra el aire de combustión a través de la válvula de admisión abierta. El combustible lo inyectan unos inyectores especiales a alta presión en la cámara de combustión.

El circuito de alta presión del sistema de inyección directa de gasolina está alimentado por una bomba de alta presión que comprime el combustible hasta el nivel que precisa el raíl. Los inyectores conectados al raíl de combustible dosifican y atomizan el combustible de forma extremadamente rápida y a alta presión para permitir la mejor preparación de la mezcla directamente en la cámara de combustión.

Figura 6. **Inyección directa de gasolina**



Fuente: *Inyección directa de gasolina*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc/DI-basica.jpg>. Consulta: julio de 2016.

2.2. Modos operativos

En los motores de inyección directa se pueden dar tres formas diferentes de funcionamiento. La unidad de control elige el modo operativo en función de las condiciones de régimen, potencia, gases de escape y seguridad.

2.2.1. Modo estratificado

Este modo es aplicado al motor en regímenes medios de carga y revoluciones. La estratificación de la mezcla permite que el motor trabaje con un valor lambda aproximado de 1,6 hasta 3, por lo que se obtiene que en el centro de la cámara de combustión hay una mezcla con buenas cualidades inflamables en torno a la bujía. Dicha mezcla está rodeada por una capa exterior que está compuesta por aire fresco y gases de escape recirculados.

Por lo tanto, para que la gestión del motor cambie a modo estratificado deben cumplirse las siguientes premisas:

- El motor está en régimen de carga y revoluciones medias.
- En el sistema no existe fallo de relevancia para los gases de escape.
- La temperatura del líquido refrigerante supera los 50 °C.
- El sensor de NO_x que está ubicado a la salida de los gases de escape del catalizador-acumulador de NO_x está dispuesto para funcionar.
- La temperatura del catalizador se encuentra entre 250 °C y 500 °C.

En el modo estratificado se abre la mariposa lo más posible, para mantener limitadas las pérdidas por estrangulamiento. Una aleta en el colector de admisión cierra el conducto inferior en la culata. Dicho movimiento provoca

una aceleración del aire provocando la formación de un torbellino a través del conducto superior hacia cilindro.

La inyección se realiza en el último tercio del ciclo de compresión, comenzando en unos 60° y terminando en unos 45° antes del punto muerto superior (PMS) de encendido. Al momento de la inyección se ejerce una influencia importante sobre la posición que adopta la nube de la mezcla en la zona baja.

Para la formación de la mezcla en el modo estratificado solamente se dispone de un ángulo de cigüeñal de 40° a 50° . Esto es importante para la capacidad de la formación de la mezcla. Si el tiempo es más corto entre la inyección y el encendido, la mezcla no está preparada todavía para inflamarse de forma adecuada. Un tiempo mayor provocaría una mayor homogenización en la cámara de combustión.

Tras el posicionamiento exacto de la mezcla de aire-combustible en la zona de la bujía es cuando se produce el encendido. Durante esta operación solo se inflama la nube de mezcla, mientras que los gases restantes actúan como aislante, haciendo que se reduzcan las pérdidas de calor en las paredes y aumente el rendimiento térmico del motor.

2.2.2. Modo homogéneo-pobre

Es un modo de transición en el que el motor trabaja entre el modo estratificado y el homogéneo. La mezcla pobre se encuentra distribuida de modo homogéneo en la cámara de combustión. El factor lambda es de 1,55 aproximadamente. Aquí también rigen las mismas premisas que para el modo estratificado.

En la admisión, la válvula de mariposa se encuentra lo más abierta posible y la aleta del colector de admisión está cerrada, reduciendo las pérdidas por estrangulamiento y consiguiendo un flujo intenso de aire en el cilindro. Para la inyección, el combustible se inyecta directamente en el cilindro a unos 300° antes del punto muerto superior de encendido durante el ciclo de admisión. El momento de inyección tan temprano permite disponer de más tiempo para la formación de la mezcla hasta el momento de encendido, produciendo un reparto uniforme en la cámara de combustión. Al igual que en el modo homogéneo, es posible elegir libremente el momento de encendido, porque se tiene un reparto homogéneo de la mezcla.

2.2.3. Modo homogéneo

Este modo es aplicado al motor en regímenes superiores, el factor lambda en este modo operativo es de 1. Es comparable con el funcionamiento de un motor con inyección en el colector de admisión. La diferencia consiste en que el combustible se inyecta directamente en el cilindro al tratarse de la versión de inyección directa. El par motor viene determinado por el momento de encendido y por la masa de aire aspirada. Para esta masa de aire se elige la cantidad necesaria a inyectar. En la admisión, la válvula de mariposa se abre en función de la posición del acelerador. La aleta en el colector de admisión se mantiene abierta o cerrada según el punto operativo momentáneo.

- En gama media de cargas y regímenes está cerrada la aleta en el colector de admisión, provocando un torbellino cilíndrico hacia el cilindro.
- A medida que sigue aumentando la carga y el régimen, se abre la aleta para aumentar la cantidad de aire que ingresa al cilindro.

En la inyección, el combustible se inyecta aproximadamente a los 300° antes del punto muerto superior de encendido, directamente al cilindro, durante el ciclo de admisión. Debido a que hay bastante tiempo disponible para la formación de la mezcla, ocurre que el cilindro se reparte de manera más homogénea. En la combustión, el modo homogéneo se influye esencialmente con el momento de encendido sobre el par de motor, el consumo de combustible y el comportamiento de las emisiones.

2.3. Unidad de control del motor

La unidad consta de 121 pines. Es similar a la de un sistema de inyección convencional, con la diferencia que tiene implementada la inyección directa de gasolina como función adicional, por lo que se ha ampliado el diagnóstico OBD por medio de los siguientes componentes.

- Sensor NO_x
- Sensor de temperatura de gases de escape
- Potenciómetro para recirculación de gases de escape
- Potenciómetro para la aleta del colector de admisión
- Sensor de presión del combustible
- Válvula para reglaje de distribución variable de las válvulas del motor
- Diagnóstico en el modo de mezcla pobre

Este es un sistema de gestión de motor basado en el par, lo cual significa que colecta, analiza y coordina todas las solicitudes de entrega de par.

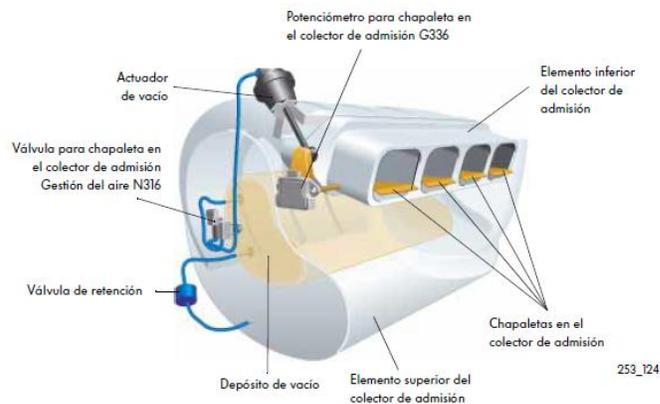
2.4. Sistema de admisión

Es un sistema adaptado a las necesidades de un motor de inyección directa de gasolina. Este sistema es capaz de influir en forma específica en el flujo de aire en el cilindro, dependiendo del modo operativo.

2.4.1. Aleta en el colector de admisión

Se encuentra ubicada en los elementos superior e inferior del colector de admisión. Su función es gestionar el flujo de aire en el cilindro conforme al ciclo operativo reinante.

Figura 7. Aletas en el colector de admisión

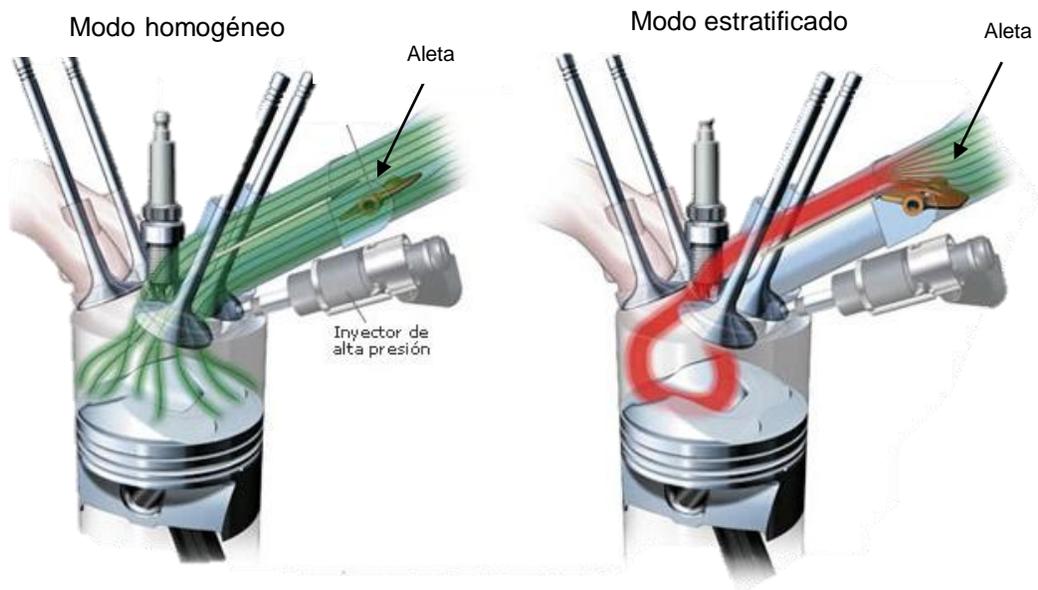


Fuente: *Aletas en el colector de admisión*. <https://img2.ro-des.com/images/mecanica/que-es-el-colector-de-admision03.jpg>. Consultado: mayo de 2016.

En los modos estratificado y homogéneo-pobre y partes del modo homogéneo se acciona la aleta en el colector de admisión y se cierra el conducto inferior en la culata, como se observa en la figura 8. Esto provoca que el aire de la admisión fluya solamente por el conducto superior hacia el cilindro.

El conducto está diseñado de manera que el aire de admisión describa una turbulencia cilíndrica, aumente el flujo de velocidad del aire e intensifique la formación de la mezcla.

Figura 8. **Efecto de la aleta sobre el aire de admisión**



Fuente: *Efecto de la aleta sobre el aire de admisión.*

<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/fsi-funcion.jpg>. Consultado: mayo de 2016.

Al funcionar las cargas y regímenes superiores en el modo homogéneo no se acciona la aleta en el colector de admisión, con lo cual se encuentran abiertos ambos conductos. Debido a la mayor sección de paso en el conducto de admisión, el motor puede aspirar una mayor masa de aire necesario para entregar un par más intenso y alta potencia.

2.4.2. Acelerador electrónico

Es la condición previa esencial para la inyección directa de gasolina. Puesto que colabora con la regulación de la válvula de mariposa independientemente de la posición del acelerador y en los modos estratificado y homogéneo-pobre, se puede abrir a una mayor magnitud. La ventaja del dispositivo en el funcionamiento es que el sistema queda exento de pérdidas por estrangulamiento, es decir que el motor puede respirar aire superando una menor resistencia, beneficiando al ahorro de combustible.

2.4.3. Potenciómetro para la aleta del colector de admisión

Su función es detectar la posición de las aletas en el colector de admisión y transmitir esta información a la unidad de control del motor.

2.4.4. Válvula para aleta

Este dispositivo recibe el comando de la unidad de control para abrir el paso del depósito de vacío hacia el actuador de vacío. A raíz de ello el actuador de vacío se encarga de accionar las aletas en el colector de admisión.

2.4.5. Medidor de masa de aire con sensor de temperatura

Los dos medidores están alojados en una misma carcasa situada en el trayecto de admisión antes de la válvula de mariposa. Su función es medir la cantidad de aire aspirado. El parámetro de la temperatura es utilizado como un factor de corrección.

2.4.6. Sensor de presión en el colector de admisión

Su función es medir la presión en el colector de admisión y transmitirla en forma de señal a la unidad de control del motor. Con la señal de este dispositivo y con las señales del medidor de masa de aire y el sensor de temperatura, la unidad de control del motor puede calcular la cantidad necesaria para recircular gases de escape.

2.4.7. Sensor de presión para la amplificación de servofreno

Su función es medir la presión en el conducto y en el amplificador de servofreno. Con su señal la unidad de control de motor detecta si es suficiente depresión para el funcionamiento del amplificador de servofreno.

2.5. Sistema de combustible

Se divide en las siguientes dos partes principales:

2.5.1. Sistema de combustible de alta presión

La bomba de alta presión impele combustible hacia el tubo distribuidor. La presión del combustible es medida allí por el sensor correspondiente y la válvula reguladora se encarga de regularla entre 50 bar hasta un máximo de 100 bar. Los elementos principales del sistema de alta presión son descritos a continuación:

2.5.1.1. **Rail o tubo distribuidor**

El *rail* es también conocido como el tubo distribuidor que es el encargado de abastecer de gasolina a cada inyector de alta presión.

Figura 9. **Rail o tubo distribuidor**



Fuente: *Rail o tubo distribuidor*. http://www.bosch-mobility-solutions.us/en_us/us/component_us/PT_PC_BDI_Fuel-Injection_PT_PC_Direct-Gasoline-Injection_646.html?compId=354. Consultado: mayo de 2016.

2.5.1.2. **Bomba de alta presión**

La bomba de combustible de alta presión va atornillada a la carcasa del árbol de levas. Es una bomba radial de 3 cilindros accionada por el árbol de levas de admisión. Con los tres elementos de bomba de cada lado a 120°, se mantienen reducidas las fluctuaciones de la presión en el tubo distribuidor de combustible.

La bomba asume la función de establecer una presión de hasta 100 bares en el sistema de combustible de alta presión en los sistemas Motronic de Bosch. El eje de accionamiento de la bomba de combustible de alta presión es impulsado por el árbol de levas de admisión. En el eje de accionamiento hay

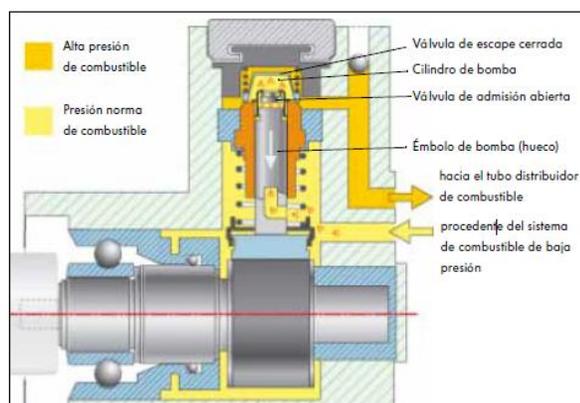
una leva excéntrica que soporta un anillo de leva. Al girar el eje de accionamiento, la leva excéntrica con el anillo de leva establece los movimientos de ascenso y descenso del émbolo de la bomba.

- Durante el movimiento descendente se aspira el combustible del sistema de baja presión.
- Durante el movimiento ascendente se impele el combustible hacia el tubo distribuidor.

2.5.1.2.1. Carrera aspirante

Durante el movimiento descendente del émbolo, la bomba aumenta el volumen en su cilindro y la presión desciende. En cuanto la presión en el émbolo hueco es superior a la del cilindro de la bomba, la válvula abre y permite que el combustible refluya.

Figura 10. Carrera aspirante de la bomba de alta presión



Fuente: *Carrera aspirante de la bomba de alta presión.*

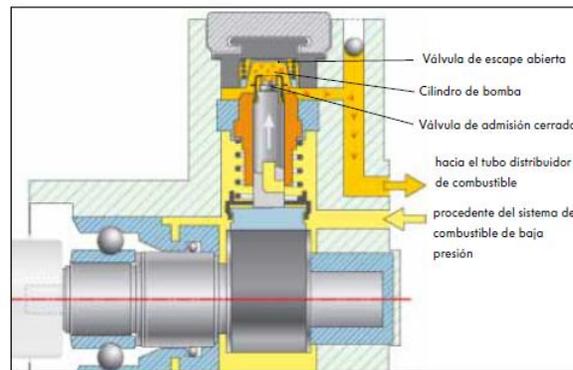
<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecu-direc/bomba-carrera-descend.jpg>

Consultado: mayo de 2016.

2.5.1.2.2. Carrera impelente

Con el comienzo del movimiento ascendente que efectúa el émbolo de la bomba, aumenta la presión en su cilindro y la válvula de admisión cierra. Si la presión en el cilindro de la bomba es superior a la del tubo distribuidor, la válvula de escape abre y el combustible es impelido hacia el tubo distribuidor.

Figura 11. **Carrera impelente de la bomba de alta presión**



Fuente: *Carrera impelente de la bomba de alta presión.*

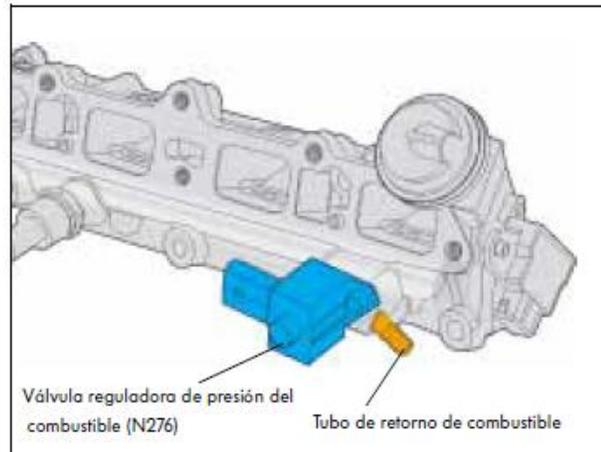
<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/bomba-carrera-ascend.jpg>.

Consultado: mayo de 2016.

2.5.1.3. Válvula de control de presión

Se encuentra en el elemento inferior del colector de admisión y va atornillado entre el tubo distribuidor de combustible y el tubo de retorno hacia el depósito de combustible. Asume la función de establecer la presión en el tubo distribuidor de combustible, independientemente de la cantidad inyectada y de la cantidad impelida por la bomba.

Figura 12. **Válvula de control de presión**



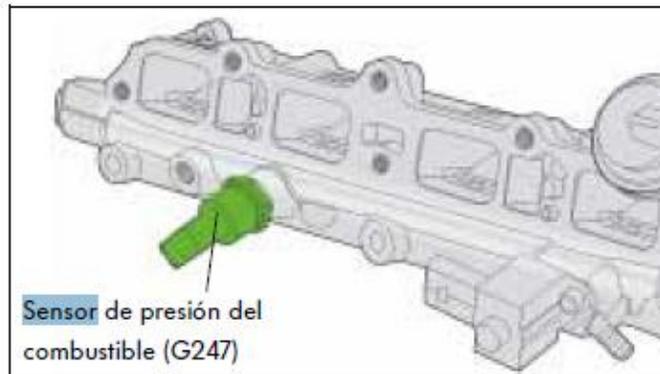
Fuente: *Válvula de control de presión*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/rampa-inyeccion.jpg>. Consulta: mayo de 2016.

Funcionamiento: si se presentan diferencias con respecto a la presión teórica, la unidad de control del motor excita la válvula reguladora de la presión del combustible por medio de una señal modulada en anchura de los impulsos. A raíz de ello se engendra un campo magnético en la bobina y la válvula con la bola de cierre despegas de su asiento. En función de la magnitud de la señal se modifica de esta forma la sección de paso hacia el tubo de retorno y, con esta, la cantidad de combustible que retorno, regulándose la presión correspondiente.

2.5.1.4. Sensor de presión de *rail*

Se encuentra en la parte inferior del colector de admisión y se encuentra atornillado en el tubo distribuidor de combustible. Su función es medir la presión del combustible en el tubo distribuidor.

Figura 13. **Sensor de presión de rail**



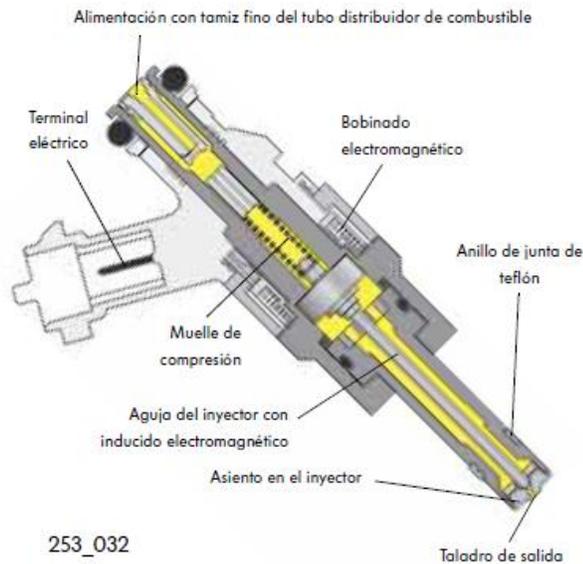
Fuente: *Sensor de presión de rail*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/sensor-presion.jpg>. Consultado: mayo de 2016.

Con la señal de este sensor, la unidad de control del motor regula la presión de combustible en el sistema de alta presión, en función de una familia de curvas características.

2.5.1.5. Válvulas de inyección de alta presión

Se encuentran fijadas a la culata e inyectan el combustible a alta presión a la cámara de combustión. Tienen que inyectar combustible en un tiempo mínimo, adecuadamente atomizado y de forma específica según el modo operativo momentáneo. Por ejemplo, en modo estratificado y homogéneo-pobre se posiciona el combustible de forma concentrada en la zona de la bujía, mientras que en el modo homogéneo se atomiza de un modo uniforme en toda la cama de combustión. Esto es posible por la turbulencia que provoca la aleta ubicada en el colector de admisión.

Figura 14. **Inyector de alta presión**



Fuente: *Inyector de alta presión*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyeccion-direc/inyector.jpg>. Consultado: mayo de 2016.

Durante el ciclo de la inyección se excita el bobinado electromagnético en el inyector y se genera un campo magnético. A raíz de ello se atrae el inducido con la aguja, con lo cual abre el inyector y proyecta el combustible. Al dejarse de excitar el embobinado se neutraliza el campo magnético y la aguja es oprimida por el muelle de compresión contra su asiento en el inyector. El flujo de combustible queda interrumpido.

Los inyectores de alta presión se excitan por medio de un circuito electrónico en la unidad de control del motor. Para que el inyector abra más rápidamente se le da una breve premagnetización y se le aplica una tensión aproximada de 90 voltios. De ahí resulta una intensidad de corriente de hasta 10 amperios. Al estar el inyector abierto al máximo, resulta eficiente una tensión de 30 voltios y una intensidad de 3 a 4 amperios para mantenerlo abierto.

2.5.2. Sistema de combustible de baja presión

La bomba eléctrica en el depósito eleva el combustible hacia la bomba de alta presión. La presión de combustible en funcionamiento normal es de 3 bares y durante el arranque en caliente puede alcanzar los 5,8 bares como máximo.

2.5.2.1. Válvula dosificadora de combustible

Se encuentra ubicada en el tubo de alimentación hacia la bomba de combustible de alta presión y hacia el regulador de presión de combustible.

Durante el funcionamiento normal, la válvula se encuentra abierta y libera el paso hacia el regulador de presión del combustible. Si durante el ciclo de arranque del motor la temperatura del líquido supera los 110 °C y la temperatura del aire aspirado es superior a 50 °C se trata de un arranque en caliente. En ese caso, la unidad de control del motor mueve con éxito la válvula durante unos 50 segundos y cierra así el paso hacia el regulador de presión del combustible. A raíz de ello aumenta la presión en el sistema de baja presión hasta alcanzar la presión impelente máxima de la bomba eléctrica, alcanzando los 5,8 bares como máximo. Este aumento de presión es para evitar la cavitación en el lado aspirante de la bomba de alta presión, garantizando una presurización fiable.

2.5.2.2. Resto de elementos del sistema

El resto de elementos del sistema de baja presión de combustible es prácticamente el mismo que se puede encontrar en un sistema MPI convencional, encontrando la descripción de los mismos en el siguiente capítulo para la inyección indirecta de gasolina. El sistema consta de:

- Depósito de combustible
- Bomba de combustible
- Filtro de combustible
- Regulador de presión

2.6. Sistema de escape

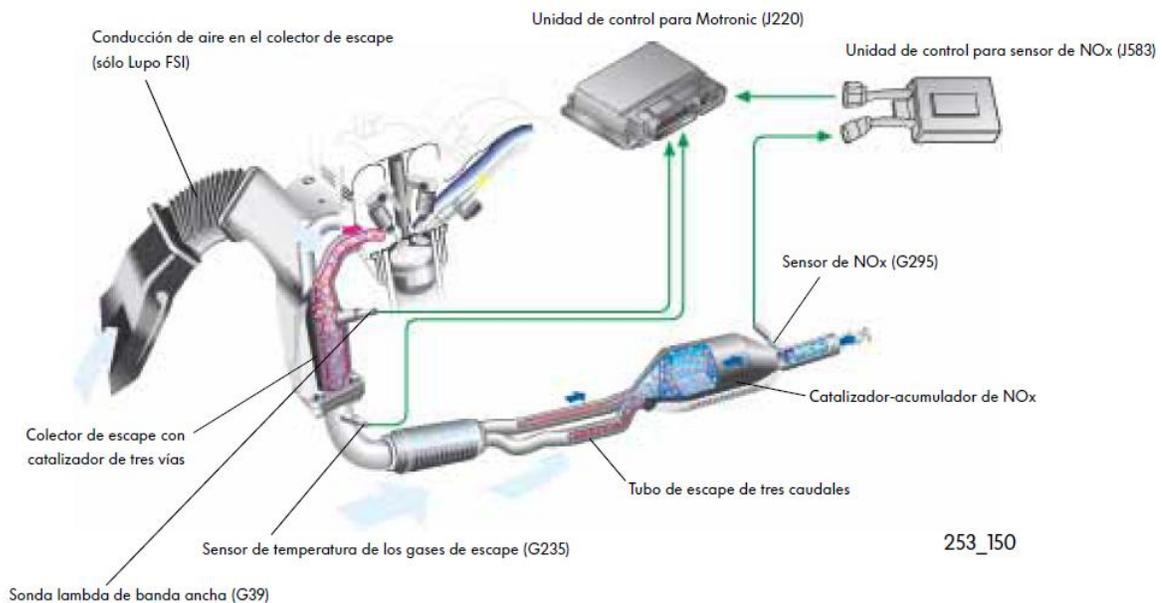
El sistema de gases de escape de un motor con inyección directa de gasolina ha sido adaptado para solucionar el problema del tratamiento de los óxidos nítricos. Este problema no puede ser solucionado con un catalizador de tres vías convencional porque sobrepasa los límites legales de emisión de dichos gases. Por este motivo se incorpora para estos motores un catalizador-acumulador de óxidos nítricos (NO_x). Al estar lleno el acumulador se pone en vigor un modo de regeneración.

El modo de regeneración se lleva a cabo cuando la concentración de óxidos nítricos sobrepasa un valor específico detrás del catalizador-acumulador. Esta operación puede durar hasta 90 segundos. La unidad de control del motor detecta que el catalizador ya no puede almacenarlos más y activa el modo de regeneración que dura un máximo de 2 segundos. Con motivo de esta operación el sistema pasa del modo estratificado a un modo homogéneo ligeramente enriquecido, aumentando así el contenido de hidrocarburos y monóxido de carbono en los gases de escape. En el catalizador-acumulador se combinan estas dos sustancias con el oxígeno de los óxidos nítricos y estos se transforman en nitrógeno.

El sistema también realiza una operación de regeneración de azufre. El sistema efectúa un ciclo de desulfuración cuando la capacidad del catalizador-

acumulador se agota en intervalos de tiempo más breves. La unidad de control del motor detecta que los puntos de retención del azufre están ocupados y que ya no se pueden almacenar óxidos nítricos. En ese momento y a partir de una velocidad mínima especificada del vehículo se procede durante 2 minutos a pasar al modo homogéneo y subir la temperatura del catalizador a más de 650°C. De esta manera reacciona el óxido de azufre acumulado y se transforma en dióxido de azufre (SO₂). La recirculación de gases de escape es lo que le da sentido al empleo del catalizador-acumulador, porque con ayuda de los gases recirculados se reduce la temperatura de la combustión y se producen menos óxidos nítricos.

Figura 15. **Diagrama del sistema de escape**



Fuente: *Inyección directa de gasolina con Bosch Motronic MED 7*. p. 41.

2.6.1. Elementos que componen el sistema de escape

Los siguientes elementos se encuentran representados en la figura 15.

- Tubo de escape de tres caudales: se encuentra antes del catalizador-acumulador de NO_x . Es una medida que se aplica para reducir la temperatura de los gases de escape y con esta la del catalizador-acumulador de NO_x . Su mayor superficie permite que el vehículo en marcha pueda disipar entre 30°C y 100°C .
- Sonda Lambda de banda ancha: esta va atornillada ante el catalizador en el colector de escape. Se usa para determinar el contenido de oxígeno residual en los gases de escape.
- Catalizador previo de tres vías: va situado en el colector de escape. Por su proximidad al motor alcanza rápidamente su temperatura de servicio y comienza con la depuración de los gases de escape. Su misión es transformar catalíticamente los contaminantes de la combustión en sustancias inofensivas.
- Sensor de temperatura de los gases de escape: va atornillado detrás del catalizador previo de tres vías. Transmite la temperatura de los gases de escape a la unidad de control del motor. Con esta señal la unidad de comando calcula la temperatura del catalizador-acumulador de NO_x .
- Catalizador-acumulador de NO_x : va instalado en el mismo sitio que un catalizador principal de tres vías, de tipo convencional, pero además de desempeñar las funciones de un catalizador convencional puede almacenar óxidos nítricos. Aparte de los materiales estratificados, platino, rodio y paladio, el catalizador-acumulador lleva una cuarta capa que consta de óxido de bario. Esto permite almacenar internamente los óxidos nítricos durante el funcionamiento del motor en modo de mezcla pobre.

- Unidad de control para el sensor de NO_x: se encuentra en los bajos del vehículo. Su función es procesar las señales del sensor de NO_x y transmitir la señal a la unidad de control del motor.
- Sensor de NO_x: va atornillado al tubo de escape, justamente detrás del catalizador-acumulador. Su función es determinar el óxido nítrico y el contenido de oxígeno en los gases de escape. Luego transmite la señal a la unidad de control para el sensor de NO_x.

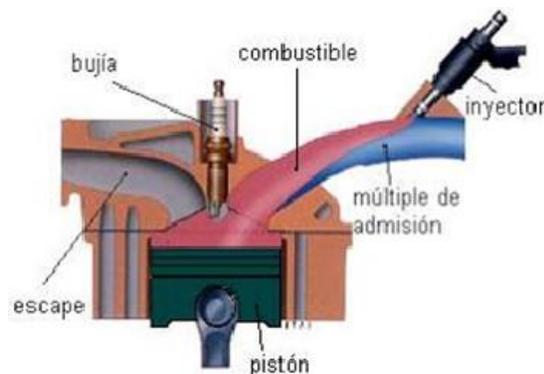
3. INYECCIÓN INDIRECTA DE GASOLINA ELECTRÓNICA

3.1. Principio de operación

En los motores de inyección indirecta la gasolina se introduce afuera de la cámara de combustión. En la etapa de admisión del ciclo, la mezcla aire-combustible ingresa al cilindro en donde se va homogenizando durante la admisión y compresión. Cuando salta la chispa en la bujía se inicia la combustión de la mezcla, generando una detonación que empuja al pistón.

La inyección indirecta puede ser de forma continua, inyectándose de forma permanente con el motor en marcha, con caudal variable dependiendo de la posición del sensor de posición del acelerador. También puede ser discontinua, se va inyectando en fases, simultáneamente en todos los inyectores o de forma individual, se denomina en este caso secuencial.

Figura 16. Inyección indirecta de gasolina



Fuente: *Inyección indirecta de gasolina*. <http://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/507-sistemas-de-inyeccion>. Consultado: mayo de 2016.

3.2. Sistema eléctrico/electrónico

Son todos los componentes que comparten información entre sí, por medio de un flujo de electrones. Con esto la unidad de comando puede determinar la mejor manera de operación del sistema para un funcionamiento eficiente y seguro.

3.2.1. Unidad de comando

Su función es determinar el volumen ideal de combustible a ser atomizado, con base en la información que recibe de los sensores del sistema.

De esta forma, la cantidad de combustible que el motor recibe se determina por la unidad de comando, por medio del tiempo de apertura de las válvulas.

3.2.2. Sonda lambda

Posee una función que análogamente se podría comparar con la de una nariz. La sonda lambda se encuentra instalada en el tubo de escape del vehículo, en una posición ideal para lograr la temperatura para su funcionamiento, en todos los regímenes de trabajo del motor. Está instalada de forma que de un lado está en contacto con los gases de escape y de otro con el aire exterior. Si la cantidad de oxígeno en ambos lados no es igual entonces, se produce una señal eléctrica que se envía a la unidad de comando del sistema.

Esta señal permite que la unidad de comando pueda variar el volumen de combustible atomizado. Cuando la sonda se calienta aproximadamente a 315 °C, el sensor llega a ser conductivo para los iones de oxígeno y comienza a

producir voltaje; a menor contenido de oxígeno en el escape, mayor el voltaje y viceversa. El mal funcionamiento de este elemento afecta directamente la contaminación del aire.

Por lo tanto, el buen rendimiento del sistema de inyección y la reducción de los gases de escape contaminantes dependen del funcionamiento de la sonda. Las causas que podrían precipitar la necesidad de cambio de esta sonda son:

- Cuando los motores queman aceite, la contaminación producida por este puede contaminar a la cerámica de la sonda.
- Cuando los motores funcionan con mezcla demasiado rica, esa contaminación también podría afectar el cuerpo cerámico de la sonda. Imposible de limpiar.

3.2.3. Medidor de flujo de aire

El medidor de masa de aire se encuentra instalado entre el filtro de aire y la válvula de mariposa del motor. Por medio de esta información la unidad de comando puede determinar el volumen exacto de combustible para las diferentes condiciones de funcionamiento del motor. Como ejemplos de medidores de caudal se tiene, de la marca Bosch, los siguientes:

- La sonda volumétrica de aire por plato de sonda LMM. Es utilizada todavía en numerosos motores de gasolina equipados con determinadas versiones de un sistema de inyección, modelos L-Jetronic o M-Motronic. Este sensor de flujo de aire es del tipo de aleta sonda, llamado así porque su aleta interna se mueve conforme el aire es aspirado por el motor.

- El medidor de masa de aire por hilo caliente HLM. Se encuentra equipado en motores con sistema de inyección LH-Jetronic o M-Motronic. Es el medidor de caudal de aire más rápido de los que se encuentran en funcionamiento, pues es capaz de seguir oscilaciones del promedio de hasta 1 kHz.
- Medidor de masa de aire por película caliente HFM. Funciona por el principio de una resistencia calefactora dispuesta en el centro sobre la célula de medición que calienta a una membrana sensible micromecánica y la mantiene a temperatura constante. Fuera de esa zona de calefacción regulada disminuye la temperatura de ambos lados. Dos resistencias dependen de la temperatura, montadas simétricamente a la resistencia calefactora de flujo, arriba y abajo, sobre la membrana. Estos detectan la distribución de la temperatura sobre esta. El calor cedido al aire, y con este la caída de temperatura en la célula de medición del sensor, dependen de la masa de aire que pasa por delante de ella.

3.2.4. Interruptor de la mariposa de aceleración

Está fijado en el cuerpo de la mariposa y se acciona por el eje de aceleración. Posee dos posiciones: el de carga máxima y el de ralentí. Los contactos se cierran en estas condiciones.

3.2.5. Relé

Mantiene la alimentación eléctrica de la batería para la bomba de combustible y otros componentes del sistema de inyección. En caso de algún accidente, el relé interrumpe la alimentación eléctrica de la bomba de

combustible, evitando que la bomba permanezca funcionando con el motor apagado. Esto ocurre cuando el relé no recibe la señal de revolución, proveniente de la bobina de encendido.

3.3. Sistema de combustible

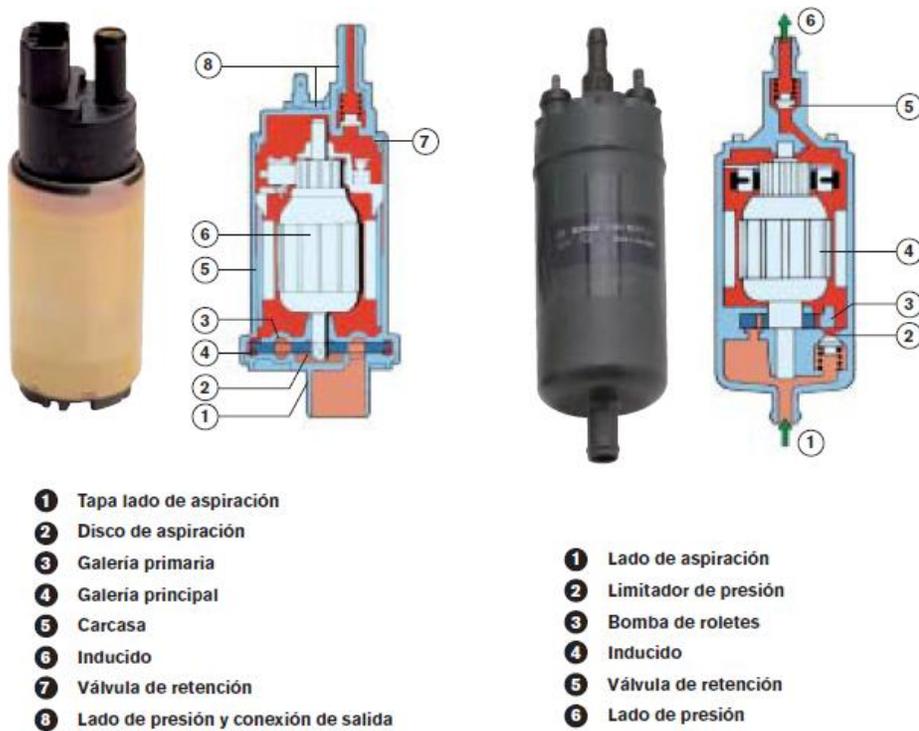
Su función es mantener el combustible limpio, conducirlo hacia los inyectores y mantener la presión en el sistema de constante.

3.3.1. Bomba eléctrica

El combustible es aspirado del tanque por una bomba eléctrica que lo suministra bajo presión a un tubo distribuidor donde se encuentran las válvulas de inyección. La bomba provee más combustible de lo necesario con el propósito de mantener en el sistema una presión constante en todos los regímenes de funcionamiento.

La bomba no presenta ningún riesgo de explosión, porque en su interior no hay ninguna mezcla en condiciones de combustión. A la bomba no es necesario suministrar mantenimiento puesto que es una pieza sellada. En caso de fallo debe ser probada y reemplazada si necesario. A las bombas eléctricas se les puede clasificar en dos grupos dependiendo de su instalación. Puede estar instalada dentro del tanque de combustible (bomba *IN TANK*) o fuera del mismo (*IN LINE*). Dicho tipo de bomba tiene una mayor vida útil.

Figura 17. **Bomba eléctrica**



Fuente: *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. p. 10.

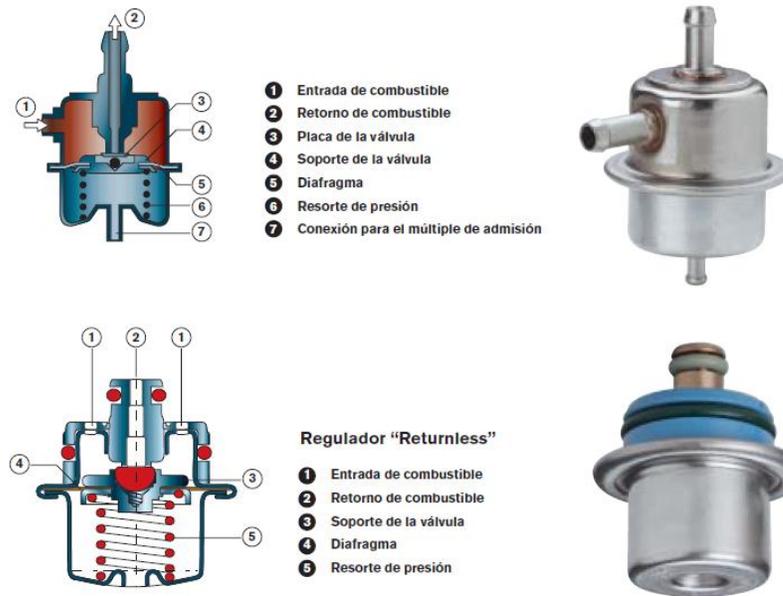
3.3.2. **Regulador de presión**

El regulador mantiene el combustible bajo presión en el circuito de combustible, incluso en las válvulas de inyección. El regulador puede estar instalado en el tubo distribuidor o en el circuito junto con la bomba, es un regulador con flujo de retorno. Garantiza presión uniforme y constante en el circuito de combustible, lo que permite que el motor tenga un funcionamiento perfecto en todos los regímenes de revolución.

Cuando se sobrepasa la presión ocurre una liberación en el circuito de retorno. El combustible retorna al tanque sin presión. En caso de

inconvenientes necesita ser probado por un mecánico y reemplazado si es necesario. Si hubiera problemas en este componente, el motor tendrá su rendimiento comprometido.

Figura 18. **Regulador de presión**



Fuente: *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. p. 11.

3.3.3. Filtro de combustible

Es el componente que más se desgasta en el sistema. El filtro está instalado después de la bomba, reteniendo posibles impurezas contenidas en el combustible. El filtro posee un elemento de papel, responsable por la limpieza del combustible. Este es el motivo principal para que el combustible tenga una dirección indicada en la carcasa del filtro y debe ser mantenida de acuerdo con la flecha.

Es el componente más importante para la vida útil del sistema de inyección. Se recomienda cambiarlo a cada 20 000 kilómetros en promedio. En caso de dudas consultar el manual del fabricante del vehículo con respecto al período de cambio. En su mayoría, los filtros están instalados bajo del vehículo, cerca del tanque. Por no estar visible, su reemplazo muchas veces se olvida, lo que produce una obstrucción en el circuito. El vehículo puede parar y dañar la bomba. Cambiarlo regularmente ayuda a proteger el sistema de inyección.

Figura 19. **Filtro de combustible**



Fuente: *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. p. 12.

3.3.4. Prefiltro

Todos los vehículos utilizan el prefiltro antes de la bomba. Su función es retener las impurezas contenidas en el combustible, protegiendo los componentes internos de la bomba. No reemplazarlo significa:

- Riesgo de quemar la bomba.

- Disminución del volumen de combustible, lo que afecta el rendimiento del motor.

En los vehículos en que la bomba está dentro del tanque, el prefiltro está instalado en el tubo de entrada de combustible. En vehículos en que la bomba está fuera del tanque, el prefiltro está instalado dentro del tanque, en el tubo de aspiración.

Figura 20. **Prefiltro**



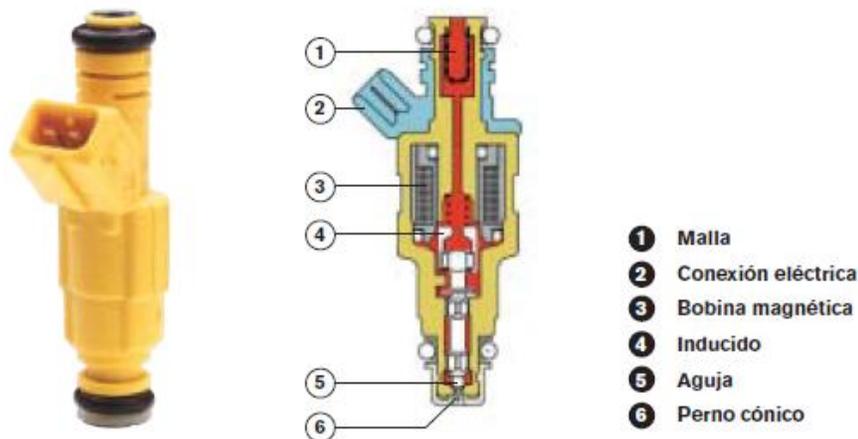
Fuente: *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. p. 13.

3.3.5. **Válvula de inyección**

En los sistemas de inyección multipunto cada cilindro utiliza una válvula de inyección que pulveriza el combustible antes de la válvula de admisión del motor, para que el combustible pulverizado se mezcle con el aire, produciendo la mezcla que resultará en la combustión. Las válvulas de inyección son comandadas electromagnéticamente, abriendo y cerrando por medio de impulsos eléctricos provenientes de la unidad de comando.

Para obtener la perfecta distribución del combustible, sin pérdidas por condensación, se debe evitar que el chorro de combustible toque en las paredes internas de la admisión. Por lo tanto, el ángulo de inyección de combustible difiere de motor a motor, como también la cantidad de orificios de la válvula. Para cada tipo de motor existe un tipo de válvula de inyección. Como las válvulas son componentes de elevada precisión, se recomienda revisarlas regularmente.

Figura 21. **Válvula de inyección**



Fuente: *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. p. 14.

3.3.6. Depósito de combustible

El depósito de combustible es diseñado de manera específica para cada vehículo, dado que es necesario optimizar el espacio libre disponible. Hay dos tipos de tecnología disponible para los depósitos de combustibles de los vehículos:

- Depósitos de plástico: fabricados de polietileno de alta densidad y por medio del moldeo por soplado. Estos depósitos tienen la ventaja de ser livianos, de tener geometrías complejas y de ser seguros en caso de impacto.
- Depósitos de metal: pueden ser de aluminio o de acero, son más pesados en comparación con los de plástico y no pueden adoptar formas tan complejas, necesarias para el ahorro de espacio en un vehículo compacto.

4. EL CO₂ GAS DE EFECTO INVERNADERO

El Sol es la principal fuente de energía para el planeta Tierra. La temperatura del Sol ronda en 5 500 K y la radiación que emite es principalmente de onda corta. Los científicos consideran que la atmósfera de la Tierra es casi transparente, esto significa que no refleja este tipo de radiación, con excepción de las nubes, la nieve y el hielo que son reflejantes. De toda la radiación que llega a la capa exterior de la atmósfera solo el 70 % alcanza a calentar la superficie.

Las ondas cortas de alta energía de la radiación solar que se emiten desde el Sol llegan a la Tierra y solo una fracción de esas radiaciones son reflejadas por la atmósfera hacia el espacio, sin embargo, la mayor parte de esa radiación que ingresa logra pasar a través de la atmósfera absorbiéndose como calor. La Tierra se calienta y, como cuerpo caliente, emite radiación de onda larga (alrededor del infrarrojo) o radiación térmica. La radiación infrarroja pasa entre la atmósfera, pero en lugar de ser irradiada hacia el espacio, mucha de ella se absorbe por la atmósfera y la vuelve a radiar hacia la superficie.

Este fenómeno ocurre a causa de que los gases componentes de la atmósfera, conocidos como gases invernadero, como el vapor de agua, dióxido de carbono, metano y óxidos nitrosos, son capaces de atrapar parte de esa radiación infrarroja que sale desde la superficie de la Tierra para reenviarla en todas direcciones. De esta manera los gases atmosféricos o de invernadero actúan como un filtro en un solo sentido, permitiendo pasar la energía solar, pero no el calor infrarrojo que se escape a la misma velocidad. Este proceso es parecido al que se da en los invernaderos de la agricultura que se usan en las

estaciones frías, pues dejan pasar la luz del Sol, pero detienen, en parte, la radiación de calor de las ondas largas que tratan de disiparse.

Como resultado de este complejo de radiaciones, hay más energía disponible en la Tierra, lo cual es causante de la elevación de la temperatura cercana a la superficie, y puesto que un objeto a mayor temperatura produce más energía, se irradia más de esta hacia el espacio hasta compensar la que llegó del Sol, con el fin de lograr un equilibrio a largo plazo. Si no existiera una atmósfera con gases de efecto invernadero, la temperatura promedio estaría 35 °C más fría. En Guatemala, un país que tiene como temperatura promedio 21 °C en la capital, la temperatura podría llegar a descender a -17 °C.

El gas de invernadero mejor conocido es el dióxido de carbono (CO₂). La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera está aumentando inexorablemente. Se calcula que en 1850 la concentración de este gas era de 250 partes por millón (ppm). En el año 2004 se calculó que llegaba a 376 ppm. Esta concentración sigue aumentando, pues en el 2009 alcanzó las 390 ppm. Este aumento de la concentración es resultado de que la humanidad entera lanza a la atmósfera 22 mil millones de toneladas de CO₂, equivalentes a seis mil millones de toneladas de carbón puro cada año.

Además del CO₂, existen otros gases invernadero, entre ellos se cuenta a los CFC, que están relacionados con la destrucción de la capa de ozono, al metano (gas natural CH₄), al ozono troposférico y a los óxidos de nitrógeno (NO_x). El metano está presente en la atmósfera en una proporción de la quinta parte de CO₂, sin embargo, es cerca de 30 veces más eficiente para capturar calor radiante. Es un gas de ocurrencia natural que ha estado presente en la superficie terrestre desde su formación. El metano es producido por varias fuentes, entre las que se pueden mencionar a las bacterias metanógenas. Se

produce metano en las minas, las termitas también producen metano y muchos animales, como los rumiantes lo producen en el tracto digestivo. Entre más vacas se reproduzcan y se engorden en el mundo, más metano se producirá cuyo destino es la atmósfera.

Comparativamente, los gases de óxidos nitrosos son los que existen en menor proporción, sin embargo, no son despreciables, pues son los que producen la lluvia ácida. Los óxidos de nitrógeno son formados en la descomposición de fertilizantes químicos cuando se quema el carbón mineral y al quemar cualquier combustible.

4.1. Fuentes de CO₂

Las emisiones de dióxido de carbono tienen dos orígenes, naturales y antropogénicas. Hay mucha contaminación en la tierra, por eso ha aumentado el interés en cuidarla en las últimas décadas. La concentración actual de CO₂ en el aire oscila alrededor de 387 ppm, o 0,0387 %, con algunas variaciones día-noche, estacionales y con picos de contaminación localizados. El contenido de CO₂ nunca ha sido tan elevado desde hace 2,1 millones años.

4.1.1. Fuentes naturales

Son las emisiones causadas por la naturaleza. Las mayores emisiones de CO₂ se dan cuando hay incendios forestales y también durante erupciones volcánicas, sobre todo las que tuvieron ciertos volcanes hace millones de años, llegando a cambiar el clima de la Tierra.

4.1.2. Fuentes antropogénicas

Son las emisiones de CO₂ causadas por los seres humanos, siendo estas los medios de transporte que utilizan derivados del petróleo como combustible (automóviles, camiones, motocicletas, etc.); también están las grandes industrias y fábricas, aunque se estima que la contaminación atmosférica que producen los vehículos es mayor.

4.2. Guatemala ante el cambio climático

Todos los seres humanos participan en el aumento de los gases de invernadero, pero no todos lo hacen en la misma magnitud, ni a nivel individual, ni a nivel nacional. En términos numéricos, según datos de las Naciones Unidas, en el año 2011 los países que contribuyen con una mayor cantidad de emisiones anuales de CO₂ producto de las actividades humanas son: China, que produce el 29%, los Estados Unidos, con 16%, países miembros de la Unión Europea con el 11%, Rusia, India y Japón, con el 5% aproximadamente cada uno. Guatemala ocupa el puesto 89 con menos del 0.1% (113 068 kilo toneladas métricas).

Se puede ver claramente que Guatemala no es un gran productor de CO₂ a nivel mundial. Sin embargo, según el informe Global Climate Risk Index 2016 del gobierno de Alemania, Guatemala está en el puesto número 10 en el Top 10 de los países que más duramente serán afectados por el cambio climático, con el vecino Honduras ocupando el primer lugar de dicho estudio.

4.3. Consecuencias del calentamiento global

Al tiempo que la Tierra se calienta, los patrones climáticos pueden alterarse y en algunos lugares estas condiciones climáticas pueden convertirse en violentas. Las corrientes de aire frío pueden desplazarse de tal manera que regiones que han sido tibias pueden experimentar olas de fríos y tormentas invernales. Las masas de aire frío son desplazadas desde el ártico.

Al ser retenida mayor cantidad de calor, más aire se moverá a través de la superficie de la Tierra, produciendo vientos, choques de calor y frentes fríos y más violentas condiciones del tiempo. Los huracanes, tornados y otras tormentas peligrosas pueden incrementar su intensidad. No sólo cambiarían los patrones de circulación atmosférica, sino las corrientes del océano se modificarán.

4.4. Efectos del CO₂ sobre la biodiversidad

Un efecto resultante del aumento de los gases de efecto invernadero es que las zonas climáticas de la superficie terrestre tenderán a desplazarse desde el ecuador hacia los polos. Los primeros afectados serían los bosques templados porque no están adaptados para los climas cálidos. La biodiversidad mundial está seriamente amenazada por las actividades humanas. Además, se le suman los efectos del calentamiento de la Tierra. Muchas especies de plantas viven dentro de un reducido margen de temperatura y humedad. Como el calentamiento global modifica sus hábitats rápidamente, es difícil que estos puedan tener un proceso de adaptación de inmediato o una migración de especies, por lo que muchas especies de plantas, animales y hongos morirán.

Los ecosistemas costeros, como los manglares, arrecifes de coral, playas, estuarios y otros, se afectarían significativamente, ya que un alza en el nivel del mar inundaría las áreas de humedales costeros, causaría un aumento en la erosión costera y salinizaría las aguas en la parte baja de los ríos y en los acuíferos costeros. Las edificaciones muy cercanas a la costa podrían verse afectadas por la acción del oleaje, que podría socavar sus cimientos. Los arrecifes de coral, cuya función es la de proteger a los manglares y playas del oleaje y la erosión costera, quedarían a mayor profundidad bajo el mar. También se afectaría la entrada de luz solar hasta el fondo del arrecife, afectando así los procesos de fotosíntesis de especies esenciales para la vida del coral, así como su capacidad para detener el oleaje y evitar que impacte la costa.

En los ecosistemas terrestres, debido a la evaporación de agua de la superficie del terreno y al aumento en la magnitud y frecuencia de lluvias e inundaciones, los suelos se tornarían más secos y perderán nutrientes con mayor facilidad al ser removidos por los escurrimientos. Esto cambiaría las características del suelo, haciendo necesario que los agricultores se ajusten a las nuevas condiciones. La necesidad de recurrir a la irrigación será esencial durante las épocas de sequía, que debido a la evaporación serán más comunes que en el presente. Las temperaturas más elevadas también propiciarán la reproducción de algunos insectos como la mosca blanca, que causa enfermedades de plantas y afecta su producción.

Como consecuencia de los cambios climáticos y de los cambios en los ecosistemas terrestres, la vegetación característica de cada región se verá afectada. Los bosques de pinos se desplazarán hacia latitudes más altas, la vegetación tropical se extenderá sobre una franja más ancha de la superficie terrestre, y la flora típica de la tundra y la taiga ocupará un área más reducida.

Como consecuencia, al alterarse la vegetación característica de muchas reservas naturales, así designadas para proteger el hábitat de especies amenazadas, estas reservas podrían dejar de ser el hábitat ideal para las mismas, ocasionando su extinción. De igual manera, al ocurrir el proceso de desertificación en algunas áreas también se destruirá el hábitat de muchas especies, causando su extinción. En cuanto a los hábitats acuáticos, al aumentar la temperatura de los cuerpos de agua superficiales, la concentración de oxígeno disuelto presente en los mismos se reducirá. Esto hará que algunas de las especies acuáticas no puedan sobrevivir bajo estas condiciones, causando su eliminación en dichos cuerpos de agua. De afectarse los estuarios y manglares por el exceso de salinización y el oleaje, muchas especies de animales que inician su vida allí tampoco subsistirán.

4.5. Efectos del CO₂ sobre los seres humanos

El dióxido de carbono (CO₂) se encuentra presente naturalmente en un 0,035 % del volumen del aire atmosférico. La exposición a corto plazo del CO₂ a niveles por debajo del 2 % no ha reportado provocar efectos nocivos. Concentraciones más altas pueden afectar la función respiratoria, excitación y seguidamente una depresión del sistema nervioso central. Altas concentraciones de CO₂ pueden desplazar el oxígeno en el aire. Por lo tanto, los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden combinarse con efectos de toxicidad de CO₂.

Voluntarios expuestos a 3,3 % o 5,4 % de CO₂ durante 15 minutos experimentaron profundidad aumentada de respiración. A 7,5%, una sensación de inhabilidad para respirar (disnea), ritmo aumentado del pulso, jaqueca, mareos, sudor, fatiga, desorientación y distorsión visual desarrollada. Veinte minutos de exposición a 6,5 o 7,5% disminuyeron el rendimiento mental. Se

reportó irritabilidad y malestar con exposiciones a 6,5% por aproximadamente 70 minutos. Exposición a 6 % por varios minutos, o 30 % por 20-30 segundos, afectaron el corazón, según lo prueban los electrocardiogramas alterados.

Los trabajadores expuestos brevemente a concentraciones muy altas mostraron daño en la retina, sensibilidad a la luz (fotofobia), movimientos oculares anormales, constricción de los campos visuales y agrandamiento de puntos ciegos. Exposiciones hasta 3,0% por más de 15 horas, por seis días, resultaron en visión nocturna disminuida y sensibilidad al color.

Exposición a 10 % por 1,5 minutos provocó parpadeo ocular, excitación y actividad muscular aumentada y contracción. Concentraciones superiores al 10 % provocaron dificultad para respirar, audición deficiente, náuseas, vómitos, sensación de estrangulamiento, sudor, estupor por varios minutos con pérdida de conciencia a los 15 minutos. Exposiciones al 30 % rápidamente resultaron en inconsciencia y convulsiones. Varias muertes se atribuyeron a la exposición a concentraciones superiores del 20 %. Los efectos del CO₂ pueden ser más pronunciados con esfuerzo físico, tal como trabajo pesado.

4.6. Estándares de emisiones

Son requisitos de límites específicos a la cantidad de contaminantes que son liberados al medio ambiente. Se focalizan en regular la contaminación emitida por vehículos de motor de combustión interna, en la industria, plantas eléctricas e inclusive equipos pequeños como generadores eléctricos portátiles y cortadoras de césped. Normalmente regulan las emisiones de óxidos nitrosos (NO_x), óxidos sulfurosos, partículas en suspensión, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) o hidrocarburos.

4.6.1. Estándares de rendimiento de emisiones de vehículos

Existen varios marcos de legislación que regulan los niveles de emisiones de los vehículos. Los más significativos son el europeo y el estadounidense, que han evolucionado a medida que avanza la tecnología, obligando a los fabricantes de vehículos a reducir la emisión de contaminantes de los vehículos que introducen cada año al mercado.

En Estados Unidos se permite más del doble de emisiones de CO por km que en la Unión Europea, mientras que en Europa se permite el doble de emisiones de óxidos nitrosos que en Estados Unidos. Para comercializar vehículos dentro de la Unión Europea es necesaria una homologación previa (ensayo para certificar a un vehículo que cumple con la legislación). En Estados Unidos esto aplica en algunos estados (mayoría) pero no en todos.

4.6.1.1. Estándares de emisión en Estados Unidos

El estándar de emisión de gases es regulado por la Agencia de Protección Ambiental, o EPA, por sus siglas en inglés, pero cada estado puede ser más o menos estricto con estas normas, inclusive hay estados donde la homologación del vehículo es a voluntad del propietario, por ejemplo, el estado de Alabama.

Debido a los problemas de severa contaminación del aire en la ciudad de Los Ángeles, el estado de California tiene permiso especial para promulgar sus propios estándares de emisión de gases, por lo que el resto de estados pueden elegir apegarse a los estándares de la EPA o a los de California. Por ejemplo, Arizona, Nueva York, Washington, están entre algunos que decidieron apegarse a los de California.

La EPA ha adoptado los estándares de emisión del estado de California como modelo nacional para el año 2016 y está trabajando con dicho gobierno para la elaboración de normas más estrictas para los próximos años. Divide en dos la clasificación de los estándares de emisiones: para vehículos de trabajo liviano y para los vehículos de trabajo pesado.

Para vehículos de trabajo liviano la norma ha pasado por varias fases o etapas, siendo estas:

- Fase 1: implementada entre los años de 1994 y 1997, dividida para cinco categorías: una para vehículos de pasajeros y cuatro para camiones de trabajo liviano (incluye SUV y minivans). California dividió el programa en seis estándares de emisión más estrictos.
 - TLEV: Vehículo de baja emisión en transición
 - LEV: Vehículo de baja emisión
 - ULEV: Vehículo de ultra baja emisión
 - SULEV: Vehículo de súper ultra baja emisión
 - ZEV: Vehículo de cero emisiones
- Fase 2: implementada entre los años del 2004 y 2009. Cambió la manera en que clasificaba los vehículos. En lugar de fijarse en el peso del mismo asignaba un código del 1 al 11.
- Fase 3 A: implementada entre los años 2010 y 2016, en la cual se incorporó los estándares del estado de California con su plan para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

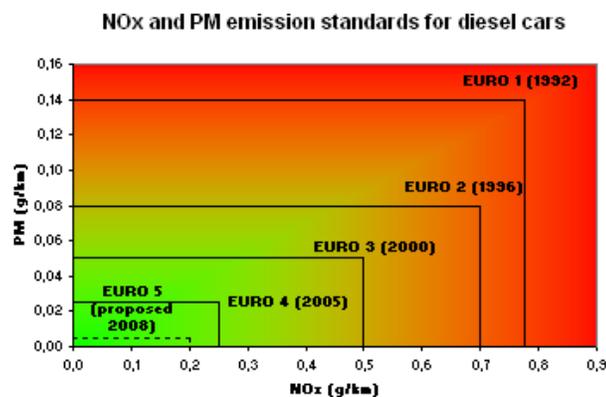
Para vehículos de trabajo pesado las normas exigen que los vehículos deban cumplir con los estándares de emisión más estrictos y requieren que sea

utilizado gasóleo de ultra bajos niveles de azufre con un máximo de 15 ppm para principios del 2007. Además, la EPA eliminó a todo vehículo de trabajo pesado con motor a gasolina.

4.6.1.2. Estándares de emisión en la Unión Europea

Las etapas son normalmente denominadas Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4 y Euro 5 para vehículos ligeros. Las series correspondientes de las normas para vehículos pesados utilizan números romanos en vez de números arábigos. Euro I, Euro II, etc.

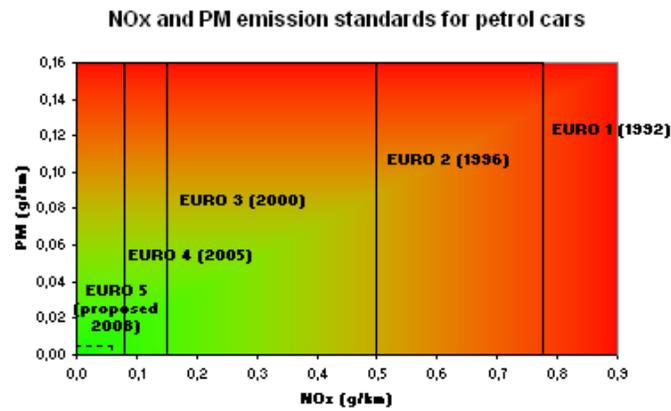
Figura 22. Evolución de la norma para motores de ciclo Diésel



Fuente: *Evolución de la norma para motores de ciclo diésel.*

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=630630>. Consultado: octubre de 2016.

Figura 23. Evolución de la norma para motores de ciclo Otto



Fuente: *Evolución de la norma para motores de ciclo Otto.*

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=630621>. Consultado: octubre de 2016.

5. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Motores a evaluar

Los motores corresponden a vehículos de 1 600 centímetros cúbicos de cilindrada y con cajas automáticas de 6 velocidades. Ambos vehículos se evaluaron en las condiciones lo más originales posible de su fabricación. Es decir, sin que los vehículos contaran con alguna modificación significativa que pudiese afectar el rendimiento de los mismos y los alejara de los resultados dados por el fabricante, y con los neumáticos en condiciones aceptables e inflados a una presión manométrica de 32 psi.

5.1.1. Motor GDI

El motor de inyección directa de gasolina es un gamma 1,6, fabricado por Hyundai y montado en el modelo Accent del año 2012 y con las siguientes características de fábrica:

Tabla I. **Especificaciones del motor GDI**

Desplazamiento (cc)	1591
Diámetro x carrera (mm)	77 x 85,44
Potencia (kW)	103 @ 6 300 rpm
Torque (N-m)	157 @ 4 850 rpm
Relación de compresión	11:1
Emisiones de CO₂ (g/km)	158

Fuente: *Motor GDI*. <http://www.hyundai.com.au/cars/city-cars/accent/specifications>.

Consultado: 7 de agosto de 2016.

5.1.2. Motor MPI

El motor de inyección indirecta de gasolina es de un Volkswagen Polo HB del año 2014 y con las siguientes características:

Tabla II. Especificaciones del motor MPI

Desplazamiento (cc)	1598
Diámetro x carrera (mm)	76,5 x 86,9
Potencia (kW)	78,3 @ 5 250 rpm
Torque (N-m)	153 @ 3 759 rpm
Relación de compresión	10.5:1
Emisiones de CO₂ [g/km]	159

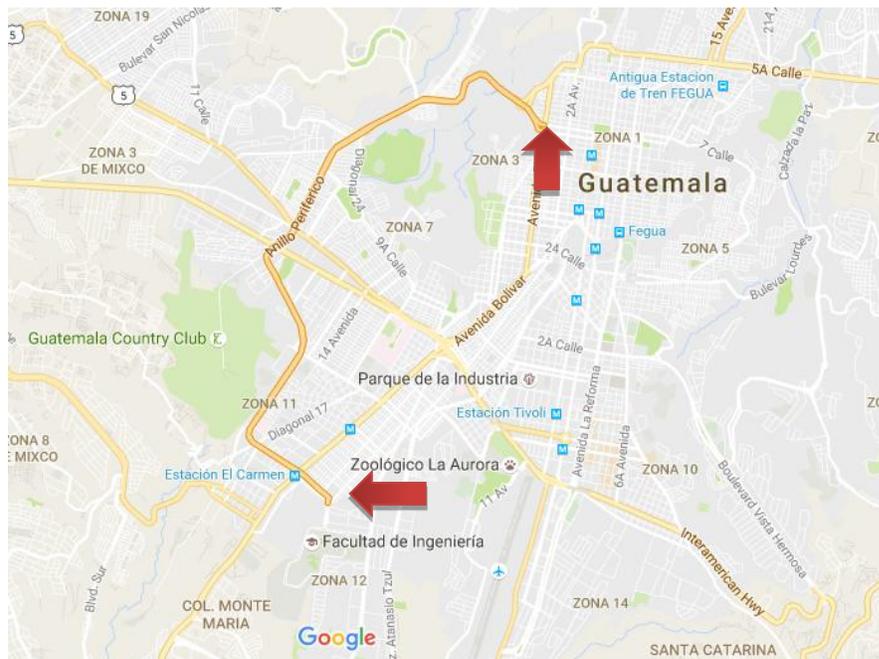
Fuente: *Motor MPI*. <http://www.arpem.com/coches/coches/volkswagen/polo/modelos-08/volkswagen-polo-16-105-united-5p.html>. Consultado: 7 agosto de 2016.

5.2. Descripción de la prueba realizada

La prueba consistió en conducir los vehículos en condiciones de tránsito denso y fluido, además de una prueba en carretera. El tránsito denso corresponde al tipo de tránsito donde hay paradas continuas debido a la elevada cantidad de vehículos por carril. Por lo tanto, la velocidad media es baja, el conductor deberá estar haciendo uso constante de los frenos para detener el vehículo totalmente, acelerar y volver a frenar de forma repetitiva. El tránsito liviano es en el que hay más fluidez vehicular. En dicho tipo de tránsito se puede circular por la ciudad cerca del límite legal establecido por las autoridades de tránsito.

La ruta seleccionada para completar la prueba en ciudad fue el anillo periférico de la Ciudad de Guatemala. El trayecto comprende el viaje de ida y vuelta, iniciando desde la incorporación del bulevar El Naranjo, zona 7 capitalina, hacia el final del anillo periférico en la entrada de la Universidad de San Carlos, zona 12. Dichas mediciones se realizaron a distintas horas del día en las que el tránsito varía. La siguiente figura describe la ruta seguida.

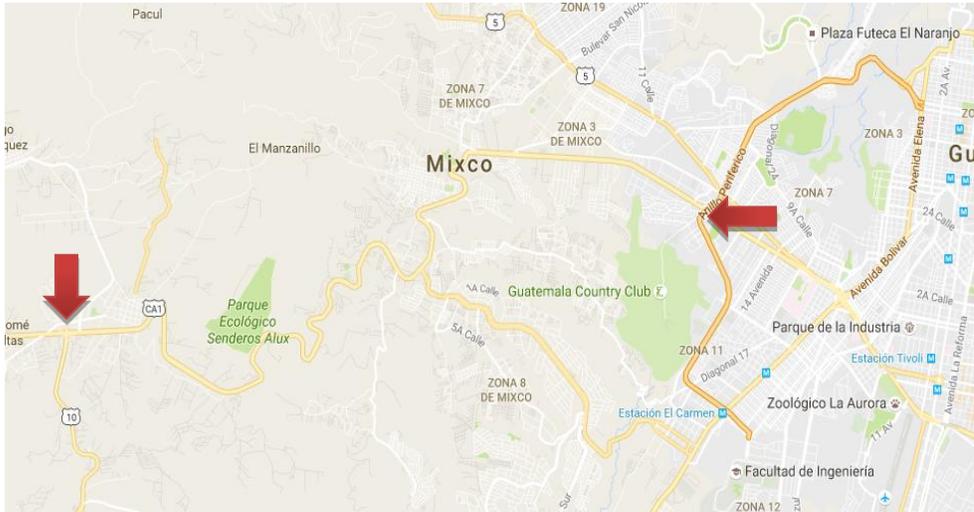
Figura 24. Ruta en ciudad



Fuente: maps.google.com.gt. Consultado: agosto de 2016.

Para la prueba en carretera, se midió en el trayecto de Mixco a San Lucas Sacatepéquez, ida y vuelta en ambos vehículos.

Figura 25. **Ruta de carretera**



Fuente: maps.google.com.gt. Consultado: agosto de 2016.

5.3. **Recolección de datos**

Se realizaron un total de seis mediciones para la elaboración del presente estudio, aprovechando la interfaz de conexión OBD-II instalada de fábrica en ambos vehículos.

Figura 26. **Puerto de conexión OBD-II**



Fuente: elaboración propia.

Se utilizó una herramienta de escaneo inalámbrica que se conecta con una aplicación instalada en una tableta. Dicha aplicación permite la lectura en tiempo real de los parámetros del motor. Además, la aplicación permite el almacenamiento de dicha información en archivos de base de datos CSV (valores separados por coma) que pueden ser abiertos para su posterior análisis en la computadora por medio de Excel.

Figura 27. **Herramienta de escaneo**



Fuente: elaboración propia.

La herramienta toma diez mediciones por segundo; estas son almacenadas en la base de datos de la aplicación. Esto permite que se pueda elaborar un archivo con información muy detallada del comportamiento del motor del vehículo, pero tiene el inconveniente de que, al ser demasiada información, su lectura pueda complicarse, por lo que la mejor manera de poder analizar los datos es auxiliándose con herramientas estadísticas básicas que están presentes en las aplicaciones de ofimática en la computadora. Entonces los datos que aparecen en las siguientes tablas son datos promediados con dicha aplicación.

La tabla 3 es un resumen de las mediciones que se realizaron, describiendo las condiciones más importantes cuando se tomaron:

Tabla III. **Bitácora de mediciones realizadas**

No. de medición	Fecha	Motor	Duración (s)	Distancia (km)	Vél. Máx. (km/h)	Vel. Promedio (km/h)	Comentario
1	9/8/16	GDI	2 586	18,3	75	23,34	Día lluvioso A/C encendido
2	9/8/16	GDI	1 203	13	19	3,2	
3	9/8/16	GDI	2 320	32,4	110	86	
4	10/8/16	MPI	1 866	19,5	90	30,41	A/C encendido
5	10/8/16	MPI	720,6	11	15	4,2	
6	10/8/16	MPI	2 201	31,7	101	84,2	

Fuente: elaboración propia.

5.3.1. **Resultados de medición de consumos de combustible**

Las siguientes tablas representan el promedio de los consumos instantáneos recopilados en la base de datos por medición. Los resultados fueron obtenidos tanto en el sistema internacional que utiliza litro por cada cien kilómetros (l/100km) y en el sistema inglés que utiliza millas por galón (mpg). Sin embargo, consciente de que en Guatemala se utiliza el sistema mixto que esta dado en kilómetro por galón (km/gal), los resultados se presentan haciendo uso de dicho sistema para que su lectura y análisis sean más cómodos.

Tabla IV. **Consumo de combustible para el motor GDI**

Motor GDI	Consumo tránsito pesado (km/gal)	Consumo en tránsito liviano (km/gal)	Consumo en carretera (km/gal)
Medición 1	-----	43,94	-----
Medición 2	34,44	-----	-----
Medición 3	-----	-----	75,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Consumo de combustible para el motor MPI**

Motor MPI	Consumo tránsito pesado (km/gal)	Consumo en tránsito liviano (km/gal)	Consumo en carretera (km/gal)
Medición 4	-----	37,49	-----
Medición 5	34,12	-----	-----
Medición 6	-----	-----	70,42

Fuente: elaboración propia.

Además de medir el consumo de combustible bajo distintas condiciones de manejo que son habituales, se midió el flujo de combustible para cada motor con base en las revoluciones por minuto (rpm) y el flujo en litro por hora (L/H). Este último dato no es medido por algún sensor de forma directa por el vehículo. Sin embargo, se mide de forma indirecta por el sensor de flujo másico de aire ubicado en el sistema de admisión del motor. El cálculo es realizado entonces por la unidad de comando del sistema. Los resultados para flujo de combustible, bajo condiciones similares de trabajo de los motores, son los siguientes:

Tabla VI. **Flujo de combustible en litro por hora hacia el motor**

MPI		GDI	
RPM	L/h	RPM	L/h
814	1,549	812	1,017
818	1,556	830	1,12
820	1,56	930	1,466
831	1,612	990	1,731
1 098	2,211	1 088	1,935
1 190	2,215	1 180	1,936
1 211	2,217	1 236	1,942

Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Resultados de emisiones de CO₂

Las siguientes tablas representan los resultados de las emisiones promediadas para cada situación de conducción guardada en las bases de datos creadas por la aplicación en la tableta. Los datos están dados en gramo por kilómetro (g/km).

Tabla VII. **Emisiones de CO₂ producidas por el motor GDI**

Motor GDI	Emisiones en tránsito denso (g/km)	Emisiones en tránsito fluido (g/km)	Emisiones en carretera (g/km)
Medición 1	-----	252,542	-----
Medición 2	300,143	-----	-----
Medición 3	-----	-----	243,712

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Emisiones de CO₂ producidas por el motor MPI

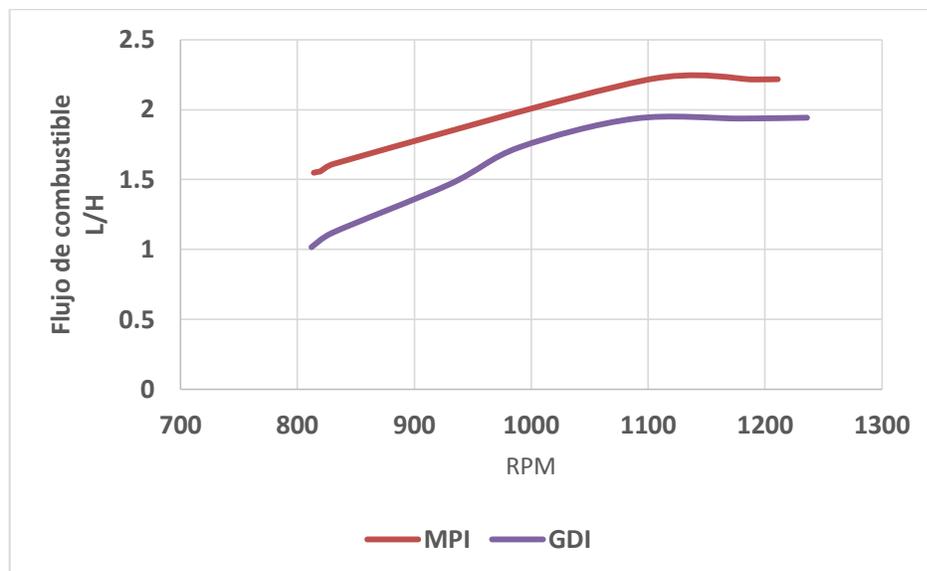
Motor GDI	Emisiones en tránsito denso (g/km)	Emisiones en tránsito fluido (g/km)	Emisiones en carretera (g/km)
Medición 4	-----	243,469	-----
Medición 5	249,869	-----	-----
Medición 6	-----	-----	233,227

Fuente: elaboración propia.

5.4. Análisis y comparación de resultados

Una forma efectiva de analizar qué motor consume más gasolina es por una gráfica que permita comparar el flujo de esta hacia el motor a distintas revoluciones por minuto.

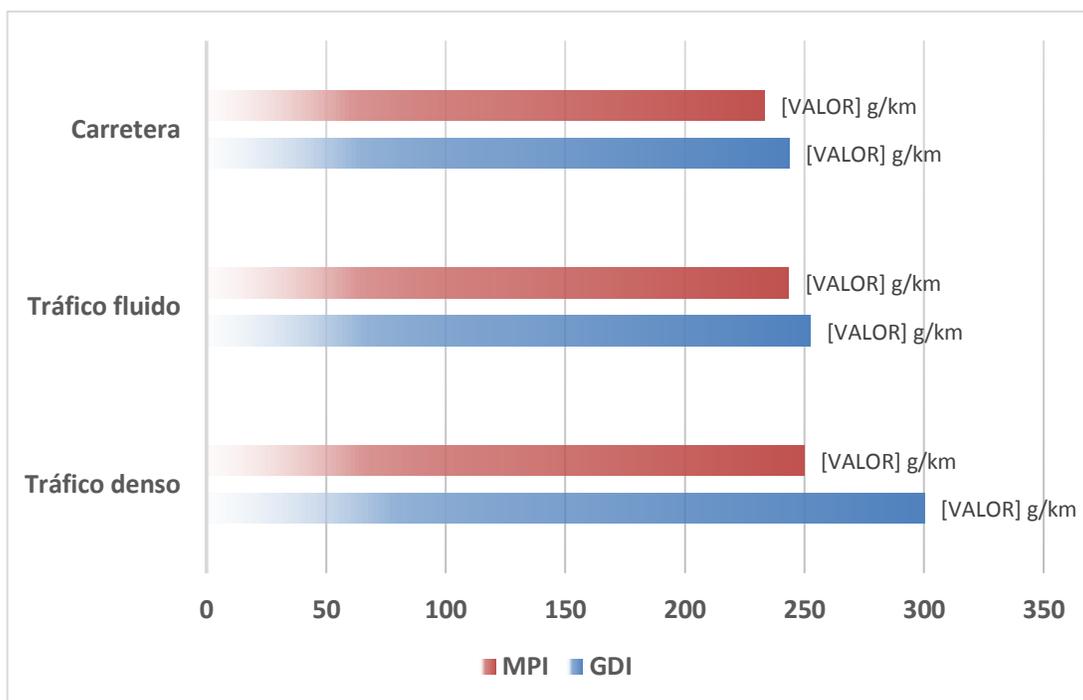
Figura 28. Grafico del flujo de combustible real vs rpm



Fuente: elaboración propia.

Como puede verse claramente, el flujo de combustible es menor en el motor GDI que en el MPI, a pesar de que ambos motores tienen la misma cilindrada y de que se probaron en condiciones similares de trabajo. Esta estrategia también ayuda a ver cuál motor emite más CO₂ hacia la atmósfera. El siguiente gráfico junta las tres condiciones de manejo medidas por el presente estudio en uno solo.

Figura 29. **Comparación de emisiones de CO₂ para ambos motores**



Fuente: elaboración propia.

Puede verse fácilmente que el motor GDI contamina con más CO₂ en todas las condiciones de manejo medidas que el motor MPI. Lo interesante, además, en este estudio es ver que ninguno de los resultados obtenidos se acerca a los resultados dados por el fabricante de dichos motores y de que el fabricante afirma que el motor GDI emite menos CO₂ que el MPI. El promedio

de emisiones entre estos tres tipos de tránsito para el motor GDI son 265,47 g/km. Esto es un 68 % más de lo que afirma el fabricante (158 g/km) en la hoja de datos del motor. Y en el motor MPI el promedio de emisión de CO₂ es 242,18 g/km, lo que representa un 44,9 % más de lo que afirma el fabricante. Por lo tanto, el motor GDI es un 9,61 % más contaminante que el motor MPI bajo las condiciones medidas.

Si se dice que un conductor promedio viaja una distancia anual total de 20 000 kilómetros, y suponiendo que viaja bajo condiciones similares a las de la prueba, entonces el motor GDI produciría 5,31 toneladas de CO₂ y el motor MPI 4,84 toneladas de CO₂, considerando que el auto con motor GDI pesa solamente 1,6 toneladas sin contar a los ocupantes y equipaje.

Los siguientes enunciados se dedican a la comparación del consumo de combustible para cada situación de conducción analizada en el presente estudio, también haciendo uso de gráficas. Dichas gráficas muestran la mejora en porcentaje del consumo entre el motor GDI y el MPI obtenido en las mediciones. Para el cálculo del ahorro económico de gasolina se tomará el precio de gasolina regular en Q. 20.99, precio promedio en la modalidad de autoservicio para el 22 de agosto de 2016. Este dato es proporcionado por la página de Internet del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

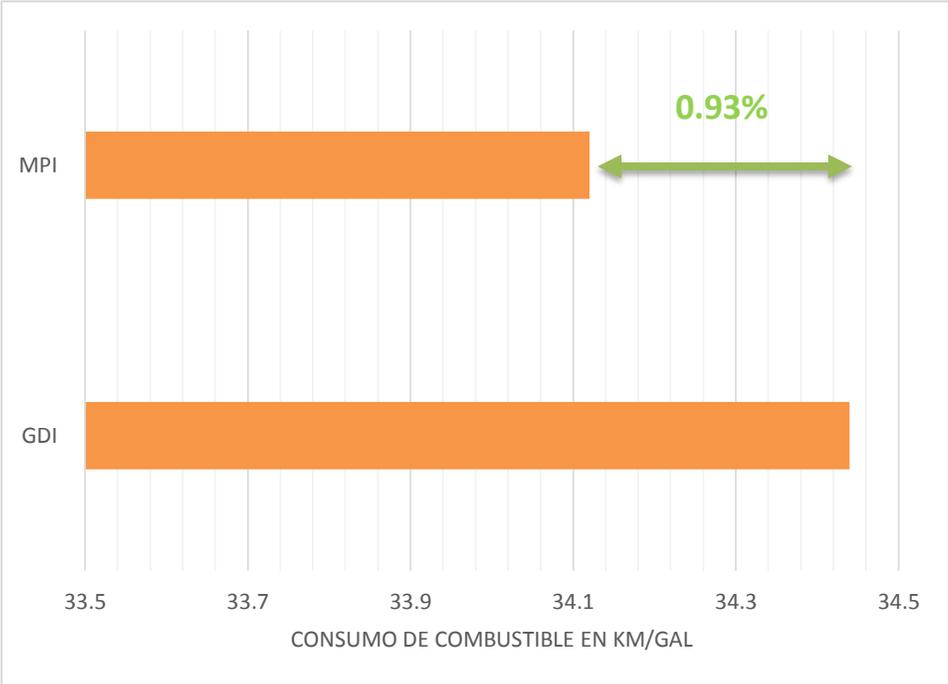
5.4.1. Consumo de combustible en tránsito denso

El porcentaje de la mejora del consumo de combustible entre ambos motores se calcula así:

Porcentaje de ahorro de combustible del GDI con respecto al MPI

$$= \frac{34,44 - 34,12}{34,12} \times 100 \% = 0,937 \%$$

Figura 30. Comparación de consumo de combustible en tránsito denso



Fuente: elaboración propia.

El ahorro económico de combustible en tránsito denso se calculará para una ruta promedio de 10 kilómetros en la ciudad. Esta distancia ha sido elegida considerando la longitud de un congestionamiento fuerte en la ciudad de Guatemala. Para calcular el costo se necesita saber cuántos galones consumirá el motor GDI y el MPI para dicha condición y luego multiplicar el resultado por el precio de la gasolina.

Tabla IX. **Cálculo de ahorro económico para las condiciones de tránsito denso**

Motor	Cálculo	Resultado
MPI	$\frac{10 \text{ km}}{34.12 \text{ km/gal}} = 0.2930 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q6.15
GDI	$\frac{10 \text{ km}}{34.44 \text{ km/gal}} = 0.2903 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q6.09
Ahorro (diferencia)		Q0.06

Fuente: elaboración propia.

Como puede verse, el ahorro de combustible y, por lo tanto, el económico en este tipo de conducción es prácticamente el mismo para ambos motores. No se puede apreciar una mejora significativa en ambos motores.

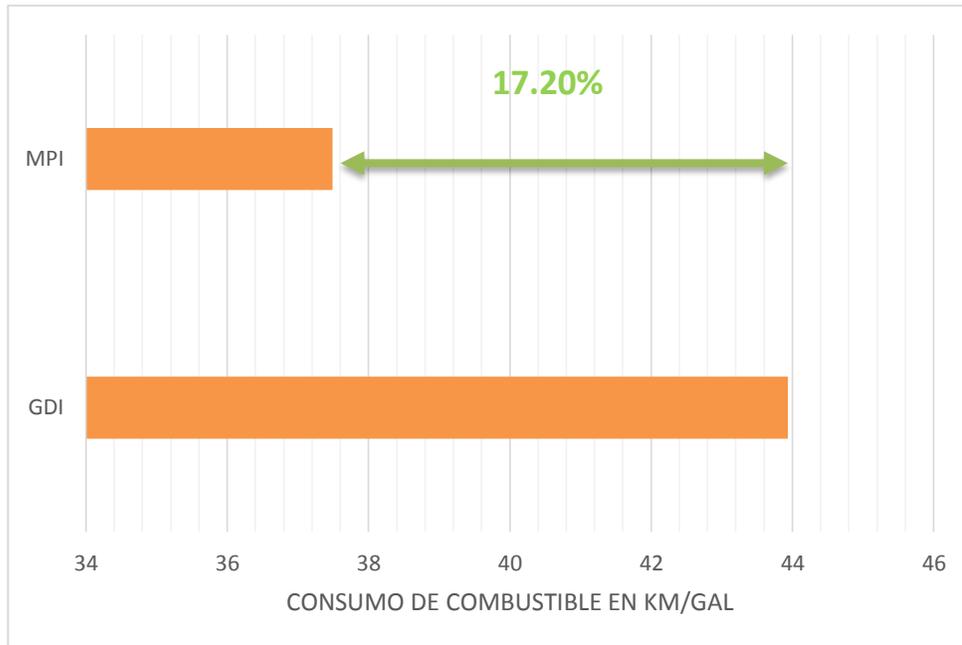
5.4.2. Consumo de combustible en tránsito fluido

El porcentaje de la mejora en el consumo de combustible entre ambos vehículos para dicha condición de tránsito se calcula así:

Porcentaje de ahorro de combustible del GDI con respecto al MPI

$$= \frac{43,94 - 37,49}{37,49} \times 100 \% = 17,20 \%$$

Figura 31. **Comparación de consumo de combustible en tránsito fluido**



Fuente: elaboración propia.

El ahorro económico de combustible en tránsito fluido se calculará para una ruta promedio de 20 kilómetros en la ciudad. La distancia también ha sido elegida considerando el tamaño de la ciudad de Guatemala que se podría circular bajo esta condición. El cálculo tiene el mismo procedimiento que en la situación anterior para los dos motores.

Tabla X. **Cálculo de ahorro económico para las condiciones de tránsito fluido**

Motor	Cálculo	Resultado
MPI	$\frac{20 \text{ km}}{37.49 \text{ km/gal}} = 0.5334 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q11.19
GDI	$\frac{20 \text{ km}}{43.94 \text{ km/gal}} = 0.4549 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q9.55
Ahorro (diferencia)		Q1.64

Fuente: elaboración propia.

En esta modalidad de manejo, ya se puede apreciar una mejora significativa en el consumo de combustible entre ambos motores y, por lo tanto, en el ahorro económico que eso representa.

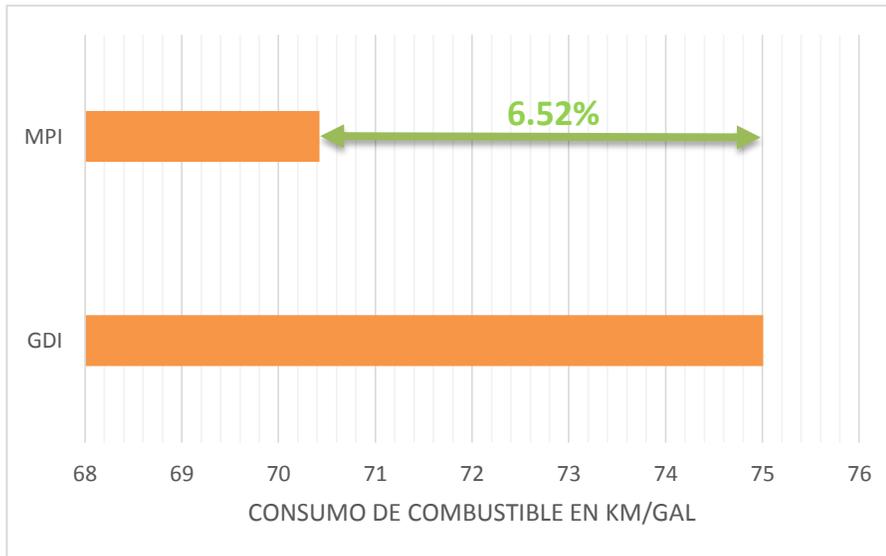
5.4.3. Consumo de combustible en carretera

El porcentaje de la mejora en el consumo de combustible entre ambos vehículos para el manejo en carretera se calcula así:

Porcentaje de ahorro de combustible del GDI con respecto al MPI

$$= \frac{75,01 - 70,42}{70,42} \times 100 \% = 6,518 \%$$

Figura 32. **Comparación de consumo de combustible en carretera**



Fuente: elaboración propia.

El ahorro económico de combustible en carretera se calculará para una ruta en carretera promedio de 200 kilómetros. El procedimiento es el mismo que en situaciones anteriores.

Tabla XI. **Cálculo de ahorro económico para las condiciones de carretera**

Motor	Cálculo	Resultado
MPI	$\frac{200 \text{ km}}{70.42 \text{ km/gal}} = 2.8401 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q59.61
GDI	$\frac{200 \text{ km}}{75.01 \text{ km/gal}} = 2.6663 \text{ gal} \times 20.99 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q55.97
Ahorro (diferencia)		Q3.64

Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Consumo combinado

El consumo combinado no es más que el promedio entre las tres situaciones anteriormente mencionadas. Por lo tanto, el consumo combinado para el motor GDI es de 51,13 km/gal y para el MPI 47,34 km/gal.

Con estos datos se puede realizar una estimación de ahorro anual. Si se vuelve a decir que un conductor promedio viaja una distancia de 20 000 kilómetros en un año de uso del vehículo, y considerando que la gasolina regular en la modalidad de autoservicio tuvo un valor promedio para el año 2015 de Q. 21,94, entonces:

Tabla XII. **Cálculo de ahorro económico para un consumo combinado anual**

Motor	Cálculo	Resultado
MPI	$\frac{20000 \text{ km}}{47.34 \text{ km/gal}} = 422.47 \text{ gal} \times 21.94 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q9268.99
GDI	$\frac{20000 \text{ km}}{51.13 \text{ km/gal}} = 391.16 \text{ gal} \times 21.94 \frac{Q}{\text{gal}}$	Q8582.05
Ahorro (diferencia)		Q686.94

Fuente: elaboración propia.

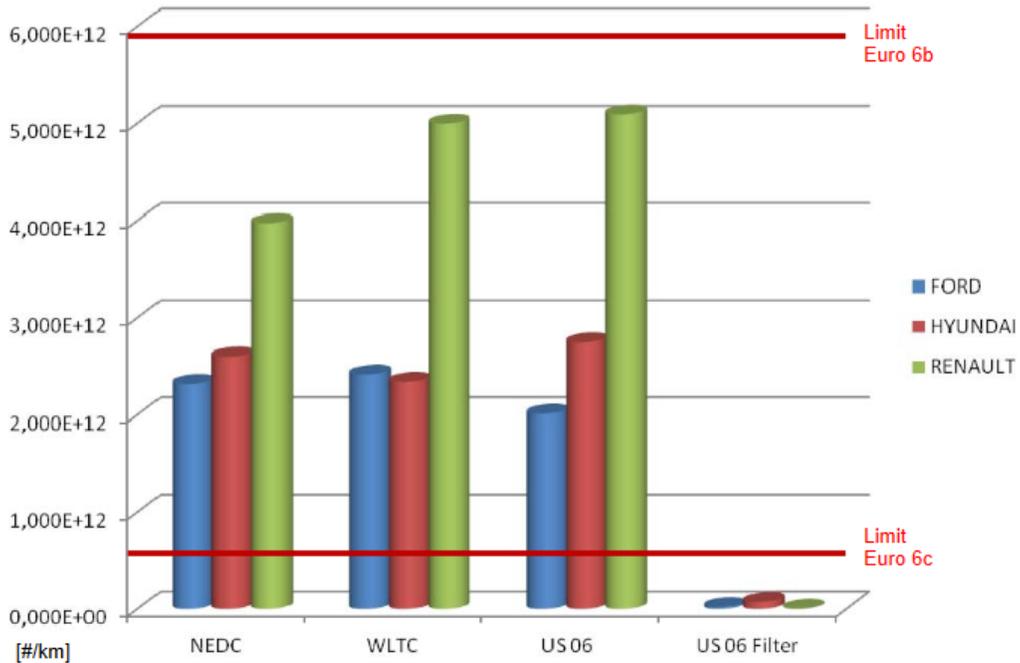
Por lo que se puede ver fácilmente que el motor GDI puede llegar a ofrecer un ahorro económico significativo en el consumo de combustible a lo largo de un año, específicamente un 8 % de ahorro.

5.4.5. Discusión de resultados

Sobre la evaluación de consumos de combustible para ambos motores, se observa que en todas las pruebas realizadas el GDI obtuvo un rendimiento superior al MPI. Existen muchas causas que pueden explicar el motivo de esto. Principalmente es porque el GDI opera con una relación de compresión mayor al MPI y porque el motor GDI es capaz de trabajar con una mezcla estratificada y homogénea-pobre, tal y como se explicó en el capítulo 2. Bajo esta idea es lógico pensar que a medida que se disminuye el consumo de combustible en el motor también debería ocurrir lo mismo con la emisión de gases, principalmente el CO₂, que es en lo que se enfoca el presente estudio, pero los resultados no ocurrieron de esa manera. Entonces, es necesario encontrar una respuesta para dicho problema. Al investigar un poco sobre antecedentes se encontró un estudio previo publicado por la Federación Europea para Transporte y Ambiente (Transport & Environment o T&E, por sus siglas en inglés) y realizado bajo encargo de TÜV Nord, en el cual se compararon tres vehículos con motor GDI: un Ford Focus, un Hyundai i40, y un Renault Megane, bajo tres tipos de normas de prueba de emisiones de gases contaminantes internacionales.

El motivo de dicho estudio era comparar solamente cuánto mejoraba la emisión de partículas contaminantes de estos motores al instalarles un filtro de partículas en la salida de los gases de escape. Sin embargo, los resultados fueron más sorprendentes de lo esperado. En dicho estudio se encontró que la emisión de gases para los motores GDI sin dicho filtro es 10 veces mayor a la de un motor diésel bajo la norma EURO V; que los resultados obtenidos en dichas mediciones fueron mayores a las que aseguraba el fabricante de cada vehículo y que estas superaban las norma EURO 6c, que supuestamente entrará en vigor en el 2017, tal y como se puede apreciar en la figura 33:

Figura 33. Promedio de emisión de partículas



Fuente: T&E 2013. *Testing of particulate emissions from positive ignition vehicles with direct fuel injection system*. TUV Nord Technical Report. p. 13.

Dicho estudio concluye en que los resultados de las pruebas realizadas por los fabricantes de los motores de los vehículos no son realistas. Es decir que son realizadas en condiciones de laboratorio que no se apegan a la realidad. Que es importante vigilar las emisiones de CO₂ para los vehículos que se fabriquen en los próximos años con esta tecnología. Que durante el arranque en frío la contaminación alcanza niveles sumamente altos y todo esto se puede reducir con que los fabricantes de dichos vehículos instalen un filtro de partículas para los gases de escape. Que no supone una pérdida de potencia para el motor ni el incremento de consumo del mismo.

Figura 34. **Filtro de partículas**



Fuentes: *Filtro de partículas*. http://55678801.swh.strato-hosting.eu/cm4all/iproc.php/650_1200.jpg/downsize_1280_0/650_1200.jpg. Consultado: 7 agosto de 2016.

Estos estudios ayudan a sostener los resultados obtenidos en el presente trabajo de graduación. Sin embargo, es necesario encontrar el motivo de por qué los motores GDI son más contaminantes que los MPI. La respuesta se encuentra en los modos operativos de dicho motor. Al trabajar en modo estratificado y homogéneo-pobre se producen gases contaminantes como consecuencia de la combustión incompleta, por lo que el tratamiento de dichos gases ha requerido del desarrollo de un catalizador específico, motivo por el cual la tecnología GDI ha perdido el pulso en los años anteriores frente al MPI y de ahí sus resultados pobres en las pruebas de emisión de gases.

CONCLUSIONES

1. Bajo las condiciones de manejo evaluadas en el presente estudio, se determinó que el motor GDI ofrece una mejora del 8 % de ahorro de combustible en comparación con el motor MPI. Sin embargo, en términos de emisiones del gas de efecto invernadero CO₂, el motor GDI es un 9,61 % más contaminante que el motor MPI, considerando que la cilindrada en ambos motores evaluados es la misma y que el GDI no porta filtro de partículas de fábrica.
2. El impacto del efecto invernadero en el medio ambiente consiste en cambios violentos de los patrones climáticos mundiales, con el aumento de la intensidad de los huracanes, tornados y tormentas, afectando los ecosistemas con su destrucción y muerte, debido a la incapacidad de adaptación rápida a las nuevas condiciones ambientales. Sobre la salud del ser humano, estudios han revelado que con altas concentraciones de CO₂ se puede ver afectada la respiración, puede haber aumento del ritmo cardíaco, jaqueca, mareos, sudoración, desorientación y distorsión visual.
3. La mayor diferencia entre ambos sistemas de inyección es la posición y la presión a la que se introduce la gasolina en la cámara de combustión del motor. En el motor GDI la inyección es dentro de la cámara de combustión (después de la válvula de admisión) y a una presión alrededor de los 100 bares. Por su lado, en el motor MPI se inyecta la gasolina antes de la válvula de admisión, mezclándose con el aire que proviene de la admisión. Además, el sistema GDI trabaja hasta con tres

modos operativos distintos: modo de mezcla estratificada, modo homogéneo-pobre y modo homogéneo. Los dos primeros modos plantean problemas para los tratamientos de gases de escape. Los óxidos nítricos que se producen en dichos modos no pueden ser transformados suficientemente en nitrógeno por medio de un catalizador convencional de tres vías. Por lo tanto, en el motor GDI es necesario un catalizador acumulador de NO_x capaz de cumplir con las normas de emisiones de escape.

4. El sistema GDI emite mayor cantidad de CO_2 que el sistema MPI. Según estudios internacionales esto se puede mejorar al montar un filtro de partículas en el tubo de escape, por lo que es probable que los nuevos vehículos que salgan al mercado porten este filtro para cumplir con las nuevas leyes de emisión de gases que cada vez son más exigentes. Con respecto al ahorro de combustible, el sistema GDI ofrece un menor consumo al poder operar en modo estratificado y homogéneo-pobre a bajas revoluciones. También funciona a una mayor relación de compresión que el MPI, otorgándole más potencia y par motor.

RECOMENDACIONES

1. Adquirir y utilizar vehículos con sistema GDI de modelo reciente que porten filtro de partículas de fábrica, pues otorgan menor emisión de CO₂ y menor consumo de combustible que un MPI moderno.
2. Profundizar más en la comparación entre los sistemas GDI y MPI, midiendo variables como la entrega de potencia, torque y aceleración, y analizar la emisión de gases y los óxidos de nitrógeno.
3. Educar e informar al ciudadano guatemalteco sobre el impacto del efecto invernadero en el mundo y sobre los cambios que ocurrirán a nivel nacional, para que tome conciencia de la importancia de reducir su huella de carbono y para que a nivel colectivo se prepare para los cambios.
4. Utilizar gasolina baja en azufre, debido a que el azufre en los combustibles tiene un impacto negativo en la salud de los seres humanos y porque reduce la capacidad de acumulación de los óxidos de nitrógeno en los catalizadores de los motores GDI.
5. Incentivar a los conductores y propietarios de vehículos a reducir su consumo de combustible, a través de la compra de vehículos con cilindradas más pequeñas y tecnologías de ahorro de combustible, así como a mejorar sus hábitos de conducción incorrectos, que provocan el aumento del consumo de combustible.

6. Que al gobierno de Guatemala, a través del Ministerio de Ambiente, redacte una ley que controle la emisión gases de escape del parque vehicular del país, sacando de circulación a los vehículos que no cumplan con dichas leyes.

7. Incentivar a los conductores a que, en la medida de lo posible, utilicen rutas alternas y no directas para llegar a sus destinos. Esto con el fin de reducir el tránsito en la ciudad de Guatemala.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Aletas en el colector de admisión*. [en línea]. <<https://img2.rodes.com/images/mecanica/que-es-el-colector-de-admision03.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
2. AVENDAÑO, Roberto; GALINDO, Alma; ANGULO, Amada. *Ecología y educación ambiental*. 1a ed. México: Universidad Autónoma de Sinaloa, 2012. 109 p.
3. BOSCH. *Inyección directa de gasolina con Bosch Motronic MED 7*. Alemania: Volkswagen Ag. 41 p.
4. BOSCH. *Sistemas de inyección electrónica Bosch*. Brasil: Robert Bosch Ltda. 20 p.
5. *Carrera aspirante de la bomba de alta presión*. [en línea]. <<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyeccion-directa/bomba-carrera-descend.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
6. *Carrera impelente de la bomba de alta presión*. [en línea]. <<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyeccion-directa/bomba-carrera-ascend.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
7. CENGEL, Yunes; BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a edición. México: McGraw Hill, 2012. 297 p.

8. *Ciclo ideal Otto.* [en línea].
<<http://josefinadtermodinamica.blogspot.com/2009/11/ciclo-otto-y-ciclo-diesel.html>>. [Consultado: mayo de 2016].
9. *Curso de inyección directa de gasolina.* [en línea].
<www.aficionadosalamecanica.com>. [Consulta: agosto de 2016].
10. *Diagrama P-v del ciclo ideal Otto.* [en línea].
<<http://www.mspc.eng.br/termo/termod0520.shtml>>. [Consultado: mayo de 2016].
11. *Dióxido de carbono. Efectos en la salud.* CCSSO. [en línea].
<http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide/health_cd.html>. [Consulta: agosto de 2016].
12. *Efecto de la aleta sobre el aire de admisión.* [en línea].
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/fsi-funcion.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
13. *Evolución de la norma para motores de ciclo diésel.* [en línea].
<<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=630630>>. [Consultado: octubre de 2016].
14. *Evolución de la norma para motores de ciclo Otto.* [en línea].
<<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=630621>>. [Consultado: octubre de 2016].

15. *Filtro de partículas.* [en línea]. <http://55678801.swh.strato-hosting.eu/.cm4all/iproc.php/650_1200.jpg/downsize_1280_0/650_1200.jpg>. [Consultado: 7 agosto de 2016].
16. *Inyección directa de gasolina.* [en línea]. <<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc/DI-basica.jpg>>. [Consulta: julio de 2016].
17. *Inyección electrónica Bosch 2015.* [en línea]. <<http://www.boschautopartes.mx/Cat%C3%A1logos/Pages/Descargas.aspx>>. [Consulta: agosto de 2016].
18. *Inyección indirecta de gasolina.* [en línea]. <<http://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/507-sistemas-de-inyeccion>>. [Consultado: mayo de 2016].
19. *Inyector de alta presión.* [en línea]. <<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/inyector.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
20. KREFT, Sönke; ECKSTEIN, David; DORSCH, Lucas; FISHER, Livia. *Global climate risk index 2016.* Bonn, Alemania: Germanwatch e.V., 2015. 32 p.
21. *Motor GDI.* [en línea]. <<http://www.hyundai.com.au/cars/city-cars/accent/specifications>>. [Consultado: 7 de agosto de 2016].
22. *Motor MPI.* [en línea]. <<http://www.arpem.com/coches/coches/volkswagen/polo/modelos->

- 08/volkswagen-polo-16-105-united-5p.html>. [Consultado: 7 agosto de 2016].
23. *Motor para ensayo de pruebas.* [en línea]. <<http://www.waukeshacr.com/f1-f2/>>. [Consultado: enero de 2017].
 24. OLIVIER, Jos GJ; JANSSENS-MAENHOUT, Greet; PETERS, Jeroen. *Trends in global CO₂ emissions 2012 report.* Holanda: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012. 40 p.
 25. PARKER AKWELI. *How direct injection engines Works.* [en línea]. < <http://auto.howstuffworks.com/direct-injection-engine.htm>>. [Consulta: agosto de 2016].
 26. *Precios promedio de combustibles al consumidor final* [en línea]. < <http://www.mem.gob.gt/hidrocarburos/precios-combustible-nacionales/historico-precios-nacionales/>>. [Consulta: agosto de 2016].
 27. *Potencia, economía y relación aire-combustible.* [en línea]. <<https://www.researchgate.net/figure/260878177>>. [Consulta: mayo de 2016].
 28. *Rail o tubo distribuidor.* [en línea]. <http://www.bosch-mobility-solutions.us/en_us/us/component_us/PT_PC_BDI_Fuel-Injection_PT_PC_Direct-Gasoline-Injection_646.html?compId=354>. [Consultado: mayo de 2016].

29. *Sensor de presión de rail.* [en línea].
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/sensor-presion.jpg>>. [Consultado: mayo de 2016].
30. *Sistemas de inyección Bosch.* [en línea].
<<http://www.boschautopartes.mx/Cat%C3%A1logos/Pages/Descargas.aspx>>. [Consulta: agosto de 2016].
31. T&E. *GDI Briefing particle emissions from petrol cars.* Bruselas, Bélgica: Transport and Environment, 2013. 4 p.
32. T&E 2013. *Testing of particulate emissions from positive ignition vehicles with direct fuel injection system.* TUV Nord Technical Report. 13 p.
33. *Válvula de control de presión.* [en línea].
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/images-inyecc-direc/rampa-inyeccion.jpg>>. [Consulta: mayo de 2016].

APÉNDICE

Apéndice 1. Aplicación Dash Command dando lectura de CO₂



Fuente: elaboración propia.

DashCommand es una aplicación para sistema Android que permite la comunicación entre el sistema OBD-II del vehículo con la tableta o teléfono inteligente. Permite la lectura en tiempo real de las variables del motor, así como guardar en una base de datos las lecturas de los sensores y las mediciones hechas por la aplicación. La base de datos puede ser enviada por un correo electrónico para poder ser analizada en una computadora.

