



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Motor Diesel implementado con Gas Natural

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

PRESENTA (N)

José Miguel Ortíz Sánchez

DIRECTOR DE TESIS

Antonio Zepeda Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Resumen	4
Dedicatoria	5
Agradecimiento	7
Introducción.....	8
Objetivo del Trabajo.....	10

Capítulo N°1: Antecedentes

1.1 Breve Historia del Motor Diesel	11
1.2 Componentes Básicos del Motor Diesel	13
1.3 Ciclo Diesel a Detalle	16
1.4 Inyección en un Motor Diesel	22
1.5 Conclusiones del Capítulo	22

Capítulo N°2: Motor Diesel

2.1 Diesel como Combustible	23
2.2 Ventajas del Motor Diesel sobre el Motor a Gasolina.....	24
2.3 Conclusiones del Capítulo	25

Capítulo N°3: Gas Natural

3.1 Gas Natural como Combustible	26
3.2 Tipos de Gas Natural Vehicular.....	26
3.3 Ventajas del uso de Gas Natural en la Actualidad.....	27
3.4 Almacenamiento del Gas Natural	28
3.5 Seguridad	29
3.6 Situación Actual Mundial	30
3.7 Conclusiones del Capítulo	31

Capítulo N°4: Motor diesel implementado con gas natural

4.1	Breve Historia del Motor Dual-Fuel.....	32
4.2	Operación del Motor Dual-Fuel.....	33
4.2.1	El Retardo de Encendido	36
4.2.2	Límites de Propagación de la Llama.....	38
4.3	Empleo de los Motores Dual-Fuel.....	39
4.3.1	Clean Air Power Company	40
4.4	Comparación del Motor Diesel vs Motor Dual-Fuel.....	41
4.5	Comparación del Ciclo Diesel vs Ciclo Dual.....	42
4.6	Emisiones Contaminantes.....	43
4.7	Ciclo Sabathé	45
4.8	Conclusiones del Capítulo	46

Capítulo N°5: Caso de Estudio	47
-------------------------------------	----

Conclusiones de la Investigación.....	62
---------------------------------------	----

Referencias	64
-------------------	----

Anexos

Terminología Relevante.....	66
Patentes	67
Noticias importantes	73
Cálculos.....	74

Resumen

La combinación diesel y gas natural en la combustión de un motor de operación a compresión aumentará su eficiencia.

Este trabajo se centra en la conversión de un motor diesel a la operación dual-fuel, hecho que hace posible la combustión simultánea de diesel y gas natural con beneficios considerables; igualmente propone el diseño de un banco de pruebas para el motor en estudio, con la finalidad de medir sus características de funcionamiento.

Desde el punto de vista químico se analiza el proceso de combustión, con el objetivo de llegar a aquella expresión que oriente a saber qué proporción de cada combustible es la adecuada para obtener un desempeño óptimo en el sistema.

El trabajo concluye con la obtención de los datos teóricos del proceso antes descrito y la propuesta del banco de pruebas. Quedando para un trabajo a futuro el desarrollo de la parte práctica, es decir, las diversas pruebas del motor en el banco de pruebas.

Dedicatoria

A mi madre y a mi padre, Georgina y Miguel Ángel, por otorgarme la vida, por comunicarme sus consejos y enseñanzas, por mostrarme lo valioso que es la unión familiar, por hacerme ver siempre el lado positivo de las cosas, pero principalmente por darme su amor incondicional desde que tengo memoria, esto es por y para ustedes.

A mi hermana, Olga Valeria, por ser la mejor consejera y compañera en esta vida, gracias por hacer cada momento de mi vida increíble e inolvidable, sin tí nada sería igual.

A mis mascotas, Jose Va, Goliath, Estrellita, Rayito y Máximo, porque gracias a su cariño me motivaron a hacer esta obra día con día.

A mis abuelitos, Rosita y Jorge, por creer siempre en mí, por brindarme afecto desde que era pequeño, pero más que nada por darme cada abrazo que mantengo en mi memoria, aunque desafortunadamente ya no estén conmigo físicamente.

A mis abuelitos, Carmelita y José, por los valores que le inculcaron a mi padre, aunque no tuve el honor de conocerlos y disfrutarlos, sé que siempre estarán a mi lado.

A mi tío Lorenzo, por ser mi tercer abuelo, por todas sus palabras de aliento y por creer en mí, reflejado en su mirada.

A todos mis tíos y tías, primos y primas, por contribuir desde pequeño a ser la persona que soy hoy en día.

A Erick, por brindarme su amistad desde que nos conocimos, por su apoyo en momentos difíciles, pero más que nada por sacarme siempre una sonrisa en momentos inesperados.

A todos mis maestros, por enseñarme a ser el mejor estudiante posible y a no doblegarme frente a cualquier reto.

A Gabriel, Diego y Silver, por ser los mejores maestros y amigos, porque gracias a su ayuda durante la carrera pude salir adelante para convertirme en un ingeniero de pies a cabeza.

A todos mis amigos, por ayudarme a superar mis problemas y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A mis todos mis amigos de la facultad, por el hecho de apoyarme y hacer ligero cada momento que fue parte de esta difícil pero inolvidable y valiosa travesía.

A todos los demás, por creer en mí y porque mucha de mi formación como persona y estudiante se la debo a ustedes.

Y finalmente a todos aquellos que no creyeron en mí, por motivarme a hacer lo imposible, al levantarme cada día con la frente en alto, para mostrar al mundo y a mí mismo que los sueños no solo permanecen en la mente, sino que de vez en cuando éstos se pueden hacer realidad con el suficiente esfuerzo y dedicación.

José Miguel Ortiz Sánchez.

Abril, 2017.

Agradecimiento

Agradezco plenamente a mi familia por ser los pilares en la formación de este nuevo ingeniero, por todo el amor que me han brindado desde el primer momento en que nací, por todos sus consejos para ser una mejor persona y por todo el apoyo y comprensión de siempre en cada una de las etapas de mi vida, este trabajo es para ustedes, siempre estarán en mi mente y mi corazón.

De igual manera agradezco a Dios por haberme dado esta vida llena de dicha, rodeada de personas únicas y valiosas, por ayudarme a levantarme en cada día difícil, por haberme dado la oportunidad de ser un profesionalista y volver realidad un sueño más en este viaje llamado vida.

Mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Antonio Zepeda por haberme guiado en este proyecto que concluye mi formación como ingeniero, además de contar con su apoyo incondicional en todo momento.

Igualmente agradezco a todos mis sinodales por conferirme su voto de confianza en la fase final de mi carrera.

Gracias por último y no menos importante, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a mis profesores por haberme permitido cristalizar mi sueño al convertirme en ingeniero en bien de mi país.

Introducción

1. Tema y como va a ser tratado

Esta Tesis tratará el tema de un motor diesel implementado con una variante de gas natural, con el propósito de apreciar las ventajas y desventajas del mismo proceso sobre los ya existentes, además de tomar en consideración su impacto en el ambiente y en la sociedad.

2. Planteamiento del problema y objetivo del trabajo

Proponer un banco de pruebas para evaluar el comportamiento de un motor dual-fuel, bajo diferentes condiciones de funcionamiento, variando las concentraciones tanto de diesel como de gas natural para lograr un desempeño óptimo. El motor a utilizar será el modelo CA4DC2-10E3, y su fabricante es FAW Deutz, el cual fue donado a la facultad con fines académicos y experimentales.

Por otra parte, planear modificar un motor a diesel para hacerlo operar con dos tipos de combustibles simultáneamente, diesel y gas natural, mejorando la eficiencia y disminuyendo el ruido de la combustión y las emisiones contaminantes producidas por el mismo, entre otras ventajas.

Se sabe que el diesel es uno de los combustibles más usados en el planeta en cuanto a camiones, maquinaria pesada y automóviles se refiere, sin embargo, es un combustible que contamina relativamente y del cual su combustión podría ser más eficiente. De aquí surge la necesidad de combinarlo con otro combustible igual de importante y además limpio como lo es el gas natural, con el fin de mejorar la eficiencia de la combustión y por ende alargar la vida útil de los motores.

3. Descripción breve de cada capítulo

❖ Capítulo 1

En este capítulo se habla brevemente acerca de la historia del motor diesel, así como también se describe a detalle el ciclo que lleva su mismo nombre, al igual que los componentes más representativos del mismo motor.

❖ Capítulo 2

El capítulo 2 se centra por un lado en explicar el diesel como combustible, mientras que por el otro se efectúa una comparación entre el motor diesel y el motor a gasolina para apreciar de manera más clara sus ventajas y desventajas.

❖ Capítulo 3

En el capítulo 3 se ve el gas natural como combustible, de igual modo se menciona los tipos de gas natural vehiculares, así como temas a considerar en el proyecto como son el almacenamiento, medidas de seguridad y la situación actual mundial del este combustible.

❖ Capítulo 4

En este apartado se define lo que es un motor dual-fuel, se describe su operación, su aplicación en la industria y las emisiones contaminantes que produce contra otros motores similares.

Finalmente se muestra una comparación del motor dual-fuel vs el motor diesel y el ciclo dual, con el objetivo de tener presente las ventajas y desventajas del mismo.

❖ Capítulo 5

Por último, en la sección principal del proyecto, se comprende cómo se estudió el problema en específico, es decir, se indica con que motor se trabajó, las diversas opciones de conversión propuestas, así como el concentración con la que se suministró cada combustible para obtener la mejor operación.

Asimismo, en esta parte se realiza un análisis químico de la combustión que ocurre dentro del motor dual-fuel, con la finalidad de obtener valores con los cuales poder realizar una comparación con el lado práctico y llegar a una conclusión acertada.

Para concluir el capítulo, se propone el diseño de un banco de pruebas para el motor, donde se detalla todos los elementos que lo componen, así como el papel significativo que juega en el trabajo.

Objetivo del Trabajo

Proponer los cambios necesarios para convertir un motor diesel a la operación dual-fuel, es decir, que pueda operar simultáneamente tanto con diesel como con gas natural, dependiendo de la carga aplicada.

Al igual que diseñar una propuesta de banco de pruebas para dicho motor, con la finalidad de medir sus prestaciones y características de funcionamiento, para realizar una comparación bien sustentada.

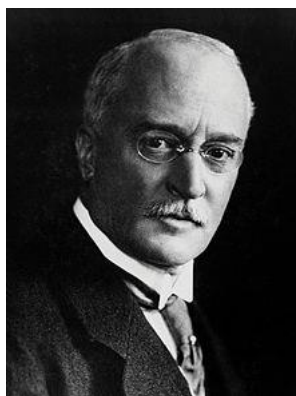
CAPÍTULO 1:

ANTECEDENTES

En este capítulo se hablará primeramente acerca de la historia del motor diesel de una manera breve, posteriormente se tocará el tema del funcionamiento del mismo motor (ciclo Diesel), sus partes más representativas, así como su inyección a detalle.

1.1 Breve Historia del Motor Diesel

El motor diésel fue inventado por el ingeniero francés Rudolf Diesel, en el año 1883. Aunque obtuvo la primer patente de este motor el 28 de febrero de 1892 (Patente DRP 67.207 y 82.168). Asimismo este personaje trabajó en la famosa firma de camiones alemanes “MAN”.



*Fig. 1.1 Rudolf Diesel*¹

En 1883 Rudolf Diesel publicó su teoría sobre el principio de funcionamiento del motor diesel llamado "Teoría y construcción de un motor térmico racional".

Más adelante en la historia y gracias a los estudios del mismo Rudolf Diesel sobre motores de compresión sin ignición por chispa, en el año 1897, MAN produjo un motor que funcionaba con un combustible poco volátil, el aceite liviano (Fuel Oil).

¹ Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Rudolf_Diesel2.jpg/220px-Rudolf_Diesel2.jpg

Este motor básicamente fue una versión mejorada de aquel motor creado por Rudolf Diesel, la principal modificación era en la pulverización del combustible.

En el año de 1923 Daimler – Benz produjeron el primer camión (5K3) con motor diésel del mundo, seguido por MAN, el cual fue el primer fabricante en ofrecer al mercado el primer camión diésel de inyección directa.



Fig. 1.2 Mercedes-Benz 5K3 ²

El motor Diesel es una máquina de compresión y combustión interna que funciona bajo ciclos de dos o cuatro tiempos. En este tipo de motor entra el aire, el cual se comprime a altas relaciones de compresión del orden de 16 a 22:1 para poder lograr la combustión.

Su funcionamiento se basa en aumentar la presión del gas (en este caso aire) contenido en el volumen del cilindro, hasta alcanzar una alta presión y temperatura, arriba de los 500° C, condiciones que ocasionan la pulverización del combustible, generando la combustión y por lo tanto se impulsa el pistón con fuerza hacia abajo.

La inyección de combustible en este tipo de motores utiliza un cilindro compresor para arrastrar el combustible a una presión de 75 atm, pues la presión de aire de un cilindro motor solo alcanza las 32 atm, lo cual es insuficiente para este tipo de combustión.

El motor Diesel tomó la vanguardia de los motores en el mundo esencialmente después de la segunda guerra mundial, debido principalmente a su rendimiento térmico del orden del 40%, al compararlo con un motor con Ciclo Otto.

² Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://cdn.inaxiom.net/web/wp-content/uploads/2011/01/08-Mercedes-Benz-125-a%C3%B1os-de-innovaci%C3%B3n-1923-Benz-Gaggenau-5-K-3.-First-primer-cami%C3%B3n-con-motor-Diesel-de-cuatro-clindros.jpg>

Sin embargo, durante años el motor Diésel se dirigió a los equipos pesados, así como al mercado de grandes camiones de carga, liderados por fabricantes americanos. En 1950 Vernon Roosa fabricó una bomba giratoria pequeña de peso ligero que abrió el camino para el uso de motores diésel en tractores agrícolas, este componente cumplió el objetivo de realizar la inyección del gasóleo en motores de pequeña cilindrada y dimensiones. Su mejoramiento continuo le ha ayudado entrar en nuevos mercados y experimentar un uso cada vez mayor.

En la actualidad, se pueden encontrar motores Diesel cada vez más compactos y poderosos, sin olvidar nunca que gracias a los estudios de Rudolf Diesel este sueño se pudo volver realidad.³

1.2 Componentes básicos del Motor Diesel

Los principales componentes de un motor diésel son:

Émbolo

Pieza de metal cilíndrica que se mueve de arriba hacia abajo, dentro del cilindro.



*Fig. 1.3 Pistón*⁴

Cilindro

Cilindro en el cual se mueve el émbolo, en donde un motor puede tener de 1 a 28 cilindros. En motores multi-cilindros estos están colocados en una de tres formas: en línea, en V u opuestos.

³ Información consultada de las siguientes direcciones electrónicas:

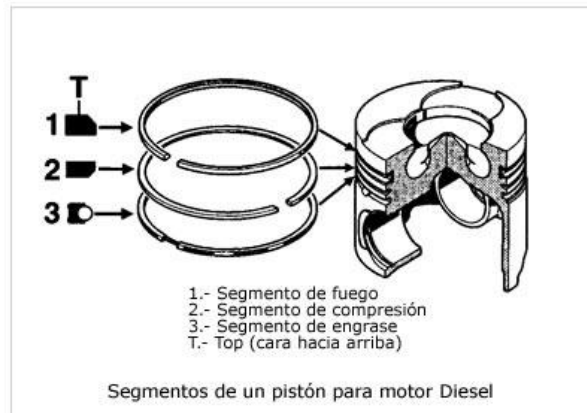
- <http://www.motoradiesel.com.mx/es/noticias/internacional/304-historia-de-un-motor-en-particular-el-diesel.html>
- <http://cochesmiticos.com/el-motor-diesel-historia/>
- <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTrUZC61>
- <http://es.slideshare.net/martk/pdf-motores-diesel>

Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- ⁴ <http://definicion.de/wp-content/uploads/2013/04/piston.jpg>

Segmentos del émbolo

Proveen un sello móvil entre los bordes exteriores e interior del cilindro.



*Fig. 1.4 Segmentos de un émbolo*⁵

Cámara de combustión

Esta es el área donde la compresión y la combustión tienen lugar.

Válvulas

Las válvulas de succión y descarga se abren en el instante en que la mezcla entra y cuando sale. Las válvulas están cerradas durante la compresión y la combustión.



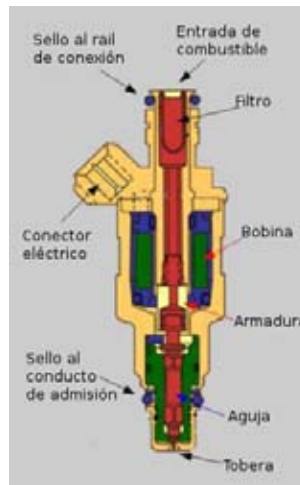
*Fig. 1.5 Válvulas*⁶

Imágenes consultadas de las siguientes direcciones electrónicas:

- ⁵ <http://www.aficionadosalamecanica.net/imagescursomec/segmentos-motor-diesel.jpg>
- ⁶ <http://www.deligiannis.net/images/enginevalve02.jpg>

Inyector de combustible

Capaz de resistir la temperatura y la presión dentro del cilindro y colocar el combustible en un fino rocío.



*Fig. 1.6 Inyector*⁷

Conector

Conecta el émbolo a la polea. Puede rotar y moverse para que la polea ruede.

Polea

Provoca que el movimiento de arriba debajo de émbolo se transforme en un movimiento circular.

La mayoría de los motores diésel utilizan un tapón de luz que consiste en un alambre calentado eléctricamente. Cuando el motor diésel está frío, el proceso de compresión no eleva el aire a una temperatura suficientemente alta para encender el combustible. Por la tanto, el tapón ayuda a encender el combustible cuando el motor está frío.⁸

⁷ Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.sabelotodo.org/automovil/imagenes/motor/inyector.jpg>

⁸ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTtjixSE>

1.3 Ciclo Diesel a detalle

PRIMER TIEMPO

ADMISIÓN

Todo inicia cuando el émbolo (pistón) efectúa su primera carrera o desplazamiento desde el PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior), aspirando aire de la atmósfera debidamente purificado a través del filtro, por el colector y la válvula de admisión que permanece abierta. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180.

La válvula de admisión abre grados antes que el pistón llegue al PMS, cuando el tiempo de escape aún no finaliza, esto favorece enormemente al barrido y expulsión de los gases quemados, lo cual se logra gracias a que la velocidad que produce la inercia de salida de estos gases es, en promedio, del orden de los 70 a 100 m/s.

Con esto se origina en el interior del cilindro y en el orificio de admisión una depresión de 0,2 a 0,4 bar, facilitando de este modo y con la ayuda de la presión atmosférica, el ingreso de la masa de aire al interior del cilindro por el conducto de admisión.

El cierre de la válvula de admisión se produce después que el émbolo ha pasado el PMI entre 30° a 60° aproximadamente, aprovechando que la presión dentro del cilindro es inferior a la presión que produce la masa molecular de aire que ingresa por inercia a una velocidad en promedio de 50 a 80 m/s, logrando con esto compensar los defectos de llenado y mejorar el grado de compresión.

La temperatura alcanzada al final de la compresión es del orden de los 600 a 900°C y la temperatura de autoencendido del combustible diésel es alrededor de 300 a 400°C lo cual depende también de la calidad y el índice de cetano del mismo.

Hay que mencionar que el índice de cetano es el parámetro que establece la velocidad de ignición de los motores, correspondiendo al diésel un valor mayor al 55%.

SEGUNDO TIEMPO COMPRESIÓN

Al contar con las dos válvulas cerradas, el pistón (émbolo) en su carrera ascendente comprime la masa molecular de aire, elevando la presión y temperatura de la misma a medida que va reduciéndose el volumen hacia la cámara de combustión.

La muñequilla del cigüeñal gira otros 180° completando la primera vuelta del árbol-motriz y el volante de inercia aporta una cantidad de energía que se transforma en calor absorbido por la masa de aire.

El volumen ocupado por la masa molecular de aire al cierre de la válvula de admisión va siendo reducido, elevando su vibración molecular con el incremento de la presión y temperatura que se logra a medida que el pistón efectúa su carrera ascendente, hasta alcanzar un valor máximo de compresión con el pistón en el PMS, quedando el volumen reducido a una cavidad formada entre la cabeza del pistón y la culata.

La presión de compresión en los motores diésel oscila entre 30 a 55 bar y su relación de compresión tiene un margen que puede estar considerado en una reducción volumétrica del cilindro de catorce veces a una (14/1) llegando en algunos motores a tener una relación de compresión (R_c) de veintidós veces a una, lo cual depende del tipo de motor que se trate, esta relación está dada por una fórmula que relaciona al volumen de la cámara de compresión con el volumen del cilindro.

TERCER TIEMPO TRABAJO

Grados antes de llegar el émbolo al PMS y finalizar el tiempo de compresión, se produce en el interior de la cámara de combustión la inyección de combustible, originando que la mezcla de aire e hidrocarburo se inflame y combustione; durante este proceso en donde el pistón es desplazado hacia el PMS, se libera la energía potencial calorífica del combustible que se acumula en la cámara de combustión, lo que produce una elevada temperatura en la misma.



Fig. 1.7 Diagrama ciclo de un motor diesel⁹

Con el incremento de temperatura, la energía cinética de las moléculas en combustión aumenta considerablemente y al chocar estas contra las paredes de la cámara de combustión y la cabeza del émbolo, generan la fuerza de empuje que obliga al pistón a desplazarse en carrera descendente hacia el PMI. Durante esta carrera, denominada carrera motriz, por ser la única que realiza trabajo, se produce la transformación de energía.

⁹ Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTtjixSE>

En el proceso químico de la combustión del ciclo termodinámico, se deben distinguir dos fases importantes:

- La primera casi explosiva en la que sube la presión a volumen constante.
- La segunda a presión constante mientras comienza a crecer el volumen.

En la fase de elevación súbita de la temperatura a volumen casi constante, la presión se eleva a su límite de 2 a 3 bar por grado de giro del cigüeñal, aunque es muy difícil medir esa pendiente con medios sencillos se puede apreciar entre los puntos B-C de la figura 1.7. Sin embargo, la práctica permite distinguir perfectamente ese picado seco propio de una buena combustión y de una buena respuesta, a comparación del ruido de picado que se produce cuando la presión sube a razón de más de 3 bar por grado de giro del cigüeñal, debido a que la fuerza expansiva que surge de la reacción química del proceso de combustión se adelanta al PMS, lo cual no es conveniente, porque aunque no llegase a ocasionar un retroceso del émbolo, sí ocasionaría un gran aumento de la presión y en consecuencia un fuerte ruido de cojinetes que rompen la película de lubricación; tampoco conviene que la combustión se retrase mucho porque todo el aumento de presión que se produzca después del PMS no tendría el suficiente tiempo de expandirse y al abrirse la válvula de escape se desperdiciaría gran parte de la energía que de otro modo podría aprovecharse.

Es importante que en el proceso químico de la combustión se adopten todas las ayudas posibles para conseguir una buena mezcla del aire y el combustible, renovándose a medida que la combustión avanza; esto se consigue con la velocidad de turbulencia que adquiere el aire al finalizar la compresión y con la dispersión y geometría del chorro de combustible que es inyectado, ya que:

- Cuanta mayor presión de entrada se tenga, más pequeñas serán las gotas y menor la penetración.
- Cuanto mayor es el diámetro o la sección de entrada, mayor es la penetración.
- Cuanto mayor es la presión de compresión de la masa molecular de aire, menor es el ángulo de dispersión del chorro de combustible que es inyectado.

El espacio angular que recorre el cigüeñal entre los puntos A-B es el avance que se da por razones térmicas que originan retardos en el encendido del combustible que es inyectado en la cámara de combustión, es por eso que al espacio angular existente entre A-B se le denomina "Retardo del Encendido"; pero cuando se habla de la inyección del combustible se deberá sumar otro espacio angular o avance al recorrido del cigüeñal por razones mecánicas como son:

El que se alcance la presión de abertura del inyector, es decir la presión hidráulica que debe alcanzar el combustible para vencer la inercia de la aguja y la fuerza antagónica del muelle.

Es necesario tener en cuenta que existe un avance que fija cada fabricante y que es muy variable, pues depende de la calidad del combustible, del tipo de cámara de combustión, del exceso de aire con que se trabaja, de la relación de compresión y en general de cada tipo de motor.

La presión de apertura del inyector es superior a la de cierre que se produce cuando la bomba deja de inyectar. Para evitar que la descarga en el conducto de inyección produzca ondas hidráulicas de choque que originen variaciones en el momento de la inyección siguiente se dispone de una válvula de retención (impulsión/de respiración) que permite que la presión remanente en los conductos después de la inyección no sea nula o incluso negativa, sin que llegue tampoco a la presión de apertura del inyector; la elasticidad de estos conductos es el que provoca las variaciones hidráulicas que podrían originar inyecciones tardías.

En la evolución del proceso químico de la combustión, el comienzo del suministro "O" se produce al cierre del orificio de entrada o lumbrera de admisión por el émbolo-buzo en el interior de la bomba de inyección, con lo cual se origina una elevada presión hidráulica del combustible; que provoca el inicio de la inyección "A" al alcanzar ésta la presión de apertura de los inyectores. Al intervalo entre O-A se le denomina "Retraso de la Inyección". Al continuar la compresión se da origen al encendido e inflamación de la mezcla en varias partes del cilindro en el punto "B" la propagación de la flama es por todas partes extremadamente rápida y la masa gaseosa de aire y combustible se enciende casi simultáneamente causando el súbito aumento de la presión; este aumento de la presión está asociada con el volumen de combustible inyectado en forma atomizada durante la fase de retardación o retraso del encendido A-B.

En el punto "C", mostrado en la figura 1.7, que está situado al fin de esta etapa, la mayoría del combustible inyectado es quemado. La inyección de combustible continúa incluso después del punto "C" pero debido a la flama que se produjo por la masa gaseosa en combustión entre los puntos B-C, el combustible es quemado al mismo tiempo que es inyectado. Por consiguiente, cualquier cambio de la presión que ocurra durante los puntos C-D puede ser ajustado en cierta medida con la regulación apropiada del volumen de combustible inyectado.

Los gases quemados, resultantes de la combustión se expanden, pero todo el combustible inyectado que no ha sido quemado hasta este momento, se quema durante este periodo de expansión. Cuando este periodo se prolonga la temperatura de escape aumenta y esto reduce la eficiencia térmica de la máquina, por consiguiente en esta fase D-E a la cual se le denomina de "Combustión Tardía" debe ser mantenido tan corta como sea posible. El tamaño, la distribución y el contacto de las partículas de combustible con la velocidad de turbulencia de aire afectan considerablemente el

desarrollo químico de la combustión durante este periodo. Si el tiempo que dura la inyección se alarga mucho, el émbolo estará ya bajando y por tanto enfriando por expansión los gases, lo que provoca una regresión en el proceso químico de combustión con lo cual los gases saldrán sin estar totalmente quemados.

En la expansión de los gases quemados por efectos del aumento del volumen disminuye la presión interna y la temperatura ya que parte del calor generado se disipa por medio de las paredes del cilindro y las cámaras de refrigeración. En el tiempo de compresión el volante de inercia aporta una cantidad de energía que se transforma en calor que es absorbido por la masa de aire que está siendo comprimido.

El tiempo de trabajo o fuerza culmina cuando el pistón llega al PMI y la muñequilla del cigüeñal ha girado 180° más.

CUARTO TIEMPO

ESCAPE

Este tiempo inicia cuando la válvula de escape permanece abierta durante el recorrido ascendente del émbolo el cual efectúa el barrido de los gases quemados que salen al exterior por esta válvula. La muñequilla del cigüeñal efectúa otro giro de 180° completando las dos vueltas del árbol-motriz que corresponde al ciclo completo de trabajo.

Un término que es importante conocer es el “*Traslape*”.

El Traslape se define como una fracción del ciclo completo de funcionamiento en donde se realiza un desfase de tiempo negativo, nulo o positivo, con lo cual se permite que culmine el tiempo de escape e inicie el tiempo de admisión; es decir, es aquel lapso de tiempo en donde se culmina todo un ciclo de funcionamiento y se da inicio a otro nuevo en cada cilindro. Existen tres clases de traslapes:

Traslape Negativo o Distribución Abierta, Traslape Nulo y Cero o Distribución Cerrada.¹⁰

¹⁰ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTtjixSE>

1.4 Inyección en un Motor Diesel

El sistema de inyección más común en un motor diesel es aquel denominado por acumulador común o “Common Rail”. Debido a la alta presión de inyección que produce este sistema, se consigue un espray con una muy fina pulverización del combustible. La alta presión sirve para empujar el gasóleo a través de los pequeños agujeros de la tobera del inyector, produciendo una impresionante fracción del combustible que lo convierte en una nebulosa casi vaporizada.

La alta presión necesaria para la pulverización del combustible se consigue por el método de la jeringuilla, esto es, un émbolo con movimiento alternativo ascendente y descendente que aspira e impulsa el combustible.

Proporcionalmente a la elevación de la presión se mejora igualmente la pulverización del combustible, consiguiéndose una combustión más rápida, lo que significa una elevación del número de revoluciones del motor, y paralelamente una combustión más eficaz y limpia, es decir, ahora se puede quemar más cantidad de combustible sin dejar residuos en cada ciclo de trabajo del motor.¹¹

1.5 Conclusiones del Capítulo

Al finalizar este capítulo se describió el funcionamiento del motor diesel a detalle y sus partes más representativas para su posterior aplicación a la hora de la conversión a un motor dual-fuel, de igual manera se amplió el conocimiento acerca de la historia del mismo motor y su relevancia e impacto en el mundo a través del tiempo.

¹¹ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.tallerdemecanica.com/blog/65-common-rail-sistemas-de-inyeccion-diesel-por-acumulador-comun>

CAPÍTULO 2:

MOTOR DIESEL

En este capítulo 2 se hablará ampliamente de diferentes aspectos del motor diesel como son, el mismo diesel como combustible, así como las claras ventajas del motor diesel sobre el motor a gasolina.

2.1 Diesel como combustible

El gasoil o diesel es un aceite pesado elaborado, como la gasolina sin plomo, a base de petróleo e hidrocarburos, aunque la gasolina suele mezclarse con etanol y el diésel no. Lo que sí contiene son aditivos que ayudan a mejorar las cualidades y prestaciones de los motores: cuanta más calidad tengan éstos, mejor rendimiento a nivel de potencia y de cuidado de todos los elementos que formen parte del circuito de alimentación del vehículo obtendremos, ya que también se encarga de mantener lubricados estos componentes.

Es por ello que el diesel se considera un combustible más eficiente. Su uso es cada vez más extendido en cualquier medio de transporte pero es especialmente popular en vehículos grandes como autobuses, camiones y aeronaves.

Tipos de diesel

Principalmente en el mercado podemos dividir los tipos de carburantes diésel en tres, según el uso para el que sean destinados:

- Gasóleo A: Es considerado el gasoil de más alta calidad, adecuado para los vehículos de automoción por estar más refinado que el resto. Entre sus aditivos se encuentran sustancias que ayudan a disminuir el consumo, bajar las emisiones contaminantes, y proteger el sistema de inyección. En función al nivel de azufre puede ser hasta 10 veces más limpio desde un punto de vista ecológico, que el diésel convencional.
 - El biodiesel, es una variedad de éste que ha sido oxigenado con éter a base de aceites vegetales o grasas animales como una fuente de energía renovable y alternativa a los destilados del petróleo.

- Gasóleo B: Este gasoil se usa frecuentemente para maquinaria agrícola, embarcaciones y vehículos autorizados. Contiene más cantidad de parafina que el anterior por lo que puede solidificarse a bajas temperaturas. Además al estar menos filtrado, puede causar problemas de mantenimiento en los motores de automóviles y motocicletas. Su uso en estos últimos se considera un delito de fraude ya que evita los impuestos del gasóleo A.
- Gasóleo C: Se trata del gasoil más económico de los tres. Básicamente su función es generar calor ya que contiene muchas impurezas y un elevado nivel de parafina que aporte un alto nivel calorífico por lo que está destinado a usarse en calderas de calefacción.¹²

2.2 Ventajas del Motor Diesel sobre el Motor a Gasolina (Ciclo Otto)

Algunas ventajas importantes del Motor Diesel por sobre el Motor a Gasolina son las siguientes:

El mejor rendimiento térmico, gracias al elevado grado de compresión y al favorable proceso químico de combustión se efectúa con un exceso de aire, aproximadamente entre un 30% a 40% de aire adicional respecto a la dosificación teórica.

Su consumo específico es más reducido con respecto al de los motores a gasolina y con la utilización de un combustible más barato que la gasolina, además el poder calorífico de este combustible es mucho más elevado.

El consumo específico de un motor diésel es menor que el del motor a gasolina, solo por ejemplificar, cuando trabaja a $\frac{1}{4}$ de carga normal el consumo de este motor llega a ser la mitad del de un motor a gasolina. Una ventaja importante igualmente es la facilidad que tiene para su puesta en marcha a bajas temperaturas.

Sus gases de escape son menos tóxicos: monóxido de carbono máximo en aceleración 0,1%, en lugar de 3% para un motor a gasolina el cual tiene más del 5% en ralentí.

Por último, el peligro de incendio es prácticamente nulo, pues el gasoil o diesel es menos volátil que la gasolina y sus vapores necesitan de una atmósfera de 80°C para

Información consultada de la siguientes direcciones electrónicas:

- ¹² <https://www.ro-des.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil/>

que una fuente de calor pueda encenderlos, mientras que los vapores de la gasolina sólo necesitan una atmósfera de 20°C.¹³

2.3 Conclusiones del Capítulo

Al término de este capítulo se puede concluir que se examinó y describió el diesel como combustible, especialmente su aplicación vehicular.

Adicionalmente, la comparación motor diesel contra el motor a gasolina resultó muy útil y constructiva, con la finalidad de resaltar las grandes ventajas del motor diesel.

Como se observó el motor diesel tiene grandes ventajas, sin embargo, en México siguen teniendo prioridad los motores a gasolina, desafortunadamente, esto se debe a que la calidad del combustible diesel en nuestro país es mala, además que el mismo no está certificado como debería.

• ¹³ <http://es.slideshare.net/martk/pdf-motores-diesel>

CAPÍTULO 3:

GAS NATURAL

Durante este capítulo se tocará los temas alrededor del gas natural como combustible. Esto se refiere a los tipos de gas natural vehicular, las ventajas del uso de gas natural en el planeta, su almacenamiento, uso y diversas medidas de seguridad en vehículos comunes en la sociedad, así como la situación actual mundial de este importante combustible.

3.1 El Gas Natural como combustible

Se denomina gas natural vehicular al gas natural usado como combustible vehicular que es, en la actualidad, un combustible totalmente consolidado como la mejor alternativa en lo relativo a emisiones de escape y sonoras para los vehículos de uso urbano.^{14 15}

El gas natural resulta equivalente a una gasolina de 125 octanos, debido a la excelente capacidad antidetonante del metano.¹⁶

3.2 Tipos de Gas Natural Vehicular

Los gases naturales vehiculares más comunes son el Gas Natural Licuado (GNL) y el Gas Natural Comprimido (GNC). A continuación se describirá cada uno de ellos.

Gas natural licuado (GNL)

El GNL es la forma de gas natural que consigue una mayor densidad y, como consecuencia, ofrece una mayor autonomía al vehículo. No requiere depósitos preparados para resistir altas presiones, pero tienen que estar equipados con un importante aislamiento térmico para reducir la vaporización incontrolada del GNL.

¹⁴ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

¹⁵ Ghazi A. Karim. (2015). *Dual-Fuel Diesel Engines*. Florida, U.S.: CRC Press.

¹⁶ Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural*, 5 p.

Los costos de abastecimiento de estos vehículos son más bajos que los de gas comprimido y tienen mayor autonomía, pero presentan una importante limitación relacionada con el tiempo máximo de parada de los vehículos, que no puede ser superior a algunos días sin que se produzca una vaporización que obligue a despresurizar parcialmente el depósito. Por este motivo esta tecnología es aplicable solamente a flotas de utilización regular no aleatoria.

Durante los años 60 y 70 la utilización del GNL en automoción tuvo un cierto crecimiento. Posteriormente, su interés se redujo, debido sobre todo a la restringida disponibilidad del GNL. Actualmente esta forma del gas natural se está aplicando con éxito en E.E.U.U., con el soporte de empresas de suministro de gases criogénicos.

Gas natural comprimido (GNC)

El gas natural se almacena habitualmente comprimido a una presión de 200 bar. Los vehículos están equipados con depósitos reforzados para soportar estas presiones.

La autonomía conseguida es inferior a la de los combustibles líquidos, y los vehículos deben soportar el incremento de peso de los depósitos (cilindros) donde se almacena el gas. Los cilindros convencionales son de acero y por lo tanto su peso es relativamente elevado; no obstante, la nueva generación de cilindros reduce el espesor de acero mientras se refuerzan exteriormente con fibra de vidrio continua impregnada de resinas de poliéster, se consiguen así reducciones de peso del 40%.

La tecnología del GNC está totalmente resuelta, y es la forma más utilizada de aprovisionamiento de gas natural para vehículos.¹⁷

3.3 Ventajas del uso de Gas Natural en la actualidad

Las ventajas más notorias del uso de este combustible alternativo son las siguientes:

- Costos de Combustible
 - Emisiones – hasta 30% menos emisiones de CO₂ (en comparación con un motor ciclo Otto)
 - Grandes reservas en el mundo
 - Menor mantenimiento del motor
- Debido a la mayor duración de los lubricantes, las bujías de encendido y, en general, la vida del motor.

¹⁷ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

- Ahorro de combustible: ofrece ahorros de hasta un 30% menos que un Motor Diesel ordinario
- Los vehículos a gas natural producen la mitad del ruido que los vehículos diésel ordinarios, con lo que las entregas en la noche por las vías urbanas podrían ser habilitadas.
- Beneficios fiscales ¹⁸

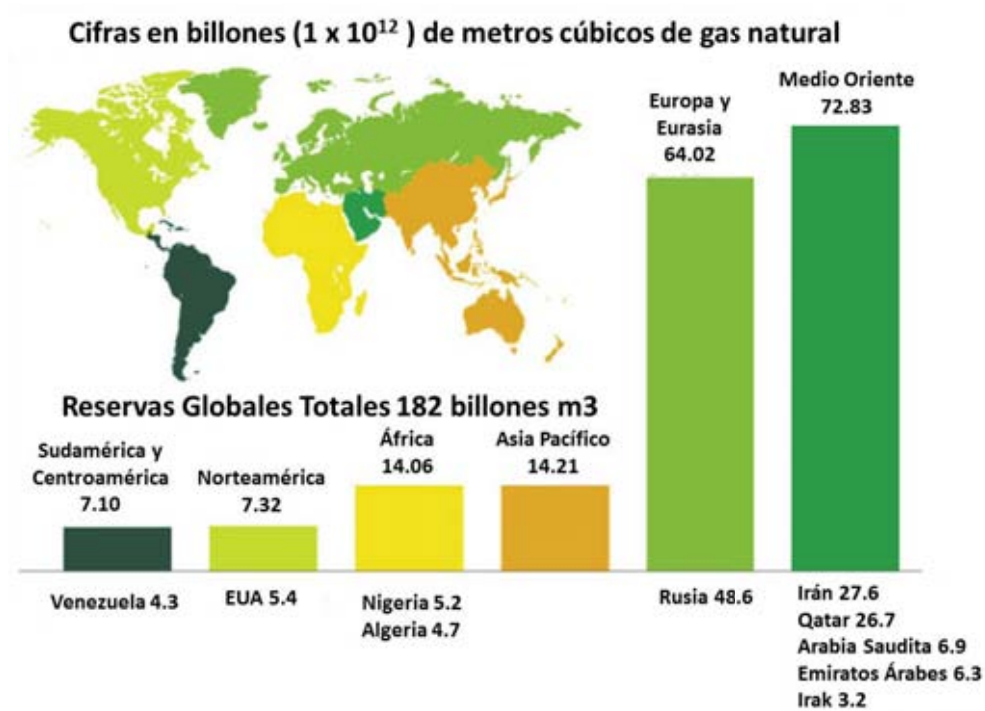


Fig. 3.1 Reservas mundiales de Gas Natural ¹⁹

3.4 Almacenamiento del Gas Natural

El gas natural vehicular es almacenado comúnmente en botellas fabricadas en acero sin soldadura, igualmente existen fabricadas con materiales más ligeros. Éste tipo de botellas almacenan el gas natural comprimido (GNC) a 200 bar de presión máxima.

En vehículos que vienen de fábrica a GNC suelen colocarse en la parte inferior del vehículo consiguiendo no disminuir la capacidad de la cajuela.

¹⁸ Información consultada de la empresa INDOX.

¹⁹ Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <https://paneff.files.wordpress.com/2014/12/reservas-globales-de-gas-natural.png?w=425&h=306>

En los autobuses urbanos, estos depósitos van generalmente dispuestos en el techo y pueden llegar a suponer hasta el 15% del peso total del vehículo.²⁰

Fig. 3.2 Botellas de gas natural en un automóvil común



3.5 Seguridad

La seguridad es un tema primordial al hablar de Gas Natural Vehicular. Tal y como demuestran las estadísticas, el uso de gas natural en vehículos es más seguro que el uso de gasolina y tan o más seguro que el de gasóleo.

Entre las características principales que brindan seguridad, destacan:

- El gas natural, al ser más ligero que el aire no tiene tendencia a acumularse en la cajuela u otros huecos de los vehículos como en el caso del GLP, o de los combustibles líquidos.
- El estrecho rango de mezcla combustible y su rápida dispersión en el aire hacen casi imposible una combustión de una potencial fuga, y en cualquier caso nunca crearía una piscina de fuego como los líquidos.
- El gas natural requiere temperaturas más altas para su ignición (unos 550°C) que la gasolina (unos 300°C).

Además, los tanques utilizados en los cilindros para almacenar gas natural vehicular son más resistentes que los de gasolina, no generan atmósferas explosivas, ya que el depósito es absolutamente hermético, y se les somete a exigentes pruebas que garantizan su excelente calidad, además de revisarse en la inspección periódica obligatoria por lo que se puede controlar su deterioro, cosa que no pasa con los depósitos de gasolina.²¹

²⁰ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

²¹ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

3.6 Situación actual mundial

En la tabla a continuación se puede observar la situación actual (abril 2010) de los países con mayor flota de vehículos a gas natural del mundo.

Argentina, Brasil, Irán y Paquistán tienen aproximadamente el 60% del total mundial de este tipo de vehículos.

Tabla 3.1 Situación actual del GNV en el mundo²²

País	Vehículos						Estaciones de servicio	
	Total	Veh. ligeros	Autobuses	Camiones	Otros	% del total en Mundo	Públicas	Privadas
Argentina	1.813.777	1.813.777	0	0	0	16,09%	1.851	0
Bangladesh	200.000	168.412	3.233	8.355	20.000	1,77%	500	0
Bolivia	122.812	122.812	0	0	0	1,09%	128	0
Brasil	1.632.101	1.632.101	0	0	0	14,48%	1.704	0
China	500.000	320.000	150.000	30.000	0	4,44%	1.453	199
Colombia	299.640	276.180	13.800	9.660	0	2,66%	485	0
Egipto	122.271	119.598	1.217	711	745	1,08%	115	4
India	700.000	680.380	12.000	715	6.905	6,21%	181	319
Irán	1.734.431	1.728.909	5.522	0	0	15,39%	1.058	21
Italia	676.850	673.350	2.300	1.200	0	6,00%	725	45
Paquistán	2.250.100	2.200.000	100	0	50.000	19,96%	3.000	0
Perú	81.029	81.018	11	0	0	0,72%	94	0
Rusia	100.020	84.000	2.000	14.000	20	0,89%	199	45
Tailandia	162.023	130.748	11.315	18.282	1.678	1,44%	366	25
USA	100.000	86.500	11.000	2.500	0	0,89%	816	0
Mundo	11.272.421	10.584.783	396.563	203.709	87.366	100,00%	15.132	1.648

Argentina es el país con más estaciones de servicio y es uno de los principales desarrolladores de la tecnología GNC, con más de 25 años de experiencia, siendo el principal fabricante de equipamiento, compresores y surtidores que son exportados a todo el mundo.

Este éxito con la tecnología GNC se debe a los siguientes factores:

- Disponibilidad de abastecimientos a costos razonables.
- Disponibilidad de infraestructura de redes suficientemente desarrollada.
- Disponibilidad de tecnología probada y accesible.
- Solución comercial integral que permite ahorros en plazos razonables.
- Altos estándares de calidad, control y servicios de postventa adecuados.
- Establecimiento por parte del Gobierno de políticas de fomento e incentivos.²³

²² Tabla obtenida de NGVAEurope.

²³ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

3.7 Conclusiones del Capítulo

Al finalizar este capítulo se describió el funcionamiento del gas natural como combustible vehicular, así como las ventajas y desventajas de los diferentes tipos dependiendo de su aplicación.

Por otra parte se analizaron las ventajas del uso del gas natural y la situación actual mundial. Cabe destacar que el contenido de este capítulo es clave para el proyecto, pues el gas natural es el combustible primario del Motor Dual-Fuel, y su modo de empleo, almacenamiento y medidas de seguridad son de gran utilidad para lograr un motor eficiente y por ende cumplir los objetivos de este proyecto.

CAPÍTULO 4: MOTOR DIESEL IMPLEMENTADO CON GAS NATURAL

El contenido de este capítulo tratará acerca del tema central de este trabajo de investigación, el “Motor Dual-Fuel”.

Inicialmente se hablará brevemente de la historia de este motor, desde su creación hasta los avances en los últimos años; posteriormente se explicará la operación del mismo, así como diversas consideraciones para su funcionamiento óptimo.

Por último se explicará el uso del motor dual-fuel en varios campos, dependiendo del tipo de aplicación requerida, así como diversos factores importantes a considerar como lo son las emisiones contaminantes. De igual modo se hará una comparación de este motor contra el motor diesel y el ciclo dual para tener un panorama más amplio de la materia.

4.1 Breve historia del Motor Dual-Fuel

La mayor parte del desarrollo de motores de combustión interna se basó en el uso de combustibles gaseosos. El uso extendido del gas de carbón en sus inicios alentó su uso en motores, a pesar de ser altamente tóxico y explosivo. Desafortunadamente, después del rápido éxito del motor de combustión interna de cuatro tiempos alimentado por líquido, los motores alimentados por gas tendieron a ser confinados a aplicaciones especiales.

En el año de 1901 Rudolf Diesel obtuvo una patente en los Estados Unidos de América cubriendo el concepto del motor dual-fuel. Una mezcla de combustible y aire tenía que ser comprimida a una temperatura por debajo de la temperatura de auto ignición. La ignición era producida través de la inyección de un segundo combustible más reactivo con una menor temperatura de ignición que el gas combustible.

Antes de la Segunda Guerra Mundial algunos motores dual-fuel fueron supercargados y otros operados con gas natural a alta presión que era inyectado directamente en el cilindro y posteriormente encendido por una inyección de combustible diesel.

Durante la Segunda Guerra Mundial existió gran actividad en el uso de combustibles gaseosos con aplicaciones en motores, debido a la escases de combustibles líquidos de buena calidad, especialmente en países como Alemania.

Después de la Segunda Guerra Mundial los motores dual-fuel fueron ampliamente usados para aplicaciones estacionarias especiales, principalmente para la generación de poder a través de la cogeneración y la producción de gas de alcantarillado, el cual era igualmente empleado como combustible para los motores.

En las últimas décadas, debido a las regulaciones internacionales contra la contaminación del aire, al incremento de precio en los combustibles en general y a la relativa reducida disponibilidad de combustibles líquidos de buena calidad, las aplicaciones de motores alimentados con gas empezó a incrementarse, principalmente en la generación de poder de estaciones eléctricas y en los sectores de vehículos comerciales.

Aunque estos sistemas trabajan adecuadamente, no tienen su operación suficientemente bien optimizada particularmente para la aplicación específica. Sin embargo, con el reciente incremento de incertidumbres alrededor de la dependencia de las fuentes de alimentación eléctrica, en conjunto con el incremento en la disponibilidad de suministros de gas natural baratos y relativamente abundantes, el incremento el precio del diesel y las limitaciones potenciales de sus suministros, y con los cada vez más estrictos controles de emisiones, se espera que el motor dual-fuel gane popularidad en los próximos años.²⁴

4.2 Operación del Motor Dual-Fuel

Este tipo de motores utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo. El gasóleo, que actúa como iniciador del proceso de combustión, se inyecta directamente a la cámara de combustión, mientras que el gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador o un sistema de inyección.

Cuando el vehículo está al ralentí, funciona con 100% gasóleo, mientras que a los grados de carga y regímenes de giro más elevados, la proporción de gasóleo puede estar comprendida entre el 5 y el 20%. En promedio, este tipo de motores puede consumir del orden de 60-70% de gas natural y 30-40% de gasóleo.

²⁴ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

Esta tecnología permite adaptar fácilmente motores diésel con sólo reducir su relación de compresión y sin necesidad de adaptarle un sistema de ignición.

El único inconveniente está en el repostaje de dos tipos de carburantes.

La operación satisfactoria de los motores dual-fuel depende de numerosas operaciones y variables de diseño que tienden a ser mejor en número que aquellas que controlan el rendimiento de una convencional chispa de ignición o motores diesel.

El nivel potencial de producción de energía y los niveles asociados a las emisiones de escape de motores operando en modo dual-fuel, dependerá de que bien los efectos del siguiente diseño y variables operacionales han sido tratados.

- El tipo de combustible usado, su composición y valor de calentamiento, las propiedades físicas y químicas del combustible, y sus variaciones con temperatura y presión.
- Temperaturas y presiones de admisión y escape, los valores de relación de equivalencia empleados, la presencia de cualquier diluyente en el combustible o aire suministrado, las características de autoignición, la energía de ignición y límites, y sus correspondientes variaciones con la relación de equivalencia y temperatura, y los límites operacionales de golpe.
- La asociada eficiencia volumétrica operacional cuando se emplea el estrangulamiento, turboalimentación y el alcance de la recirculación de gases de escape usados.
- Los valores de la relación de compresión, diámetro, carrera, geometría de la cámara de combustión, rango de velocidad del motor y cualquier actividad superficial del motor.

Es importante mencionar que la interacción entre el líquido combustible en aerosol y la carga gaseosa de combustible-aire premezclada durante la combustión es compleja. La inyección directa del combustible gaseoso dentro del cilindro representa una complejidad añadida, principalmente por el hecho que se necesita generar un gas suficientemente alto en presión e introducir el combustible gaseoso en el instante apropiado directamente en el cilindro.

El problema antes mencionado se estudia modelando la combustión dual-fuel, empleando dinámica de fluidos computacional en tres dimensiones (3D CFD).²⁵

Otros problemas presentes en los motores dual-fuel son las significantes reacciones de preignición debido a la aspereza y riqueza de la combustión, a causa de esto la

²⁵ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

presencia del efecto “knock” cuando existen cargas altas con ciertos combustibles y condiciones operacionales.

El efecto knock se define como el daño producido en las bielas del motor cuando se produce la combustión antes de lo debido, causada por una relación de compresión alta, el uso de un turbocompresor o demasiado avance del encendido.

Este efecto induce vibraciones a los componentes de la cámara de combustión, lo que conlleva a oscilaciones en las paredes externas, y que resulta en el sobrecalentamiento del cilindro y la superficie del pistón, llevando a una significativa pérdida de potencia y eficiencia con un incremento en las variaciones cíclicas y pérdida de calor, como se puede apreciar más claramente en la Figura 4.1.²⁶

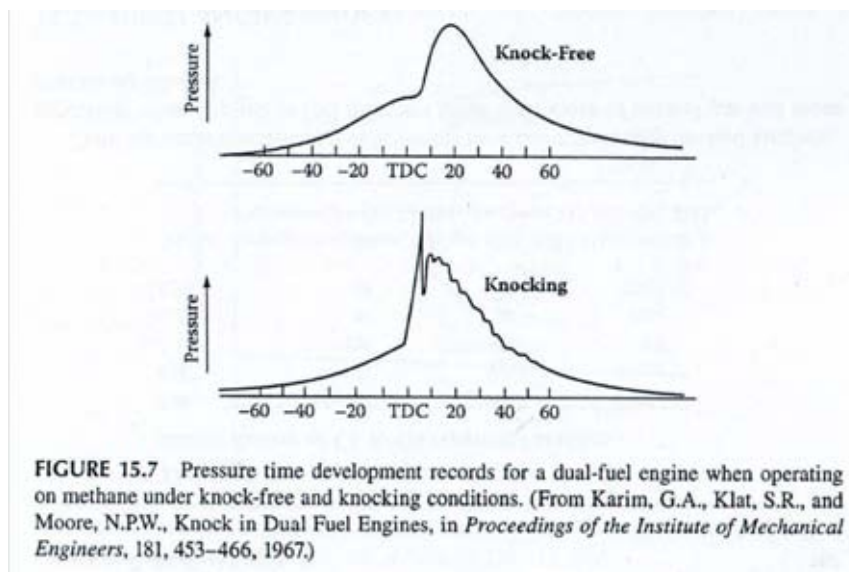


Fig. 4.1 Reacción del efecto “knock” en el motor dual-fuel operado a base de metano

Por otra parte, el interés principal del motor dual-fuel es la aplicabilidad casi inmediata del gas natural en grandes motores de vehículos pesados a un costo razonable. Por otro lado, la reducción de emisiones, principal argumento del uso del gas natural vehicular, si bien es sustancial en lo referente a partículas sólidas y humos negros, no lo es tanto en las emisiones gaseosas, que se reducen en una proporción más pequeña.²⁷

²⁶ Ghazi A. Karim. (2015). *Dual-Fuel Diesel Engines*. Florida, U.S.: CRC Press.

²⁷ Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

4.2.1 El Retardo de Encendido

En motores de compresión tipo diesel, el combustible líquido inyectado no puede encender instantáneamente, un cierto periodo de tiempo necesita transcurrir para llevarse a cabo la ignición. Este retraso en la ignición se debe a que ciertos requerimientos físicos y químicos deben satisfacerse, debido al tiempo necesitado para la inyección, atomización y evaporación del combustible líquido inyectado, y para el mezclado de cualquier vapor de combustible resultante con el aire antes de que las reacciones de fase del gas químico puedan empezar dentro del cilindro.

Un excesivo tiempo de ignición puede provocar la reducción de salida de potencia, baja eficiencia, aumento de emisiones y altas tasas de aumento de la presión, debido principalmente por la inyección de grandes cantidades de combustible.

El instante de ignición en motores puede ser establecido por medio de un número de enfoques que varían en complejidad. Un enfoque común es por medio de la examinación de los cambios en la presión del cilindro o los registros de desarrollo de la tasa de presión – tiempo.

Un enfoque igualmente efectivo es determinar el punto de ignición de la correspondiente tasa de liberación de calor cuando el comienzo de la ignición es asociado con el instante cuando la tasa se vuelve positiva.

En la premezcla homogénea que ocurre en los motores dual-fuel, la introducción del combustible gaseoso con el aire de entrada produce variaciones en las propiedades físicas y de transporte de la mezcla, como en la relación calorífica específica, y en un menor grado, los parámetros de transferencia de calor. Igualmente modifica la actividad de las reacciones de preignición y la energía liberada asociada.

Por otra parte, el retardo en el encendido de los motores dual-fuel es significativamente diferente al mismo observado en un motor de operación diesel. El retardo tiende a incrementar inicialmente con el aumento en la admisión del combustible gaseoso hasta un valor máximo detectable, para después descender a un mínimo antes de alcanzar la relación total estequiométrica, basado en los gases combinados, líquidos combustibles y el aire disponible.

Al emplear la recirculación de gases de escape (EGR), o la presencia de gases diluyentes como el dióxido de carbono o el nitrógeno en el combustible gaseoso o en el aire, dentro de una carga del motor puede producir diferentes cambios al estado de la mezcla durante la compresión.

Por consiguiente, para obtener el mejor desempeño del motor dual-fuel, es recomendable optimizar las características de inyección del piloto para la operación dual-fuel de la mezcla gaseosa combustible-aire, en vez de mantener la operación

puramente diesel. Esto es posible debido a la confianza generalizada del sistema de inyección “common rail”, empleado en motores diesel convertidos a operación dual-fuel.

La actividad de las reacciones de preignición es ampliamente diferente para los componentes de hidrocarburos superiores del vapor del combustible del piloto que para el aire premezclado del componente de combustible gaseoso, tal como el metano o el hidrógeno. Esto se puede ver reflejado en las reacciones complejas de ignición de varias etapas, en donde los hidrocarburos superiores inician la ignición a niveles mucho menores de temperatura que el combustible gaseoso, hecho que puede traer cambios significantes locales a los índices generales de las reacciones de preignición y a las tasas de liberación de energía asociada.

Aunado a lo anterior, la longitud del retraso de ignición en un motor dual-fuel es afectado en gran medida por la presencia de combustible gaseoso con el aire durante la ignición del combustible líquido piloto.

Además, una reducción leve en la temperatura puede incrementar el retraso de ignición substancialmente, debido a que el mismo es muy sensible a la temperatura. A temperaturas de admisión muy bajas, especialmente en cantidades piloto pequeñas y a cargas de motor ligeras, se produce un aumento en el funcionamiento errático del motor que pudiera incluso conducir al fallo de la ignición o encendido.

Por otro lado, al avanzar el tiempo de inyección del piloto generalmente lleva a la pronta ignición del motor. Hoy en día existen mejoras en el avance del piloto de inyección, sin embargo, son bastantes limitadas y pueden conducir al fallo de la ignición.

La energía liberada por el piloto es complementada con la energía liberada del combustible y el aire, que ayuda a incrementar el nivel de temperatura en general, así como a asegurar el correcto mezclado de los productos de combustión.

Los efectos de cualquier liberación de energía debido a reacciones de preignición durante la compresión contribuirán a los procesos de ignición del piloto, carga térmica, eficiencia, poder de salida y a las emisiones.²⁸

²⁸ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

4.2.2 Límites de Propagación de la Llama

El desempeño del encendido por compresión de un motor dual-fuel mejora con el incremento en la admisión del combustible gaseoso o con el tamaño relativo del piloto. Esta mejora aparece ser dependiente de la relación de equivalencia total, basado tanto en el piloto diesel como en el combustible gaseoso.

En un proceso de combustión se tiene un límite operacional de la mezcla para una correcta propagación de la llama dentro del límite de tiempo disponible desde los centros de ignición del piloto en la mezcla gas-aire circundante. Si el tiempo no es el apropiado se genera una combustión incompleta, expulsándose a la salida una cantidad substancial de monóxido de carbono y combustible no convertido o aprovechado.

Para evitar que suceda lo anterior, en los motores dual-fuel, se debe de establecer un límite en la concentración volumétrica del combustible gaseoso que represente la concentración mínima en la cual la llama de propagación aparece, justo para empezar a propagar virtualmente en toda la carga del cilindro dentro del tiempo disponible. Este límite para cada específico motor se debe de determinar experimentalmente.

De igual manera, la temperatura efectiva frente a la llama de la carga pobre del cilindro en el caso de motores dual-fuel encendidos por compresión puede ser considerada ser aproximadamente proporcional a la temperatura en el punto muerto superior, incrementada fraccionalmente debido a la combustión del piloto. Algunos de los resultados experimentales a base de metano muestran que esta fracción es alrededor del 40% del calor liberado por el piloto, como se puede apreciar en la Figura 4.2.²⁹

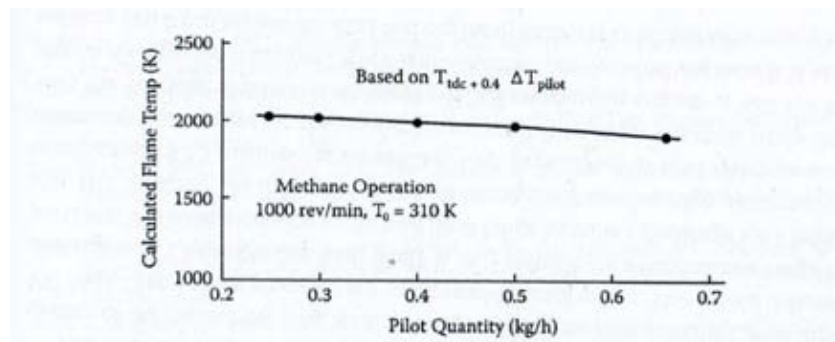


FIGURE 13.5 Variation of the calculated corresponding flame temperature mixture conditions with changes in the pilot quantity for methane operation in air. (From Bade Shrestha, O.M. and Karim, G.A., *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 128, 223–228, 2006.)

Fig. 4.2 Variación de la temperatura de la flama vs los cambios en la cantidad de piloto para una operación de metano

²⁹ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

4.3 Empleo de los Motores Dual-Fuel

El motor dual-fuel es particularmente atractivo donde el combustible gaseoso es considerado superfluo, como en las minas de carbón o en los gases residuales del proceso de refinado. La conversión requiere relativamente poca inversión con bajos costos de combustible, buena durabilidad y bajo mantenimiento.

Otro campo de aplicación es el uso de los motores dual-fuel estacionarios en la explotación de biogás de aguas residuales. Dichas instalaciones a través del adecuamiento de calderas de gas de escape pueden calentar el material lodoso y mejorar la proporción de producción de gas.

Igualmente, los motores dual-fuel pueden ser dispuestos en forma de patines empacados montados para servir como mini instalaciones de producción de energía, las cuales pueden ser transportadas fácilmente y pueden operar sobre los suministros de combustible y energía eléctrica disponible localmente.

Los motores dual-fuel en general son adecuados para aplicaciones multicilíndricas teniendo una capacidad de alto rendimiento, lo cual los hace atractivos tanto operacional como económicamente, mientras se mantiene la flexibilidad de revertir totalmente la operación diesel. Inclusive con los ajustes debidos se puede hacer que funcionen con un rango de combustibles gaseosos en un rango amplio igualmente de características de combustible.³⁰

³⁰ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

4.3.1 Clean Air Power Company

Clean Air Power es una compañía estadounidense conocida en todo el mundo principalmente por sus conversiones de motores Diesel a motores Dual Fuel.

Lo que realiza esta compañía es tomar los motores diesel sin modificar su arquitectura básica, solo le agrega una ECU (por sus siglas en inglés, engine control unit o en español, unidad de control de motor) externa en conjunto con un sistema de inyección a gas natural. Las temperaturas y presiones permanecen dentro de los límites de la operación diesel, por lo que el motor Dual Fuel opera con los parámetros iniciales del motor.

La combustión en estos motores se efectúa de la misma manera como se pretende aplicar en este proyecto, por lo que de esta manera se tiene un punto de referencia suficientemente válido.

El principio de combustión en los motores Dual Fuel de esta compañía se basa en hacer trabajar los inyectores de diesel como bujías, es decir, al comprimir una mezcla aire/gas hasta el límite dentro de la cámara de combustión y después inyectar el combustible diesel, éste actúa como una chispa, creándose un proceso de combustión más eficiente comparándolo con el convencional puramente diesel. Cabe mencionar que el gas natural puede llegar a formar hasta el 90% de la mezcla total.

Los inyectores de gas son controlados electrónicamente por la ECU e instalados en el colector de entrada de aire del motor.

Los motores Dual Fuel ofrecidos por esta compañía son capaces de operar ya sea con gas natural comprimido o con gas natural licuado, ofreciendo el mismo desempeño, lo que representa una gran ventaja en el competitivo mercado internacional.³¹

³¹ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.cleanairpower.com/howitworks.html>

4.4 Comparación del Motor Diesel vs Motor Dual-Fuel

El Motor dual-fuel tiene grandes ventajas sobre el motor diesel en muchos aspectos, razón por la que es atractiva su conversión a este combustible.

Una de las ventajas más significativas es su eficiencia en la combustión, hecho que se puede apreciar en la Figura 4.3, en donde al comparar la variación del consumo específico de energía de freno contra el porcentaje de carga completa, se puede apreciar claramente el rendimiento superior del motor dual-fuel operado con gas natural en comparación con la correspondiente operación diesel.

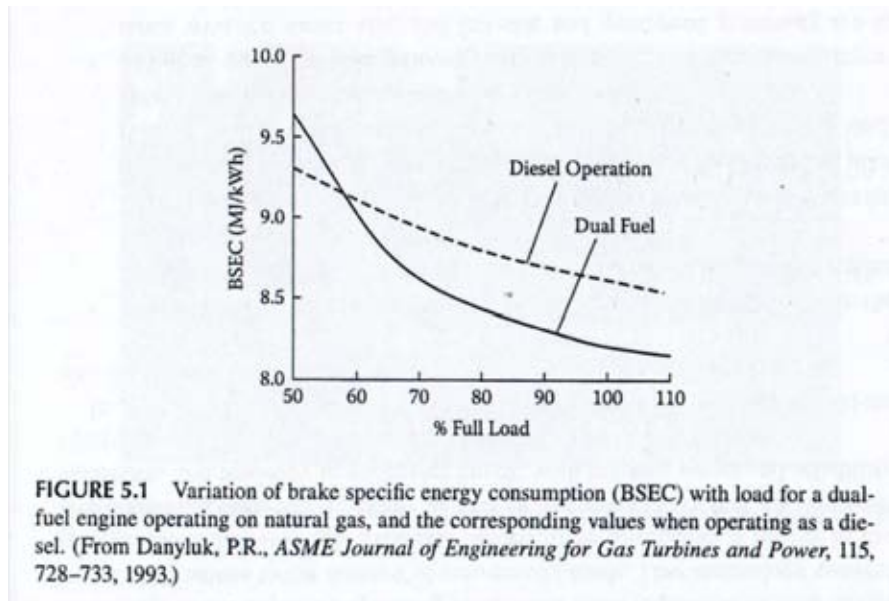


Fig. 4.3 Variación del consumo específico de freno con carga ³²

Cabe mencionar que la variación del consumo específico de freno es una medida del rendimiento de combustible de cualquier motor primario que quema combustible y produce energía ya sea rotacional o de eje. Usado comúnmente para comparar la eficiencia de motores de combustión interna.

³² Ghazi A. Karim. (2015). *Dual-Fuel Diesel Engines*. Florida, U.S.: CRC Press.

4.5 Comparación del Ciclo Diesel vs Ciclo Dual

En este apartado se hará una comparación gráfica entre el ciclo diesel y el ciclo dual, para así apreciar sus diferencias y poder aprovecharlas en el proyecto.

Es importante mencionar que el Ciclo Dual es la combinación del Ciclo Otto y el Ciclo Diesel.

En la Fig. 4.4 se muestra el diagrama P-V del Ciclo Diesel, en donde a continuación se describirá lo que sucede:

- 1 – 2 Compresión adiabática reversible (Isentrópica)
- 2 – 3 Trayectoria isobara donde entra calor ($q_{entrada}$)
- 3 – 4 Expansión adiabática reversible (Isentrópica)
- 4 – 1 Trayectoria isocora donde se cede calor (q_{salida}) y la presión disminuye

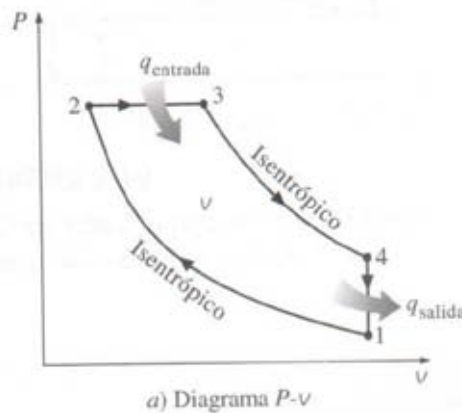


Fig. 4.4 Diagrama P-V del Ciclo Diesel³³

A modo de comparación en la Fig. 4.5 se muestra el diagrama P-V del ciclo Dual, el cual se describirá a continuación:

- 1 – 2 Compresión adiabática reversible (Isentrópica)
- 2 – X Trayectoria isocora donde entra calor ($q_{entrada}$) y la presión aumenta
- X – 3 Expansión isóbara donde entra calor ($q_{entrada}$)
- 3 – 4 Expansión adiabática reversible (Isentrópica)
- 4 – 1 Trayectoria isocora donde se cede calor (q_{salida}) y la presión disminuye

³³ Yunes A. Cengel y Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

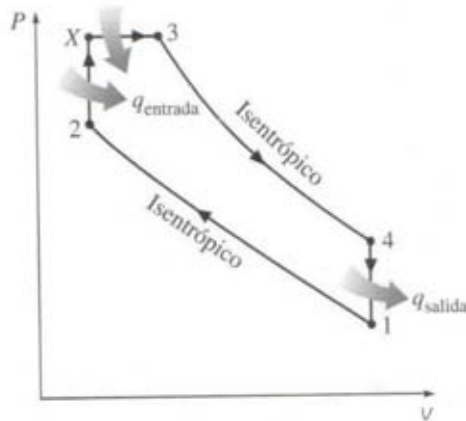


Fig. 4.5 Diagrama P-V del Ciclo Dual ³⁴

Posterior a describir ambos ciclos se puede apreciar que el Ciclo Dual es superior al Ciclo Diesel, ya que incorpora un proceso adicional isocórico donde entra mayor calor al sistema y por lo tanto la eficiencia del ciclo aumenta.

4.6 Emisiones Contaminantes

El motor dual-fuel además de presentar las ventajas antes mencionadas, es un motor que produce emisiones bajas en monóxido de carbono (CO), a causa del bajo contenido de carbono en el combustible y de la baja temperatura proveniente de los gases de escape.

Igualmente, aquellos motores que emplean el gas natural como combustible son capaces de conseguir niveles de óxidos de nitrógeno (NOx) al nivel de motores de gasolina altamente calificados, y bajar de un 50% a un 80% los niveles NOx producidos por los motores diesel.

Tomando un conjunto las emisiones totales de hidrocarburos, éstas tienden a ser 2 o 3 veces mayor que la de los motores a gasolina con control de emisiones, sin embargo, una gran fracción de éstos hidrocarburos no quemados (HC) lo conforma el metano, el cual no es activo fotoquímicamente.

Por otra parte el total de hidrocarburos no-metano (NMHC) está normalmente por debajo de los niveles de emisión de motores similares a gasolina.

³⁴ Yunes A. Cengel y Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

Las regulaciones ambientales en el mundo varían de país en país dependiendo de diversos factores, no obstante, todas ellas evalúan las emisiones en gr/km, de aquellos elementos como son los HC, CO y NOx.

A continuación se presenta en la Figura 4.6 una comparación de las emisiones contaminantes producidas tanto por la gasolina, el diesel y el gas natural.³⁵

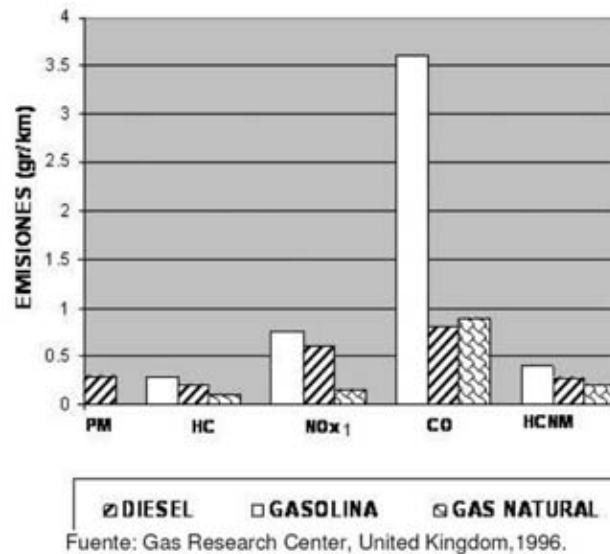


Fig. 4.6 Comparación de las emisiones contaminantes de diferentes combustibles automotrices

³⁵ Nereo Juárez Castillo (2006). *Diseño de un Sistema Combustible bajo la tecnología Dual-Fuel para unidades DINA 55119080* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo.

4.7 Ciclo Sabathé

El ciclo Sabathé ocurre cuando existe la utilización conjunta de un diésel 2 con un alto índice de Cetano y fácilmente inflamable, con Gas Natural, difícil de encender y fácil de quemar.

Este ciclo termodinámico se sitúa entre el ciclo Diesel y el ciclo Otto.

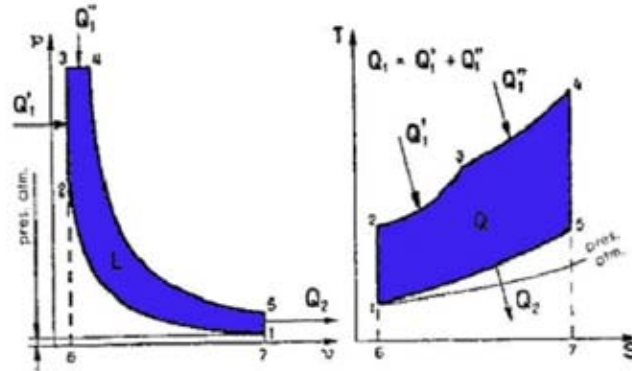


Fig. 4.7 Ciclo Sabathé³⁶

El Ciclo Sabathé, al producir un incremento del área por ensanchamiento de presión y volumen, incrementa el trabajo obtenido y permite alcanzar mejores rendimientos.

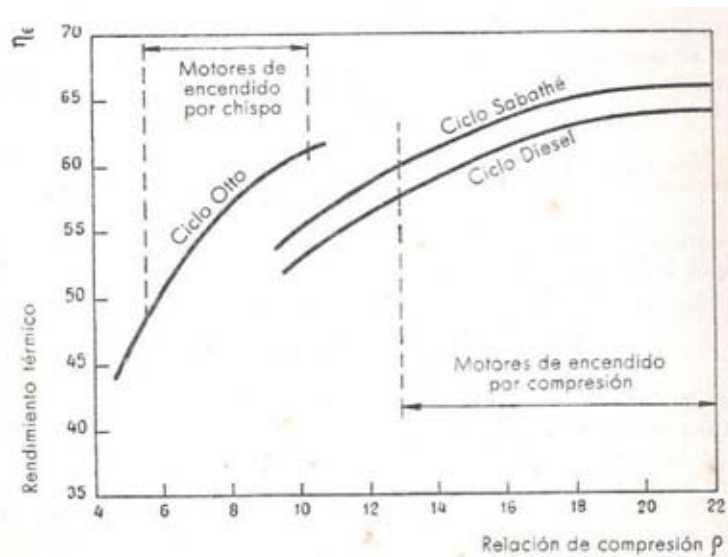


Fig. 4.8 Comparación de rendimientos de ciclos termodinámicos³⁷

³⁶ Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural*, 5 p.

³⁷ Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural*, 5 p.

En la Figura 4.8 se observa que en el ciclo Sabathé, con las mismas relaciones de compresión del diesel y las condiciones de explosión del Ciclo Otto, el rendimiento resultante es mayor, lo que resulta una ventaja para la conversión de los motores diésel para operar en forma mixta con gas natural.

En el diseño de los inyectores se puede y debe aprovechar la energía cinética del gas natural para favorecer la formación de llama y turbulencia en el interior del cilindro, que representa el reactor o cámara de combustión.³⁸

4.8 Conclusiones del Capítulo

Para finalizar el capítulo se puede comentar que se describió tanto un poco de historia del motor dual-fuel como en que consiste su funcionamiento a detalle, así como las aplicaciones de importancia que tiene este tipo de motor en la industria.

Igualmente se realizaron dos comparaciones del motor dual-fuel vs el motor diesel y el ciclo Dual, para ver con más claridad los puntos de mejora que aprovecha el Motor Dual-Fuel para mejorar la eficiencia del mismo, como es en el caso de las emisiones contaminantes, solo por mencionar un ejemplo.

³⁸ Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural*, 5 p.

CAPÍTULO 5:

CASO DE ESTUDIO

Objetivo del capítulo

Plantear los cambios y opciones necesarias para llevar a cabo la operación dual-fuel en el motor diesel a emplear, de igual modo proponer una solución desde el punto de vista químico, así como diseñar una propuesta de banco de pruebas para el mismo motor.

Especificaciones del motor

Modelo	CA4DC2-10E3
Fabricante	FAW Deutz
Tipo	Turbocargado & After-cooled
Desplazamiento (L)	3.168
Diámetro (mm)	98*105
Potencia/velocidad nominal (kW/rpm)	76/3200
Par/velocidad (N.m/rpm)	245/2000
Sistema de combustible	common rail electrónico
Consumo de gasolina (g/kW.h)	200
Ruido (dB(A))	≤92
Emisiones	Euro III
Peso neto (kg)	260
Tamaño (mm)	791*784*796mm
Relación de compresión	18:01

Opciones de Conversión

En la actualidad es más económico convertir un camión de diésel al uso de gas natural que comprar un camión nuevo a gas natural.³⁹

Para convertir los motores de Diésel a Diésel/gas se deben de modificar, existiendo varias posibilidades hoy en día. Durante este trabajo de investigación se mencionarán las tres más viables.

³⁹ Información consultada de la empresa OMNITEK.

La **primera alternativa** consiste en convertir el motor al ciclo Otto (obteniendo relaciones de compresión más altas que las utilizadas con combustibles líquidos), instalando un sistema de bujías que provoque una chispa en el momento de inyección (conversión del motor a operación mixta o dual).⁴⁰

Para este tipo de conversión de sistemas se requiere:

- Instalar pistones de baja compresión para el gas natural
- Instalar válvulas y asientos de válvulas para alta temperatura
- Modificación de las cabezas de cilindros para la instalación de bujías de alta duración en conjunto con bobinas de energía alta
- Instalar inyecciones de combustible
- Instalar sistema de ignición
- Instalación de tanques para gas natural
- Instalación de cuerpo de aceleración
- Reducción de la relación de presión del motor
- Modificación, cambio o adecuación del sistema de turboalimentación ⁴¹

La **segunda alternativa** consiste en instalar inyectores duales, los cuales puedan inyectar tanto diesel como gas natural pero en tiempos diferentes, es decir, primero se inyectaría diesel a la mitad de la carrera del pistón para llegar al punto muerto superior en la etapa de compresión, y posteriormente cuando se haya comprimido la mezcla diesel/aire y empiece a hacer ignición, inyectar el gas natural para completar el proceso de combustión.

De esta manera la combustión sería más eficiente, al quemarse la totalidad del combustible, sin embargo, la problemática recae en la presión con la que se inyectaría el gas natural, ya que ésta debe ser considerablemente mayor a la presión de compresión de la mezcla diesel/aire en la cámara de combustión sino se quiere tener el peligroso efecto de una contrapresión.

La **tercera alternativa** consiste en instalar ya sea un mezclador en la admisión del motor o una serie de inyectores específicos para el gas natural en el colector de aire, de esta manera entrará a la cámara de combustión no solo aire, sino una mezcla de aire con gas natural para posteriormente mezclarse con el diesel y así formar una mezcla ideal para efectuar la combustión, manteniendo el principio de encendido del motor diesel.

⁴⁰ Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural*, 5 p.

⁴¹ Información consultada de la empresa Omnitek.

Siendo esta tercera alternativa a la que se le va a dar un mayor enfoque en este trabajo, debido principalmente a que no se necesitan realizar cambios tan drásticos ni costosos en la estructura original del motor diesel.

El problema con esta propuesta reside en que parte de la admisión instalar el mezclador, debido a la diferencia de presiones con el turbocargador. No obstante, se tiene de la literatura que la inyección debe de estar más allá de la salida del compresor.

Por otra parte hay que tener en cuenta ciertos puntos para que la conversión sea costeable, ya sea a corto o largo plazo, como los siguientes:

- La conversión necesita no ser muy costosa y pretender producir un motor que tenga un consumo de energía específico en conjunto no excediendo aquel asociado con la operación como un diesel.
- El correspondiente poder de salida, el alcance y el modo de los gases de escape necesita no ser inferior a aquellos asociados con una operación normal diesel.
- La eficiencia volumétrica del motor no deberá ser reducida por la añadidura del sistema de suministro del combustible gaseoso.

Posterior a realizar dichas modificaciones la vida del motor se extendería, el consumo específico energía/combustible disminuiría, igualmente, la potencia del motor y los rangos de velocidad se mantendrían alrededor de aquellos valores asociados con la operación diesel, las emisiones contaminantes de escape disminuirían.

En el caso de motores dual-fuel turbocargados, la operación del motor proporcionaría un suplemento al poder efectivo sobre todo el rango operacional.

Dependiendo de la aplicación del motor dual-fuel, la inversión de la conversión podría ser recuperada en un tiempo aproximado de 8 años o menos, dependiendo igualmente del tipo del motor, modo de conversión, combustible gaseoso empleado y factor de carga promedio.⁴²

Conversión Elegida

Para solucionar la problemática propuesta se analizaron las alternativas de conversión anteriores, teniendo en cuenta diversos factores como el costo, dificultad, materiales, uso en la industria, entre otros.

La conversión elegida fue la tercera alternativa mencionada anteriormente. Para completar esta conversión existen dos opciones para introducir el gas natural al motor, una se basa en instalar un mezclador en la admisión del motor y la otra en instalar inyectores específicos para gas natural en el colector de aire; ambas opciones con la finalidad de inyectar el gas natural previo a la combustión principal de un modo

⁴² Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

uniforme, en consecuencia, llegará a la cámara de combustión una mezcla rica aire/gas.

Cabe mencionar que además de estas adecuaciones agregadas al motor, se tendrá que modificar la ECU del mismo, o en su caso comprar una nueva; con la finalidad de que la computadora del motor sepa cuál es el momento óptimo para inyectar el gas natural en el sistema y poder realizar una combustión completa.

Por otra parte, el principio de combustión permanecerá igual, con el único cambio que ahora el diesel tendrá el papel de una bujía, ya que al inyectarse y mezclarse con la mezcla aire/gas se producirá la combustión, debido a las condiciones existentes en el entorno.

Lo anterior se puede fundamentar con las temperaturas de autoignición de los combustibles. El diesel posee una temperatura de autoignición de 257 °C aproximadamente, mientras que el gas natural tiene una de 537 °C, aunado a esto la temperatura aproximada en la cámara de combustión de un motor diesel es de 750 °C al presentarse la reacción química, por lo que al efectuarse la combustión del diesel será suficiente para encender el gas natural existente en la cámara y de esta manera se hará una combustión más eficiente y menos contaminante.

Proporción de combustibles a inyectar

Al tener un motor dual-fuel como proyecto, un punto de vital importancia es conocer en qué proporción se va a inyectar tanto el diesel como el gas natural para lograr una combustión óptima y por ende extraer la mayor cantidad de potencia al motor.

Es por eso que se investigó profundamente en la literatura acerca de este tema. Se encontró que la proporción del diesel va del 10 al 20% y la del gas natural del 80 al 90%, dependiendo en mucho del factor de carga y las especificaciones de cada motor.⁴³

Hay que tener en cuenta que como hoy en día no se tienen regulaciones sobre el gas natural, es difícil saber con certeza en qué proporción viene cada compuesto del mismo, razón por la cual se tiene que instalar un sensor en el motor que monitoree la composición de la mezcla en la cámara de combustión para evitar que suceda el peligroso efecto “knock”.

43

- Víctor Alfredo Aybar Chávez (2005). *Modelación Matemática de un Motor de encendido por chispa que utiliza Gas Natural como combustible* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Información consultada de la empresa Clean Air Power.
- Nereo Juárez Castillo (2006). *Diseño de un Sistema Combustible bajo la tecnología Dual-Fuel para unidades DINA 55119080* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo.

Admisión del Motor

La admisión del motor diesel empleado funciona de la siguiente manera:

Todo inicia al entrar el aire del ambiente por el sistema, succionado por el motor.



Fig. 5.1 Admisión de aire hacia el sistema

Primero pasa por el filtro de aire, donde se limpia de cualquier tipo de impurezas, después sigue por los conductos hasta llegar al turbocargador, lugar donde de ser un fluido con mucha velocidad y poca presión se convierte a uno alto en presión y bajo en velocidad.

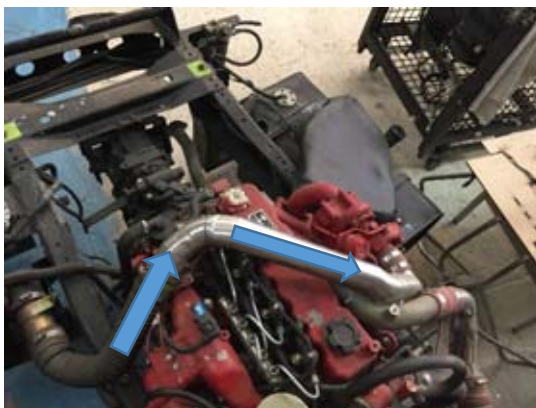


Fig. 5.2 Camino del aire con hacia el turbocargador



Fig. 5.3 Llegada del aire al turbocargador

Posteriormente sigue los conductos hasta llegar al dispositivo llamado “Intercooler”, encargado de disminuir la temperatura del fluido, en este caso el aire, y por ende volverlo rico en oxígeno.



Fig. 5.4 Llegada del flujo de aire al Intercooler

Finalmente al ya haberse disminuido la temperatura, el fluido se dirige a la cámara de combustión, donde su proporción a inyectarse es controlada por las válvulas de admisión para así poder efectuar la combustión del motor.



Fig. 5.5 Salida del flujo de aire del Intercooler



Fig. 5.6 Llegada del flujo de aire al Plenum

Hay recordar que no solo se inyecta aire en la cámara de combustión, falta un ingrediente más llamado diesel.

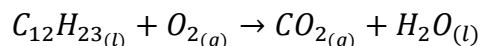
El camino del combustible inicia en el tanque donde se almacena el mismo, por medio de la bomba de combustible es impulsado desde esta área hasta los inyectores, por una serie de mangueras. Ya que el combustible llega a los inyectores, es la computadora del motor (ECU) quien decide cuándo y que cantidad inyectar (mediante el tiempo de apertura) en la cámara de combustión por medio de un impulso eléctrico, para así conseguir una combustión óptima. Es importante mencionar que el combustible es inyectado a muy alta presión, para que de esta manera se mezcle uniformemente con el aire que se encontrará en la cámara.

Los motores hoy en día cuentan con un sistema de preinyección, el cual tiene como objetivo inyectar poca cantidad de diesel previo a la combustión principal, con el fin tanto de suavizar el incremento de presión en la inyección principal como para reducir el ruido de la combustión, sin dañar el motor.

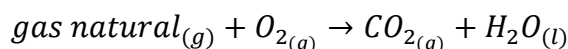
Cálculos de Estudio

Desarrollo teórico para obtener la fórmula química principal de la investigación, la cual será empleada para conocer la proporción adecuada de diesel y gas en el motor y así obtener un funcionamiento óptimo del mismo.

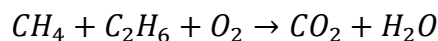
Ecuación química de la combustión del diesel



Ecuación química aproximada de la combustión del gas natural



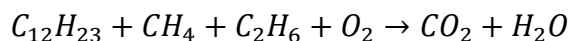
Debido a que el gas natural posee una gran cantidad de componentes, se aproximará una fórmula con aquellos elementos que posee en mayor proporción.



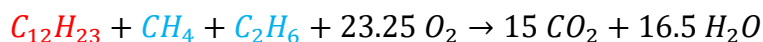
A continuación se describirá en que cantidad están presentes los compuestos químicos típicos más representativos que conforman el gas natural.⁴⁴

Compuesto químico	Fórmula química	Porcentaje presente en el gas natural
Metano	CH_4	95%
Etano	CH_2	3.2%
Total		98.2%

Fórmula química de la reacción



Efectuando balanceo químico para cumplir la ley de la conservación de la masa



$$\begin{aligned} 15 - C - 15 \\ 33 - H - 33 \\ 46.5 - O - 46.5 \end{aligned}$$

⁴⁴ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <https://www.uniongas.com/about-us/about-natural-gas/Chemical-Composition-of-Natural-Gas>

Donde el color rojo representa el compuesto **diesel** y el color azul los compuestos que conforman el **gas natural**.

Primera Iteración CO_2

Como primera iteración se suministrará de la cantidad total un 40% de diesel y un 60% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}45L \times 0.40 &= 18L \text{ (diesel)} \\45L \times 0.60 &= 27L \text{ (gas natural)}\end{aligned}$$

Para obtener los kmol de CO_2 después del proceso de combustión es necesario realizar las siguientes operaciones:

Diesel

$$18L C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol diesel}{157 kg} = 1.4308 kmol CO_2$$

Metano

$$0.95 (27L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol CH_4}{16 kg} = 0.0157 kmol CO_2$$

Etano

$$\begin{aligned}0.032 (27L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg} \\= 0.0005 kmol CO_2\end{aligned}$$

Ya obtenidos los kmol se puede obtener la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales), para así comparar con el dato experimental y poder saber qué tan eficiente está siendo el motor.

Ley de los gases ideales

$$PV = nRT$$

Despejando P

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(1430.8 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 2667.59 \text{ atm}$$

Metano

$$P = \frac{(15.7 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 29.4016 \text{ atm}$$

Etano

$$P = \frac{(0.5875 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.0953 \text{ atm}$$

Primera Iteración H_2O

Ahora se debe de calcular la parte correspondiente al H_2O , por lo que como primera iteración se suministrará de la cantidad total, un 40% de diesel y un 60% de gas natural. El automóvil tendrá el tanque de 50L, fijado desde el inicio, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 45L \times 0.40 &= 18L \text{ (diesel)} \\ 45L \times 0.60 &= 27L \text{ (gas natural)} \end{aligned}$$

Para obtener los kmol de H_2O después del proceso de combustión es necesario realizar las siguientes operaciones:

Diesel

$$18L \text{ } C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol diesel}}{157 \text{ kg}} = 1.5739 \text{ kmol } H_2O$$

Metano

$$0.95 (27L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 kg}{m^3} * \frac{16.5 kmol H_2O}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol CH_4}{16 kg} \\ = 0.0173 kmol H_2O$$

Etano

$$0.032 (27L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{16.5 kmol H_2O}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg} \\ = 0.0006 kmol H_2O$$

Ya obtenidos los kmol se puede obtener la presión de salida de cada compuesto.

Ley de los gases ideales

$$PV = nRT$$

Despejando P

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(1573.9 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 2934.3896 atm$$

Metano

$$P = \frac{(17.3 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 32.2542 atm$$

Etano

$$P = \frac{(0.6462 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.2047 atm$$

***El resto de los cálculos se encuentra en los anexos.**

Tabla de Resultados por parte del CO_2

Iteración	Concentración de Gas Natural	Concentración de Diesel	Presión de salida con respecto al Diesel [atm]	Presión de salida con respecto al Metano [atm]	Presión de salida con respecto al Etano [atm]	Presión de salida total de CO_2 [atm]
Primera	60%	40%	2667.59	29.401	1.095	2698.086
Segunda	70%	30%	2000.508	34.305	1.277	2036.09
Tercera	80%	20%	1333.796	39.152	1.460	1374.408
Cuarta	90%	10%	666.898	43.999	1.642	712.539

Tabla de Resultados por parte del H_2O

Iteración	Concentración de Gas Natural	Concentración de Diesel	Presión de salida con respecto al Diesel [atm]	Presión de salida con respecto al Metano [atm]	Presión de salida con respecto al Etano [atm]	Presión de salida total de H_2O [atm]
Primera	60%	40%	2934.389	32.254	1.204	2967.847
Segunda	70%	30%	2200.745	37.661	1.405	2239.811
Tercera	80%	20%	1467.101	43.067	1.606	1511.774
Cuarta	90%	10%	733.457	48.474	1.807	783.738

Propuesta del Banco de Pruebas para el motor

Para poder realizar una comparación concisa y acertada es conveniente tomar el motor diesel y montarlo en un banco de pruebas.

El banco de pruebas se define como una herramienta con la finalidad de poner a prueba un motor con ensayos de durabilidad y carga, obteniendo datos importantes como son los valores relativos al par de motor, la potencia desarrollada, el consumo específico de combustible, la composición de los gases de escape, entre otros.



Fig. 5.7 Banco de pruebas demostrativo ⁴⁵

Para poder realizar dichas pruebas se necesita de varios elementos: Como primer elemento se debe agregar un freno dinamométrico, el cual debe estar unido a la transmisión. Este freno será el encargado de crear un par resistente, brindando las diversas cargas propuestas al motor.

En la parte del escape del motor, se debe de agregar un analizador de partículas, el cuál será capaz de analizar la composición de los gases de escape, así como sus respectivas presiones para su subsiguiente uso.

Por parte del motor, éste debe contar con un sistema de refrigeración adecuado para soportar las diversas pruebas.

Es relevante mencionar que el banco de pruebas debe poseer una cimentación capaz de absorber las vibraciones del motor y soportes para montar y fijar el motor, así como para regular la altura y poder alinear el motor con el freno.

⁴⁵ Imagen consultada de la siguiente dirección electrónica:

- https://www.testsystems24.com/fileadmin/fotodatenbank/test_systems/keyvisuals/Motor/engine_test_bench_Nuernberg-14.jpg

Finalmente la sala en donde se encuentre el banco de pruebas debe estar correctamente ventilada para evitar el sobrecalentamiento del área por la radiación de calor emitida por el motor.⁴⁶

Fig. 5.8
Ubicación del
Freno
Dinamométrico



Fig. 5.9 **Ubicación del**
Analizador de Partículas

Al convertir el motor diesel a la operación dual-fuel, previo a montarlo en el banco de pruebas, se deben de instalar una serie de inyectores en el colector de aire para dar entrada al gas natural en el sistema. Los inyectores se deben colocar de una manera simétrica, de tal manera que el gas natural se distribuya uniformemente en el entorno.



Fig. 5.10 **Ubicación de los inyectores de gas natural**

⁴⁶ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <http://www.sc.edu.es/nmwmigaj/bancomot.htm>

Posteriormente se tiene que modificar la ECU del mismo motor, o en su caso comprar una nueva; con el objetivo de que la computadora del motor sepa cuál es el momento óptimo para inyectar el gas natural en el sistema y por lo tanto se pueda efectuar una combustión lo más completa posible.



Fig. 5.11 ECU del motor diesel

Con el uso del banco de pruebas se planea tomar medición de la presión de los gases de escape, mediante el analizador de partículas, para realizar una comparación con los datos obtenidos de manera teórica y de esta manera revisar qué tan eficiente está siendo el motor con cada variación de concentración de combustibles.

Conclusión del capítulo

Los resultados de cada iteración obtenida en el análisis químico muestran claramente que entre mayor es la concentración de gas natural, la presión total de salida disminuye, debido en gran parte a que el diesel es el combustible que aporta mayor presión de salida. Mucho lo anterior se debe a que el gas natural es un compuesto que posee una cadena corta por lo que se necesita de menor energía para romper su enlace, mientras que el diesel es un compuesto que posee una cadena larga y en consecuente se necesita mayor energía para romper su enlace. Otro factor relacionado es el calor específico de cada combustible, pues el gas natural tiene un calor específico de $2 \frac{kJ}{kg} K$ y el diesel de $2.2 \frac{kJ}{kg} K$, lo que se traduce en que el gas natural goza de una mayor facilidad para quemarse al ser comparado con el diesel, y por esta razón produce una menor presión a la salida.⁴⁷

Como se mencionó anteriormente, en una combustión siempre se obtiene como producto dióxido de carbono y agua, por lo que al haber ya obtenido las presiones totales de salida de ambos compuestos posterior a la combustión en las varias iteraciones realizadas, es posible comparar estos valores teóricos con los valores

⁴⁷ Yunes A. Cengel y Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

prácticos que se obtendrán al momento de poner a prueba el motor dual fuel en el banco de pruebas.

Por consecuente al realizar dicha comparación se podrá saber con certeza que tan eficiente es el motor, dependiendo claramente del porcentaje de composición de cada combustible y de la carga aplicada.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que aquellos valores a comparar siempre dependerán de las unidades que emplee el dispositivo de medición a la salida del motor, a fin de tener un resultado coherente.

CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Al finalizar este trabajo el objetivo perseguido se ha cumplido en su totalidad pues se logró proponer los cambios pertinentes para llevar a cabo la conversión del motor diesel FAW Deutz modelo CA4DC2-10E3 a la operación dual-fuel, así como diseñar una propuesta de banco de pruebas adecuada para el mismo motor.

De igual manera, desde el punto de vista químico, se consiguió llegar a la expresión ideal que representa el fenómeno en estudio, con la finalidad de tener conocimiento de que proporción de cada combustible (diesel y gas natural) es la idónea para obtener un desempeño óptimo.

El origen de esta tesis parte de la necesidad de combinar el diesel con otro combustible alternativo que mejore la combustión del propio motor diesel, y por ende disminuya las emisiones contaminantes emitidas al ambiente, retomando la idea del motor dual-fuel.

El motor dual-fuel es un motor que posee grandes ventajas sobre el motor diesel, como en el hecho que ofrece una combustión más limpia, completa y menos ruidosa, factores a considerar seriamente en el mundo de hoy en día.

Otra circunstancia a considerar es el precio del gas natural con respecto a otros combustibles como la gasolina y el diesel, así como las grandes reservas naturales existentes en todo el mundo de este recurso.

Cabe mencionar que el gas natural es un combustible limpio siempre y cuando se quemara la mayor parte o en su totalidad en el proceso de combustión, de otra manera, debido a que el 95% de su composición está formado por metano; su expulsión del motor puede resultar dañina para el medio ambiente y el ser humano, con solo comentar que el metano es un agente contaminante 84 veces más potente que el CO₂, contribuyendo en gran parte al calentamiento global.⁴⁸

⁴⁸ Información consultada en la siguiente dirección electrónica:

- <https://www.forbes.com.mx/gas-metano-contamina-84-veces-mas-que-el-dioxido-de-carbono/>

Se concluye que el motor dual-fuel es una opción muy viable por todas las ventajas que posee sobre el motor diesel, ya que aunque al inicio se tendrá que gastar un poco de capital en la conversión, con el paso del tiempo la inversión se recuperará, y más importante el impacto negativo al medio ambiente y a la sociedad disminuirá.

Por otro lado, esta investigación fija las bases y el conocimiento para desarrollar la respectiva parte teórica, aplicando la conversión planteada al motor y montándolo en el banco de pruebas para saber qué proporción de combustible es la ideal para obtener una operación razonable, de tal forma que permita hacer una comparación con la parte teórica obtenida en este apartado. Por lo que se refiere al área de instrumentación y control, se deben efectuar las modificaciones necesarias a la ECU persiguiendo el mismo propósito.

Los alcances de este proyecto no terminan aquí, ya que a futuro este análisis puede ser utilizado en la industria del transporte, ayudando al mejoramiento y creación de nuevos y más eficientes motores.

REFERENCIAS

Libros

1. Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.
2. Yunes A. Cengel y Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

Tesis Profesionales

1. Juan José Moreno León (2011). *Gas Natural como Combustible Alternativo para Vehículos* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
2. Nereo Juárez Castillo (2006). *Diseño de un Sistema Combustible bajo la tecnología Dual-Fuel para unidades DINA 55119080* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo.
3. Víctor Alfredo Aybar Chávez (2005). *Modelación Matemática de un Motor de encendido por chispa que utiliza Gas Natural como combustible* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
4. Percy Castillo Neira. *Análisis Termodinámico de la Conversión de grupos Diesel al Gas Natural, 5 p.*

Páginas de Internet

1. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Rudolf_Diesel2.jpg/220px-Rudolf_Diesel2.jpg
2. <http://cdn.inaxiom.net/web/wp-content/uploads/2011/01/08-Mercedes-Benz-125-a%C3%B1os-de-innovaci%C3%B3n-1923-Benz-Gaggenau-5-K-3.-First-primer-cami%C3%B3n-con-motor-Diesel-de-cuatro-clindros.jpg>
3. <http://www.motoradiesel.com.mx/es/noticias/internacional/304-historia-de-un-motor-en-particular-el-diesel.html>
4. <http://cochesmiticos.com/el-motor-diesel-historia/>
5. <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTrUZC61>
6. <http://es.slideshare.net/martk/pdf-motores-diesel>
7. <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTtjixSE>
8. <http://www.tallerdemecanica.com/blog/65-common-rail-sistemas-de-inyeccion-diesel-por-acumulador-comun>
9. <https://www.motorpasionfuturo.com/glp-gnc/volvo-trucks-nuevos-camiones-dual-fuel-gas-natural-diesel>
10. <https://www.ro-des.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil/>
11. <http://es.slideshare.net/martk/pdf-motores-diesel>
12. <http://definicion.de/wp-content/uploads/2013/04/piston.jpg>
13. <http://www.aficionadosalamecanica.net/imagescursomec/segmentos-motor-diesel.jpg>
14. <http://www.deligiannis.net/images/enginevalve02.jpg>
15. <http://www.sabelotodo.org/automovil/imagenes/motor/invector.jpg>
16. <http://www.monografias.com/trabajos104/motor-diesel/motor-diesel.shtml#ixzz4KTtjixSE>

17. <http://www.cleanairpower.com/howitworks.html>
18. <https://www.uniongas.com/about-us/about-natural-gas/Chemical-Composition-of-Natural-Gas>
19. https://www.testsystems24.com/fileadmin/fotodatenbank/test_systems/keyvisuals/Motor/engine_test_bench_Nuernberg-14.jpg
20. <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/bancomot.htm>
21. <https://www.forbes.com.mx/gas-metano-contamina-84-veces-mas-que-el-dioxido-de-carbono/>

Publicaciones Periódicas

1. Gaceta de la Propiedad Industrial (PI)

ANEXOS

Terminología relevante

Término dual-fuel

Término usado para describir los motores de compresión por ignición que queman simultáneamente dos combustibles diferentes en proporciones variables. Estos dos combustibles son usualmente hechos de un combustible gaseoso, que suministra mucha de la energía liberada en la combustión, y un segundo combustible, que es un líquido empleado principalmente para proporcionar la energía necesaria para la ignición y la fracción restante de la energía liberada por el motor.

Motores bi-fuel

Aquellos motores que utilizan dos diferentes combustibles alternadamente mientras la ignición fue provista por una fuente externa de energía.

Motores gas-diesel

Motores dual-fuel que emplean diferentes formas de introducción del combustible gaseoso que no se somete a auto ignición por sí mismo.

Motores multifuel

Motores diesel de combustible líquido con ignición por compresión que han sido modificados para operar alternadamente con diferentes combustibles líquidos, incluyendo aquellos que no necesariamente son del tipo convencional diesel.

Combustibles alternativos

Aquellos combustibles que pueden ser empleados en aplicaciones motrices, diferentes a los convencionales combustibles líquidos como la gasolina o el diesel.

Motores dual-fuel premezclados

Motores en los que se introduce el combustible gaseoso en el aire entrante muy por delante de la válvula de admisión. El gas debe ser introducido al principio del proceso de compresión para que de esta manera mucho del combustible gaseoso se mezcle completamente con el aire antes de la inyección piloto de combustible.

Motores dual-fuel de combustible gaseoso con inyección directa de alta presión

Motores en donde el combustible gaseoso es inyectado bajo altas presiones directamente en el cilindro, ya sea antes o después la inyección u ignición del combustible líquido piloto.

Piloto

Pequeña cantidad de combustible líquido diesel inyectado para proveer ignición controlada en motores dual-fuel.

La relación de equivalencia

Término que indica la proporción actual de aire-combustible relativa al correspondiente valor estequiométrico por masa, moles, o volumen. Convirtiéndose en un indicador relevante al hablar de la energía liberada en la combustión de una mezcla de combustible y aire.⁴⁹

Patentes

Sistema de control electrónico de combustible dual⁵⁰

Número de solicitud: 9301107

Fecha de presentación: 26/02/1993

Solicitante (s): DEERE & COMPANY; John Deere RD. Moline Illinois US 61265

Inventor (es): JEFF ARSENAULT, WENDELIN GOETZ, JAMES LAROCQUE;
295 St. George Street Toronto Ontario CA M5R2P; WENDELIN
GOETZ 295 St. George Street Toronto Ontario CA M5R2P; JAMES
LAROCQUE 295 St. George Street Toronto Ontario CA M5R2P

Resumen: Un sistema de combustible dual para un motor diesel incluye un sistema de inyección de combustible (diesel) líquido y una fuente de combustible gaseoso tal como un gas natural.

Fecha de puesta en circulación: 1994-01-14

⁴⁹ Ghazi A. Karim. (2015). Dual-Fuel Diesel Engines. Florida, U.S.: CRC Press.

⁵⁰ Publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial (PI), puesta en circulación el 14 de enero de 1994.

Un sistema de suministro dual para un sistema de inyección indirecta de un motor diesel⁵¹

Número de solicitud internacional: PCT/AU2010/000450

Fecha de presentación: 19/10/2011

Solicitante (s): DGC INDUSTRIES PTY LTD.*; 70 Gheringhap Street, Geelong, 3220, Melbourne, Victoria, AUSTRALIA

Inventor (es): UWE ALEXANDER KRUG; WILL FISHER; Kleine Gasse 7, 74653, Criesbach, ALEMANIA

Resumen: La presente invención se refiere a los sistemas de combustible para motores diésel. En particular, la invención se refiere a un sistema de suministro de combustible dual (10) para un motor diésel con un sistema de inyección directa (12). La invención se extiende hasta un motor diésel que incorpora el sistema de suministro dual (10) y al vehículo que incorpora un motor diésel con sistema de suministro de combustible dual (10). El sistema de suministro de combustible dual (10) incluye un sistema de suministro mixto (17) que incluye una primera etapa (14) que incluye un tanque de combustible diésel (42) y un tanque GLP (44), y como segunda etapa (16) para suministrar la mezcla de combustible al sistema de inyección (12). El sistema de suministro de combustible dual (10) también incluye un sistema de suministro de diésel (80) para entregar el diésel al sistema de invención (12).

Fecha de puesta en circulación: 2012-02-14

⁵¹ Publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial (PI), puesta en circulación el 14 de febrero de 2012.

Método para el control de la inyección de combustible⁵²

Oficina, no. de patente y tipo de documento: MX 346323 B

Fecha de concesión: 15/03/2017

Número de solicitud: MX/a/2015/002203

Fecha de presentación: 19/02/2015

Inventor (es): SURNILLA, GOPICHANDRA [US]; THOMAS, JOSEPH LYLE [US]; KRENGEL, ERIC [US]; RUMPSA, TODD ANTHONY [US]; SHELBY, MICHAEL HOWARD [US]; West Bloomfield, MI, 48322, US

Titular: FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC [US]; Dearborn, Michigan, 48126, US

Agente: ERIC AARÓN ALAVEZ MEJÍA; Insurgentes Sur 1722, Despacho 701, Col. Florida, 01030, ALVARO OBREGON, Distrito Federal, México

Prioridad (es): US14/189,900 25/02/2014

Clasificación CIP: **F02D 41/30** (2006.01); **F02D 13/02** (2006.01); **F02D 41/06** (2006.01); **F02M 69/30** (2006.01)

Resumen: Se describen métodos y sistemas para controlar la inyección de combustible en un motor equipado con un sistema de inyector dual que incluye un inyector en puerto y un inyector directo. Se ajusta una fracción de combustible inyectado en puerto contra combustible inyectado en forma directa en función de al menos la temperatura de la válvula de admisión. La proporción de combustible en puerto inyectado en un cilindro aumenta a medida que la temperatura de la válvula de admisión de un cilindro determinado aumenta para mejorar la vaporización de combustible en el puerto de admisión.

Fecha SIGA: 6902695

Fecha de puesta en circulación: 2017-04-18

⁵² Publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial (PI), puesta en circulación el 18 de abril de 2017.

Motor de combustible dual con relación aire-combustible variable⁵³

Oficina, no. de patente y tipo de documento: MX 346338 B

Fecha de concesión: 15/03/2017

Número de solicitud: MX/a/2012/013856

Fecha de presentación: 28/11/2012

Número de solicitud internacional: PCT/EP2010/008000

Fecha de presentación internacional: 31/12/2010

Número de publicación internacional: WO 2011/154028

Fecha de publicación internacional: 15/12/2011

Inventor (es): JOSE IGNACIO GALINDO [CL]; KLAUS M. SCHAFFER [AT]; DANIEL LEITNER [AT]; CHRISTOF HEPP [AT]; Viña del Mar, 2542542, CL

Titular: ALSET IP S AR.L.* [LU]

Agente: JOSE JUAN MENDEZ CORTES; Rio Tiber No. 87, 5° Piso, Col. Cuauhtémoc, 06500, Distrito Federal, México

Prioridad (es): US12/795,410 07/06/2010

Clasificación CIP: **F01N 3/08** (2006.01); **F02D 19/06** (2006.01)

Resumen: Un motor de gasolina convencional es adaptado para operar como un motor bicombustible calibrado para quemar gas de Hidrógeno como combustible primario y gasolina como combustible secundario en varios índices aceptables de aire-combustible mientras evita índices prohibidos de aire-combustible. El motor es preferentemente operado para quemar combustible de hidrógeno en un modo cargado y en un modo inclinado a cierto índice aceptable de aire-combustible donde relativamente muy pocas emisiones NOX pueden ocurrir. Cuando se requiere de energía

⁵³ Publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial (PI), puesta en circulación el 18 de abril de 2017.

adicional o aceleración, el procesador que controla los inyectores de combustible están operados para inyectar relativamente pequeñas cantidades de gasolina en el motor dando como resultado una mezcla de combustible evita que se incrementen las emisiones NOX a medida que el procesador controla el motor para operar en un índice de aire-combustible estequiométrico donde un convertidor catalítico es más capaz de reducir las emisiones dañinas al ambiente.

Fecha SIGA: 6902710

Fecha de puesta en circulación: 2017-04-18

Método y aparato para proporcionar una inyección de combustible gaseoso de punto múltiple a un motor de combustión interna⁵⁴

Oficina, no. de patente y tipo de documento: MX 197308 B

Titular: WOODWARD GOVERNOR COMPANY

Clasificación CIP: F02M21/02 (2006-01)

Resumen: La presente invención se refiere a un motor de bicomcombustible de punto múltiple capaz de usar un primer combustible y un segundo combustible, que comprende: un motor capaz de usar el primer combustible y que comprende por lo menos una cámara de combustión, cada cámara de combustión tiene una lumbrera de entrada; por lo menos un dispositivo dosificador de combustión para controlar selectivamente la inyección del segundo combustible a una correspondiente de la por lo menos una cámara de combustión; un múltiple de suministro de combustible asociado con dicho por lo menos un dispositivo de dosificación de combustible para dirigir el segundo combustible a cada uno de dichos por lo menos un dispositivo de dosificación de combustible; un mecanismo adaptador de lumbrera de entrada para adaptar la lumbrera de entrada de una seleccionada de entrada para adaptar la lumbrera de entrada de una seleccionada de dicha por lo menos una cámara de combustión para recibir la inyección.

Fecha SIGA: 6176953

Fecha de puesta en circulación: 2016-05-31

⁵⁴ Publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial (PI), puesta en circulación el 31 de mayo de 2016.

Noticias importantes

Volvo Trucks: nuevos camiones dual-fuel gas natural-diesel⁵⁵

En Junio de 2011, Volvo puso en circulación sus nuevos camiones con motor diésel preparados para funcionar con una mezcla de gas metano y gasóleo.

Es el primer constructor en Europa que aplica esta solución en camiones pesados y aptos para largas distancias. Este sistema permite funcionar un motor diésel con una mezcla de hasta el 75% de gas natural líquido (gas metano).

Son dos las ventajas que consiguen estos sistemas duales: mayor eficiencia (esta solución de Volvo tiene aproximadamente un 25% menos de consumo con respecto a un Otto-Gas) y menores emisiones (algo menos de CO₂, un 10%, pero sobre todo mucho menores emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas, y no solo partículas PM10 sino también PM2,5, partículas muy nocivas para los pulmones).

El motor de estos camiones FM MetanoDiesel es un diésel 13.0 l (de seis cilindros) con una potencia de 460 CV (entre 1.400 y 1.900 rpm) y 2.300 Nm de par (entre 1.000 y 1.400 rpm), con un sistema de inyección específico para gas y un convertidor catalítico también diferente.

Tiene una autonomía para unos 500 km por tanque (de 280 litros, 246 litros netos) de gas natural licuado (para una combinación típica de unidad tractora + remolque + carga de 40 toneladas en total). Si el gas se acabase seguiría funcionando con un 100% de gasóleo (cumple la norma anticontaminación Euro 5).

⁵⁵ Información consultada de la siguiente dirección electrónica:

- <https://www.motorpasionfuturo.com/glp-gnc/volvo-trucks-nuevos-camiones-dual-fuel-gas-natural-diesel>

Cálculos

Segunda Iteración CO_2

Como segunda iteración se suministrará de la cantidad total un 30% de diesel y un 70% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}45L \times 0.30 &= 13.5L \text{ (diesel)} \\45L \times 0.70 &= 31.5L \text{ (gas natural)}\end{aligned}$$

En cada iteración se realizarán los mismos cálculos que en la primera parte, para así poder realizar una comparación.

Obteniendo los kmol de CO_2 después del proceso de combustión.

Diesel

$$13.5L C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol diesel}{157 kg} = 1.073 kmol CO_2$$

Metano

$$\begin{aligned}0.95 (31.5L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol CH_4}{16 kg} \\= 0.0184 kmol CO_2\end{aligned}$$

Etano

$$\begin{aligned}0.032 (31.5L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg} \\= 0.0006 kmol CO_2\end{aligned}$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(1073 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 2000.5083 \text{ atm}$$

Metano

$$P = \frac{(18.4 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 34.3050 \text{ atm}$$

Etano

$$P = \frac{(0.685 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.2771 \text{ atm}$$

Tercera Iteración CO_2

En esta tercera iteración se suministrará de la cantidad total un 20% de diesel y un 80% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 45L \times 0.20 &= 9L \text{ (diesel)} \\ 45L \times 0.80 &= 36L \text{ (gas natural)} \end{aligned}$$

Obteniendo los kmol de CO_2 después del proceso de combustión.

Diesel

$$9L \text{ } C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 \text{ kg}}{m^3} * \frac{15 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol diesel}}{157 \text{ kg}} = 0.7154 \text{ kmol } CO_2$$

Metano

$$0.95 (36L \text{ } CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 \text{ kg}}{m^3} * \frac{15 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} = 0.0210 \text{ kmol } CO_2$$

Etano

$$0.032 (36L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg} \\ = 0.0007 kmol CO_2$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(715.4 mol CO_2)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1333.7965 atm$$

Metano

$$P = \frac{(21.0 mol CO_2)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 39.1525 atm$$

Etano

$$P = \frac{(0.7833 mol CO_2)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.4603 atm$$

Cuarta Iteración CO_2

En la cuarta y última iteración se suministrará de la cantidad total un 10% de diesel y un 90% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}45L \times 0.10 &= 4.5L \text{ (diesel)} \\45L \times 0.90 &= 40.5L \text{ (gas natural)}\end{aligned}$$

Obteniendo los kmol de CO_2 después del proceso de combustión.

Diesel

$$4.5L C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol diesel}{157 kg} = 0.3577 kmol CO_2$$

Metano

$$\begin{aligned}0.95 (40.5L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol CH_4}{16 kg} \\= 0.0236 kmol CO_2\end{aligned}$$

Etano

$$\begin{aligned}0.032 (40.5L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{15 kmol CO_2}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg} \\= 0.0008 kmol CO_2\end{aligned}$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(357.7 mol CO_2)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 666.8982 atm$$

Metano

$$P = \frac{(23.6 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 43.9999 \text{ atm}$$

Etano

$$P = \frac{(0.8812 \text{ mol } CO_2)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.6429 \text{ atm}$$

Segunda Iteración H_2O

Como segunda iteración se suministrará de la cantidad total un 30% de diesel y un 70% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 45L \times 0.30 &= 13.5L \text{ (diesel)} \\ 45L \times 0.70 &= 31.5L \text{ (gas natural)} \end{aligned}$$

En cada iteración se realizarán los mismos cálculos que en la primera parte, para así poder realizar una comparación.

Obteniendo los kmol de H_2O después del proceso de combustión.

Diesel

$$13.5L \text{ } C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol diesel}}{157 \text{ kg}} = 1.1804 \text{ kmol } H_2O$$

Metano

$$\begin{aligned} 0.95 (31.5L \text{ } CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \\ = 0.0202 \text{ kmol } H_2O \end{aligned}$$

Etano

$$0.032 (31.5L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 kg}{m^3} * \frac{16.5 kmol H_2O}{1 kmol diesel} * \frac{1 kmol C_2H_6}{30 kg}$$
$$= 0.0007 kmol H_2O$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(1180.4 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^{\circ}C + 273.15^{\circ}C)}{45L}$$

$$P = 2200.7456 atm$$

Metano

$$P = \frac{(20.2 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^{\circ}C + 273.15^{\circ}C)}{45L}$$

$$P = 37.6610 atm$$

Etano

$$P = \frac{(0.7539 mol H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^{\circ}C + 273.15^{\circ}C)}{45L}$$

$$P = 1.4055 atm$$

Tercera Iteración H_2O

En esta tercera iteración se suministrará de la cantidad total un 20% de diesel y un 80% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}45L \times 0.20 &= 9L \text{ (diesel)} \\45L \times 0.80 &= 36L \text{ (gas natural)}\end{aligned}$$

Obteniendo los kmol de H_2O después del proceso de combustión.

Diesel

$$9L C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol diesel}}{157 \text{ kg}} = 0.7869 \text{ kmol } H_2O$$

Metano

$$\begin{aligned}0.95 (36L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \\= 0.0231 \text{ kmol } H_2O\end{aligned}$$

Etano

$$\begin{aligned}0.032 (36L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } C_2H_6}{30 \text{ kg}} \\= 0.0008 \text{ kmol } H_2O\end{aligned}$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(786.9 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L * atm}{mol K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1467.1016 \text{ atm}$$

Metano

$$P = \frac{(23.1 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 43.0677 \text{ atm}$$

Etano

$$P = \frac{(0.8616 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.6063 \text{ atm}$$

Cuarta Iteración H_2O

En la cuarta y última iteración se suministrará de la cantidad total un 10% de diesel y un 90% de gas natural. El automóvil tendrá un tanque de 50L, en donde se llenará hasta un 90%, quedando un total de 45L.

Las cantidades de diesel y gas natural resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 45L \times 0.10 &= 4.5L \text{ (diesel)} \\ 45L \times 0.90 &= 40.5L \text{ (gas natural)} \end{aligned}$$

Obteniendo los kmol de H_2O después del proceso de combustión.

Diesel

$$4.5L C_{12}H_{23} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{832 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol diesel}}{157 \text{ kg}} = 0.3934 \text{ kmol } H_2O$$

Metano

$$\begin{aligned} 0.95 (40.5L CH_4) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{0.656 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } CH_4}{16 \text{ kg}} \\ = 0.0260 \text{ kmol } H_2O \end{aligned}$$

Etano

$$\begin{aligned} 0.032 (40.5L C_2H_6) * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1.36 \text{ kg}}{m^3} * \frac{16.5 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol diesel}} * \frac{1 \text{ kmol } C_2H_6}{30 \text{ kg}} \\ = 0.0009 \text{ kmol } H_2O \end{aligned}$$

Obteniendo la presión de salida de cada compuesto (por medio de la ley de los gases ideales).

Ley de los gases ideales despejada

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Diesel

$$P = \frac{(393.4 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 733.4575 \text{ atm}$$

Metano

$$P = \frac{(26 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 48.4745 \text{ atm}$$

Etano

$$P = \frac{(0.9694 \text{ mol } H_2O)(0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K})(750^\circ C + 273.15^\circ C)}{45L}$$

$$P = 1.8073 \text{ atm}$$