



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

**INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIÉSEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS
RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS**

Carlos Humberto Bonifasi de León

Asesorado por el Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIÉSEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS
RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS HUMBERTO BONIFASI DE LEÓN
ASESORADO POR EL ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Esdras Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Arrivillaga Ramazzini
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIÉSEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 17 de julio de 2012.



Carlos Humberto Bonifasi de León

Guatemala 31 de julio de 2013

Ingeniero
Julio Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio me permito informar que el suscrito ha asesorado el trabajo de graduación titulado **INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIESEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS** elaborado por el estudiante Carlos Humberto Bonifasi de León, con carné: 2008-18873.

El trabajo presentado por el estudiante cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo, en tal virtud me permito recomendar su aprobación.

Atentamente,



Byron Giovanni Palacios Colindres
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 5641

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

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área Térmica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIESEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS**, del estudiante **Carlos Humberto Bonifasi de León**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador de Área



Guatemala, octubre, de 2013.

/behdei.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **INCIDENCIA EN EL USO DE BIODIÉSEL FABRICADO A BASE DE ACEITE DE FRITURAS RECICLADO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Humberto Bonifasi de León**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paz Recinos
Decano



Guatemala, noviembre de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar siempre conmigo y mi familia, y ser nuestra compañía.
Mis padres	Carlos Bonifasi Rodas y Cristina de León, por brindarme siempre su apoyo.
Mi familia	Por el apoyo y confianza que depositaron en mi.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su gran misericordia y bondad.
Mi familia	Por su cariño, confianza, apoyo y paciencia.
Familia López García	Por sus oraciones. Dios los bendiga.
Familia Quinteros Álvarez	Por el apoyo brindado en la situación precisa que lo necesitaba.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ayudarme a iniciar mis aspiraciones y por los conocimientos brindados.
Ingeniero Byron Palacios	Por sus buenos consejos y el apoyo brindado para culminar esta meta. Además, por ser un buen ejemplo para mi persona.
Ingeniero Roberto Guzmán	Por su apoyo y consejos para terminar esta meta de la mejor manera.
Maestros	Del colegio Cristiano Hermoso Jesús, INEB Villa Nueva, jornada vespertina, Instituto Técnico Vocacional Dr. Imrich Fischmann y de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a ellos que ayudaron en mi formación académica, muchas gracias. Dios los guarde y bendiga.

Amigos

Por ser una fuente de motivación y aliento en las diferentes etapas de la vida.

Compañeros

Por su apoyo y motivación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. FUNDAMENTOS DEL MOTOR.....	1
1.1. Motor de combustión interna de encendido por compresión	1
1.1.1. Ciclo de cuatro carreras	2
1.1.1.1. Carrera de admisión.....	2
1.1.1.2. Carrera de compresión.....	3
1.1.1.3. Carrera de fuerza	4
1.1.1.4. Carrera de escape	5
1.1.2. Partes de motor de encendido por compresión	6
1.1.2.1. El block del motor.....	6
1.1.2.2. Cabeza de cilindros.....	7
1.1.2.3. Conjunto de émbolo y biela	8
1.1.2.4. Conjunto de cilindros.....	9
1.1.2.5. El cigüeñal	9
1.1.2.6. Mecanismo de válvulas	10
1.1.2.7. El volante	11
1.2. El sistema de inyección	12
1.2.1. Inyección tipo bomba individual	12
1.2.2. Partes principales del sistema de inyección	13
1.2.3. Formación del rocío	13

1.3.	Medidas de las características del motor.....	14
1.3.1.	Diámetro interior del cilindro y carrera	14
1.3.2.	Desplazamiento del émbolo	14
1.3.3.	Relación de compresión	15
1.4.	Factores de funcionamiento	15
1.4.1.	Torque o par motor	15
1.4.2.	Potencia al freno.....	16
1.4.3.	Potencia indicada	16
1.4.4.	Potencia de la fricción	16
1.4.5.	Presión media efectiva	17
1.4.6.	Consumo específico de combustible	18
1.4.7.	Relación aire combustible.....	18
1.5.	Curvas características del motor de encendido por compresión	18
1.5.1.	Parámetros de referencia	19
1.5.2.	Curva de par motor o torque.....	19
1.5.3.	Curva de potencia al freno.....	21
1.5.4.	Curva de consumo específico de combustible	22
1.5.5.	Construcción de curvas características	23
1.6.	Rendimiento del motor	23
1.6.1.	Rendimiento mecánico	24
1.6.2.	Rendimiento térmico.....	24
1.6.3.	Rendimiento volumétrico	26
1.6.4.	Rendimiento total.....	26
1.7.	El freno Prony	27
2.	TERMODINÁMICA DEL MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN ..	31
2.1.	Primera Ley de la Termodinámica.....	31
2.2.	Segunda Ley de la Termodinámica	33

2.3	Tercera Ley de la Termodinámica	35
2.4.	Ley Cero de la Termodinámica	35
2.5.	Ciclo diésel teórico.....	36
2.5.1.	Compresión isoentrópica	37
2.5.2.	Adición de calor a presión constante.....	38
2.5.3.	Expansión isoentrópica	39
2.5.4.	Rechazo de calor a volumen constante	39
3.	LA COMBUSTIÓN DEL MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN....	41
3.1.	Ecuaciones de la combustión	45
3.2.	Propiedades del aire	46
3.3.	Elementos combustibles en los carburantes	47
3.4.	Combustión con aire	48
3.5.	Calor de combustión	49
3.6.	Poder calorífico superior e inferior	50
3.7.	Proceso de la combustión.....	50
3.8.	Diagrama de presión	52
3.9	Período de la combustión	54
3.9.1.	Demora del encendido	56
3.9.2.	Elevación rápida de la presión	57
3.9.3.	Presión controlada	57
3.9.4.	Incendio en la carrera de expansión	58
4.	FUNDAMENTOS DEL ACEITE COMBUSTIBLE: BIODIÉSEL Y DIÉSEL COMERCIAL No. 2-D.	59
4.1.	El petróleo	60
4.2.	Diésel derivado del petróleo	63
4.3.	Especificaciones para aceite combustible.....	65
4.3.1.	Número de cetano	67

4.3.2.	Viscosidad.....	68
4.3.3.	Gravedad American Petroleum Institute (API)	71
4.3.4.	Azufre.....	71
4.3.5.	Residuo de carbón	72
4.3.6.	Ceniza	72
4.3.7.	Agua y sedimentos	73
4.3.8.	Calidad de encendido	74
4.3.9.	Punto de fluidez.....	74
4.3.10.	Poder calorífico	75
4.4.	Biodiésel	75
4.4.1.	Parámetros del biodiésel	77
4.4.1.1.	Punto de ignición	79
4.4.1.2.	Sedimentos y agua	80
4.4.1.3.	Residuo carbónico	81
4.4.1.4.	Ceniza sulfatada	82
4.4.1.5.	Viscosidad.....	83
4.4.1.6.	Sulfuros.....	83
4.4.1.7.	Número de cetano	84
4.5.	Biodiésel de aceite de frituras	84
4.5.1.	Compuestos.....	87
4.5.2.	Producción en Guatemala	88
4.5.3.	Ventajas del biodiésel con respecto al uso del diésel comercial.....	88
4.5.4.	Desventajas del biodiésel con respecto al uso del diésel comercial	92
5.	METODOLOGÍA	95
6.	RESULTADOS	101

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	109
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES.....	119
BIBLIOGRAFÍA.....	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Carrera de admisión.....	3
2.	Carrera de compresión.....	4
3.	Carrera de expansión.....	5
4.	Carrera de escape	6
5.	Disposiciones del block del motor	7
6.	Cabeza de cilindros.....	8
7.	Conjunto de émbolo y biela	8
8.	Conjunto de cilindros.....	9
9.	El eje cigueñal.....	10
10.	Mecanismo de válvulas	11
11.	El freno Prony	27
12.	Sistema cerrado del motor de combustión interna.....	33
13.	Segunda Ley de la Termodinámica	34
14.	Diagramas P-V y T-S para el ciclo diésel teórico.....	37
15.	Elementos del triángulo de fuego	41
16.	Elementos de la combustión	42
17.	Diagrama presión tiempo para motor encendido por compresión.....	54
18.	Diagrama presión tiempo para motor encendido por compresión a inyección mecánica y plena carga.....	55
19.	Destilación fraccionada del petróleo.....	62
20.	Viscosímetro Saybolt	68
21.	Viscosidad dinámica de un fluido entre dos placas	69
22.	Ciclo de producción del biodiésel	76

23.	Freno Prony utilizado	97
24.	Instalación motor-freno Prony	97
25.	Disposición del freno Prony	98
26.	Equipo auxiliar	98
27.	Gráfico torque versus revoluciones por minuto para diésel comercial	102
28.	Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para diésel comercial	102
29.	Curvas características para diésel comercial	103
30.	Gráfico torque versus revoluciones por minuto para biodiésel B20....	104
31.	Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para biodiésel B20	104
32.	Curvas características para biodiésel B20	105
33.	Gráfico torque versus revoluciones por minuto para biodiésel B100..	106
34.	Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para biodiésel B100.....	106
35.	Curvas características para biodiésel B100	107
36.	Curvas características de torque para diésel comercial, B20 y B100.	110
37.	Curvas características de potencia para diésel comercial, B20 y B100.....	111
38.	Comparación de torque para combustible diésel, B20 y B100	112
39.	Comparación de potencia para combustible diésel, B20 y B100.....	112

TABLAS

I.	Principales familias de hidrocarburos en el aceite crudo.....	61
II.	Especificaciones para el combustible diésel No. 2-D	66
III.	Especificaciones técnicas del biodiésel B100	78
IV.	Aceites vegetales y grasos	85

V.	Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales.....	86
VI.	Ventajas del biodiésel respecto al diésel.....	90
VII.	Desventajas del biodiésel respecto al diésel	92
VIII.	Equipo utilizado.....	96
IX.	Fórmulas para el cálculo de torque y potencia al freno	99
X.	Resultados con diésel comercial	101
XI.	Resultados con biodiésel B20	103
XII.	Resultados con biodiésel B100	105

GLOSARIO

ASTM	Por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales).
Biodiésel	Combustible alternativo obtenido de recursos renovables aptos para utilizarse en motores de combustión interna.
CEN	Comité Europeo de Normalización.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas
Entropía	Magnitud física que permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo en un proceso termodinámico.
Éster	Compuesto orgánico formado por la reacción de un ácido y un alcohol.
Transesterificación	Proceso químico en el que se reacciona alcohol con un ácido vegetal o graso para la obtención de biodiésel. Se obtiene como subproducto glicerina.
UNE	Una Norma Española.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación presenta la evaluación del comportamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos utilizando como combustible diésel comercial, biodiésel con 20 por ciento del biocombustible y 80 por ciento de diésel comercial, y biodiésel puro.

Primeramente se presentan las partes principales de un motor de combustión interna, la termodinámica del motor, el proceso de combustión y los parámetros principales de los aceites combustibles.

En los siguientes capítulos se hace el despliegue de los resultados obtenidos mediante los ensayos con el freno Prony, el cual nos permite obtener los parámetros de torque y potencia, presentándolos en las curvas características del motor, para los combustibles mencionados.

Por último, se realiza una síntesis de los resultados obtenidos; dando a conocer la aptitud del biodiésel propuesto en un motor de combustión interna.

OBJETIVOS

General

Evaluar la aptitud del uso del biodiésel a base de aceite de frituras reciclado en un motor de combustión interna de cuatro tiempos, por medio de la comparación de las características desarrolladas, utilizando el combustible propuesto y diésel comercial No. 2-D

Específicos

1. Desarrollar las curvas características del motor de combustión interna, utilizando diésel comercial No. 2-D y biodiésel fabricado a base de aceite de frituras reciclado.
2. Evaluar el rendimiento mecánico de un motor de combustión interna de cuatro tiempos por medio de las características desarrolladas, tales como torque, potencia al freno y consumo específico de combustible.
3. Describir el proceso de combustión en los motores de encendido por compresión.
4. Describir los factores térmicos que inciden en el funcionamiento de los motores de combustión interna de encendido por compresión.

5. Describir las ventajas y desventajas cualitativas obtenidas por el uso de biodiésel de aceite de frituras reciclado en comparación con las del diésel comercial No. 2-D.

6. Describir las propiedades físicas químicas que determinan la aptitud de un biocombustible, para su uso en un motor de combustión interna de encendido por compresión.

INTRODUCCIÓN

El impacto positivo que provoca el uso de biocombustibles a nivel económico, social y ecológico lo hace ideal como mecanismo de desarrollo nacional aprovechando los residuos orgánicos de origen animal y vegetal, en este caso, fabricado a base de aceite de frituras reciclado. En Guatemala existen entidades privadas que se dedican al cultivo moderado de materia prima de biocombustibles, pero con un nivel muy pobre de producción, es decir, se necesita un apoyo de iniciativa por parte de las autoridades locales e internacionales para promover la inversión a gran escala de la producción de biocombustibles.

El biodiésel es un aceite combustible obtenido a partir de aceites vegetales o animales por medio del proceso de transesterificación, el cual tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad posible de glicerina que contiene la materia prima antes de la producción del biocombustible. Debido a los grandes avances tecnológicos se ha logrado obtener una mejor calidad del biodiésel llegando a cumplir estándares internacionales que lo hacen óptimo, para ser utilizados en motores de combustión interna de encendido por compresión.

En el presente trabajo se pretende, una vez más, mostrar la aptitud de los biocombustibles para ser utilizados en los motores de encendido por compresión, en este caso utilizando como fuente de energía biodiésel a partir de aceite de frituras reciclado por supuesto debidamente procesado para su aplicación. Asimismo se describirán algunas ventajas y desventajas involucrando el medio ambiente y motor.

Además se delinearán diversos puntos teóricos relacionados con la combustión y termodinámica de motor encendido por compresión que influencia grandemente la operación de estas máquinas térmicas y que son necesarias conocerlas para relacionar e interpretar condiciones de funcionamiento, utilizando como fuente de energía química biocombustibles y, por supuesto, aceite diésel, teniendo presente las características de cada uno.

Para evaluar la aptitud del biocombustible propuesto se desarrollará una comparación teniendo como patrón el uso del ya conocido diésel comercial, utilizados ambos en el mismo motor de combustión interna de encendido por compresión, usando los mismos parámetros de referencia tales como: condiciones ambientales, temperatura del motor, aceite lubricante y revoluciones por minuto.

Se obtendrán las características del motor; estas se mostrarán en las curvas características, para obtener las conclusiones necesarias del caso. Para obtener la caracterización del motor utilizando ambos aceites combustibles se utilizará un freno Prony que servirá como dinamómetro mecánico.

1. FUNDAMENTOS DEL MOTOR

1.1. Motor de combustión interna de encendido por compresión

El primer motor encendido por compresión fue desarrollado por el ingeniero alemán Rudolph Diesel, en 1892, aquel motor fue puesto en marcha utilizando como combustible aceite de maní, tenía como tarea proporcionar fuerza de giro a una máquina generadora de vapor. Actualmente, estos motores con el mismo principio de funcionamiento se conocen como motores diésel, gracias a su creador.

Un motor de encendido por compresión convierte la energía química del aceite combustible, que puede ser diésel o biodiésel, en energía de presión aprovechable para realizar trabajo mecánico. Estos motores alcanzan una rápida elevación de presión dentro de la cámara de combustión, por medio de la compresión del aire, logrando una alta temperatura hasta un valor tal, que al ingresar el combustible debidamente atomizado, este se incendia instantáneamente sin necesidad de una fuente externa de calor.

Características usuales de estos motores son: su tamaño relativamente grande, su gran peso, alta relación de compresión y su ruido característico de funcionamiento; parecido al golpe producido por un ariete hidráulico. Debido a los grandes avances tecnológicos se ha logrado obtener mejores rendimientos, menos ruido y más confiabilidad.

Los motores de encendido por compresión debido a su bajo costo de funcionamiento, bajo costo de mantenimiento y alto par motor son muy utilizados por empresas de transporte vehicular, movimiento de tierras, molinos de maíz y centrales eléctricas de emergencia.

1.1.1. Ciclo de cuatro carreras

Los motores de combustión interna se pueden clasificar según el número de carreras que realiza el embolo dentro del motor, en este caso se estudiará el motor de cuatro tiempos o cuatro carreras.

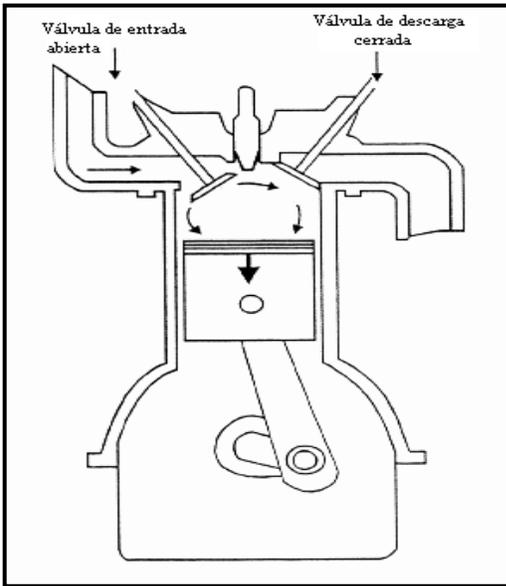
El ciclo de cuatro carreras requiere dos revoluciones del eje cigüeñal por una de fuerza, es decir, el émbolo realizará cuatro movimientos donde uno de ellos será el que produzca la potencia indicada.

El punto más alto que puede alcanzar el émbolo dentro del cilindro del motor se llama punto muerto superior y el punto más bajo se nombra punto muerto inferior.

1.1.1.1. Carrera de admisión

La carrera de admisión consiste en el ingreso del aire a alta velocidad dentro de la cámara de combustión del motor, mediante unos conductos, sin importar el caso deben oponer la mínima resistencia al flujo del aire, esta aspiración se forma debido a la diferencias de presiones dentro de la cámara de combustión y el medio exterior. En esta carrera, el movimiento del émbolo es hacia abajo, obviamente con la válvula de admisión abierta y la válvula de escape completamente cerrada. Ver figura 1.

Figura 1. **Carrera de admisión**

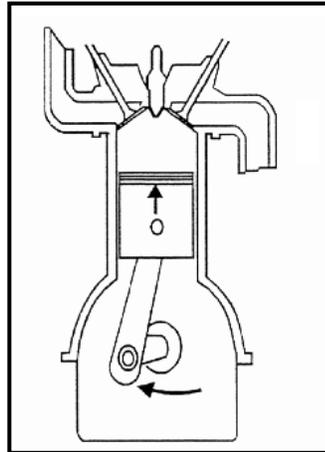


Fuente: <http://dc378.4shared.com/doc/nWtepym9/preview.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.1.2. **Carrera de compresión**

La carrera de compresión consiste en elevar la presión dentro del cilindro, presionando el aire aspirado a las paredes y cabeza de block, estando la cámara de combustión completamente hermética, logrando así aumentar la temperatura a tal punto que este pueda incendiar el combustible espontáneamente. Ver figura 2.

Figura 2. **Carrera de compresión**



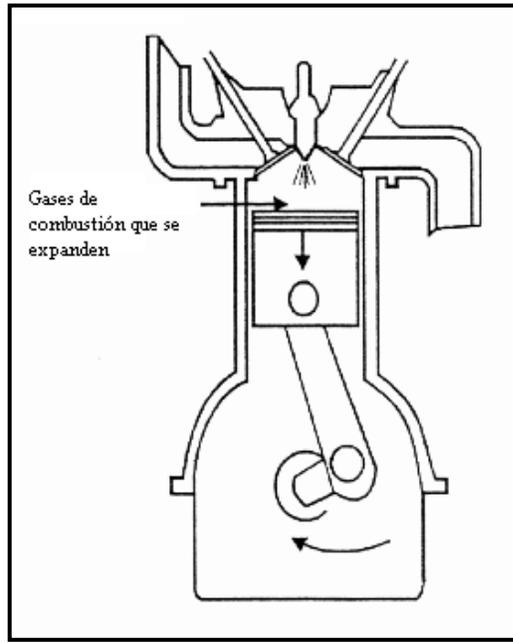
Fuente: <http://dc378.4shared.com/doc/nWtepym9/preview.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.1.3. **Carrera de fuerza**

Carrera de fuerza, también llamada carrera de expansión, ya que en esta etapa es cuando se introduce el combustible dentro de la cámara de combustión, el instante cuando ingresa el combustible se considera que sucede a presión constante siendo la base del ciclo teórico diésel.

Para fines prácticos, el combustible ingresa antes del punto muerto superior con el fin que se incendie todo dentro del cilindro, aunque en realidad esto no siempre sucede. La potencia se obtiene cuando el émbolo recorre la distancia desde el punto muerto superior al inferior.

Figura 3. **Carrera de expansión**

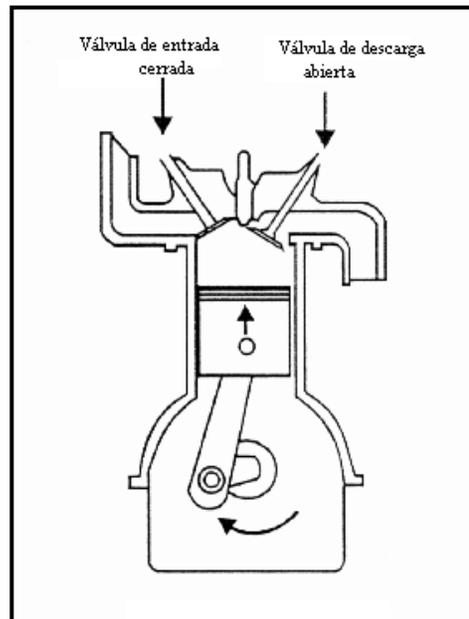


Fuente: <http://dc378.4shared.com/doc/nWtepym9/preview.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.1.4. Carrera de escape

En esta carrera se purgan los gases producidos por el combustible quemado en la combustión, eliminándolos al ambiente exterior; algunos motores de encendido por compresión aprovechan la energía cinética de los gases de escape por medio de un turbocompresor, este alimenta de un mayor flujo de aire al motor, aumentando la eficiencia de combustión.

Figura 4. **Carrera de escape**



Fuente: <http://dc378.4shared.com/doc/nWtepy9/preview.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.2. Partes de motor de encendido por compresión

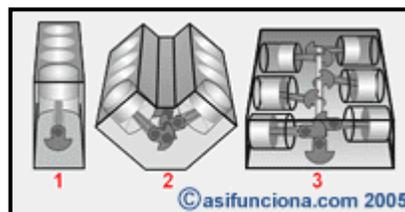
El motor de combustión interna consta, básicamente de un block, cabeza de cilindros, mecanismo de sincronización, sistema de inyección, sistema de lubricación y sistema de enfriamiento.

1.1.2.1. El block del motor

El block es una parte importante del motor, en su interior se alojan mecanismos vitales para el buen funcionamiento de la máquina, tales como: el mecanismo biela manivela formado por el cigüeñal y las bielas, los émbolos con sus respectivos aros sellantes, la cámara de combustión y las camisas de cilindros.

El block del motor puede ser fabricado de hierro fundido o de aluminio para motores de alta competencia. Se pueden clasificar de dos formas: del número de cilindros y de la disposición de los cilindros. Según el número de cilindros pueden ser monocilíndrico o pluricilíndrico, en la figura 5 se aprecian las disposiciones comunes de los cilindros, en la parte 1 se observa un motor lineal, en la 2 se observa un motor en V y en la 3 se observa un motor con cilindros opuestos.

Figura 5. **Disposiciones del block del motor**



Fuente: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/10008794/Motor-de-4-tiempos-y-sus-partes.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.2.2. **Cabeza de cilindros**

Cabeza de cilindros o culata va montada encima del block de cilindros, produciendo de esta manera el sello hermético necesario en la cámara de combustión. La cabeza de cilindros puede ser fabricada de hierro fundido o de aluminio. Aquí va alojado el mecanismo de válvulas y el eje de levas.

El cigüeñal en el block de cilindros y el eje de levas en la cabeza de cilindros forman con la bomba de inyección el mecanismo de sincronización, por medio del acoplamiento entre engranajes, cadena o banda de sincronización.

Figura 6. **Cabeza de cilindros**

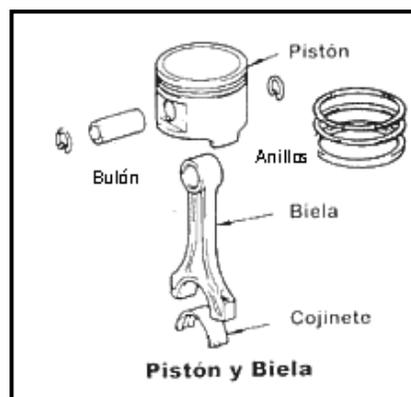


Fuente: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/petrol-engine-cylinder-head-fornissan-z24-389654671.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.2.3. **Conjunto de émbolo y biela**

El mecanismo biela manivela transforma el movimiento de traslación realizado por el émbolo en el cilindro, en movimiento de rotación mediante una biela al eje cigüeñal y este consecutivamente al volante del motor.

Figura 7. **Conjunto de émbolo y biela**



Fuente: <http://www.taringa.net/posts/info/16114118/Asi-funciona-un-motor-de-auto.html>.

Consulta: 27 de julio 2013.

En la figura 7 se observa el mecanismo mencionado, regularmente está compuesto por el pistón o émbolo, biela, cojinete, bulón y anillos.

1.1.2.4. Conjunto de cilindros

Básicamente, un cilindro es una bolsa de aire abierta por un extremo y cerrada por el otro, el cierre se logra con los aros de los émbolos. En los cilindros es donde se desplazan los émbolos, en muchas ocasiones la parte superior de los cilindros forma parte de la cámara de combustión. Los aros se ajustan precisamente en las paredes del cilindro proporcionando un cierre que evita al máximo las fugas de combustión entre el émbolo y el cilindro. En la figura 8 se observa un motor en línea seccionado con el conjunto de cilindros.

Figura 8. **Conjunto de cilindros**



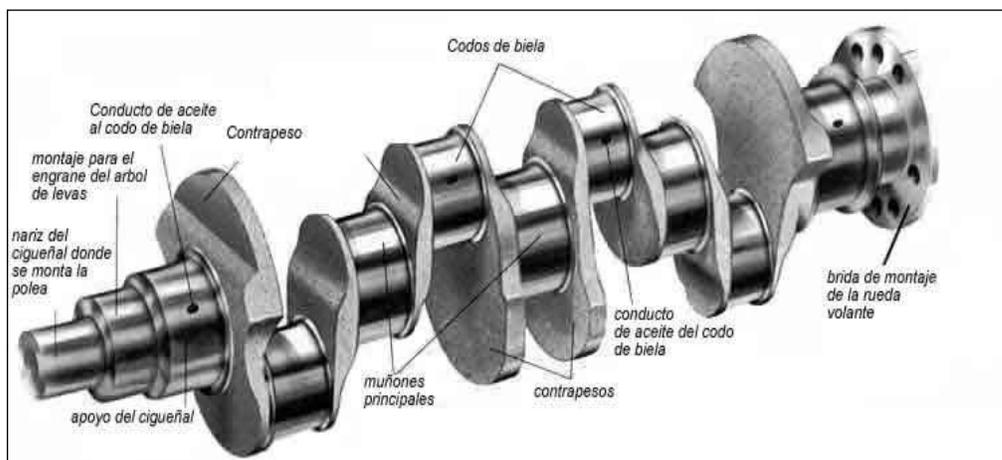
Fuente: <http://www.mecanicafacil.info/mecanica.php?id=cilindro>. Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.2.5. El cigüeñal

Es la parte más importante del motor debido que este recibe la energía mecánica producida por la combustión, encargándose de transmitirla como trabajo mecánico aprovechable para alguna función en especial, como ejemplo, en un vehículo para proporcionar de movimiento a las ruedas motrices.

El cigüeñal es un eje rígido que va soportado en el motor por medio de cojinetes antifricción, además consta de codos donde va alojada la cabeza de bielas, contrapesos que se encargan de balancear el movimiento rotacional y laberintos de lubricación.

Figura 9. El eje cigüeñal



Fuente: <http://www.fazermotos.com.ar/Rectificacion-de-ciguenales-de-motos.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

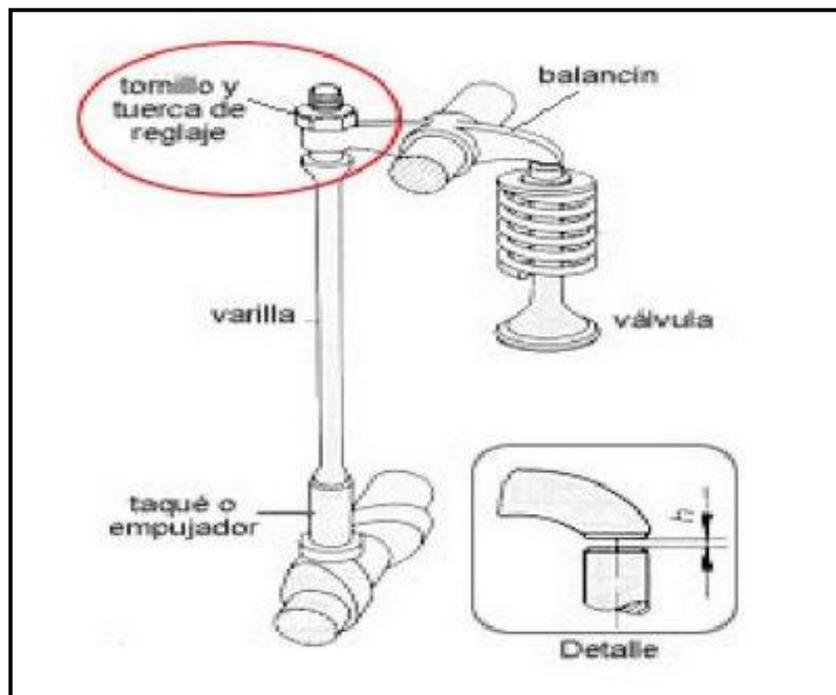
1.1.2.6. Mecanismo de válvulas

El mecanismo de válvulas consiste de balancines, eje de balancines, muelles helicoidales, guías de válvula, asientos, arandela de retención y de la válvula, principalmente.

Las válvulas son tapones de metal mecanizados de forma que permiten o no el flujo de aire en los conductos, dependiendo de la carrera dentro del motor. En la carrera de admisión la válvula de escape está cerrada y la de admisión

está abierta; siendo lo contrario en el tiempo de escape. En la carrera compresión y carrera de fuerza o expansión ambas válvulas están cerradas.

Figura 10. **Mecanismo de válvulas**



Fuente: <http://mecanicayautomocion.blogspot.com/2009/03/sistema-de-distribucion.html>.

Consulta: 27 de julio 2013.

1.1.2.7. **El volante**

El volante del motor es un almacenador de energía mecánica, debido a que absorbe los picos de energía producidos en la carrera de expansión, permitiendo una operación bastante estable, esta energía es liberada en la carrera de compresión siendo aquí donde se necesita trabajo para comprimir el aire dentro de la cámara de combustión.

1.2. El sistema de inyección

Es el encargado de introducir el combustible debidamente dosificado y atomizado dentro de la cámara de combustión en el tiempo correcto. En los motores de encendido por compresión, el sistema de inyección consiste esencialmente, en una bomba cebadora, bomba de inyección, tuberías de alta y baja presión, inyectores, tanque de combustible y filtros.

Las bombas de inyección más utilizadas son la tipo lineal y rotativa siendo la diferencia más destacable el elemento de bombeo. La tipo lineal consiste en un conjunto de elementos de bombeo colocados en serie sobre una línea, la tipo rotativa consiste de elementos colocados circunferencialmente sobre un elemento de bombeo.

1.2.1. Inyección tipo bomba individual

Este tipo de inyección consiste de un inyector y la bomba inyectora individual. Este sistema se encarga de calcular la cantidad de combustible necesaria para la combustión, dependiendo del régimen de funcionamiento, además de atomizarlo homogéneamente dentro de la cámara de combustión.

El componente de la bomba de inyección encargado de dosificar el combustible se llama elemento de bombeo. El elemento dentro del inyector encargado de atomizar el combustible en la cámara de combustión se llama tobera. Es importante mencionar que el combustible inyectado debe romper la presión de compresión, para cumplir esto el inyector debe estar debidamente ajustado según datos de fabricante.

1.2.2. Partes principales del sistema de inyección

Las partes más importantes del sistema de inyección son las siguientes:

- Bomba de inyección compuesta por el conjunto de émbolo buzo y barril, barra de control, racor, resortes de retorno del émbolo, tubo de descarga y conjunto de válvula de suministro.
- Inyector compuesto por la tobera, tapa de tobera, tornillo de ajuste de presión, resorte de ajuste de presión, tubo de descarga y conexión de filtrado.

1.2.3. Formación del rocío

Como se mencionó anteriormente, la tobera del inyector es la encargada de atomizar el combustible dentro de la cámara de combustión, es decir, se encarga de formar el rocío adecuado para que se incendie completamente el combustible. Este rocío tiene que romper la presión existente en el cilindro, en la práctica influye la presión de compresión en la formación de este.

Dependiendo del fabricante así será el número de orificios que contenga la tobera de inyección y la dirección del rocío de combustible, es común encontrar tres, cuatro o cinco orificios. La cantidad de orificios, también depende de la geométrica de la cámara de combustión.

1.3. Medidas de las características del motor

Estas medidas definen el tamaño y el desempeño del motor de combustión interna. También sirven para diferenciar un motor específico con otro, estas medidas varían dependiendo del fabricante.

1.3.1. Diámetro interior del cilindro y carrera

El tamaño del cilindro del motor se define por su diámetro interior y la carrera del émbolo. El diámetro del cilindro se expresa matemáticamente como dos veces el radio, la carrera del cilindro se expresa en unidades de longitud y se mide desde el punto muerto superior al punto muerto inferior.

1.3.2. Desplazamiento del émbolo

Se entiende desplazamiento de émbolo o cilindrada, al volumen que arrastra el émbolo cuando se mueve del punto muerto inferior al superior. Para encontrar el volumen desplazado se utilizan las dimensiones conocidas como: diámetro del cilindro y carrera del émbolo; expresándolo matemáticamente:

$$\text{Volumen} = (3.14 \times \text{carrera} \times \text{diámetro del cilindro elevado al cuadrado})/4.$$

La cilindrada de un motor es una indicación de la potencia del mismo, a mayor cilindrada se obtiene más potencia y, a menor cilindrada disminuye la potencia indicada.

1.3.3. Relación de compresión

La relación de compresión de un motor de combustión interna señala el nivel de compresión a que se somete el aire dentro de la cámara de combustión y el cilindro. Se entiende por cámara de compresión el espacio ocupado por el aire entre la cabeza de cilindros y el émbolo en su punto muerto superior.

Para calcular la relación de compresión es necesario conocer el volumen de la cámara de combustión y el volumen que recorre el émbolo dentro del cilindro desde el punto muerto inferior y superior. Matemáticamente, es directamente proporcional al volumen ocupado por el cilindro e indirectamente proporcional al volumen ocupado por la cámara de combustión.

1.4. Factores de funcionamiento

Son aquellos desarrollados por el motor y forman parte integral de la operación del motor.

1.4.1. Torque o par motor

El torque es un esfuerzo de giro o de rotación que el motor ofrece a través del cigüeñal. Matemáticamente el par motor es el producto de la fuerza ejercida por la distancia al centro de giro, medido en metros kilogramo o pies libra.

El par que un motor puede desplegar varía con el régimen de giro de este, es decir, depende de la velocidad de giro del cigüeñal. Un motor desarrolla un mayor par a velocidades intermedias, esto porque el rendimiento volumétrico fluctúa según el régimen de giro. A menores velocidades, hay más tiempo para

que se llene el cilindro de aire, lo contrario a velocidades elevadas el tiempo de llenado es más corto.

1.4.2. Potencia al freno

La potencia es la rapidez a la cual se efectúa el trabajo. La potencia que realmente suministra un motor es llamada potencia al freno, midiéndose en caballos. Para medir la potencia al freno se utilizan dinamómetros mecánicos o eléctricos, en este trabajo se utilizará un dinamómetro mecánico del tipo freno Prony.

1.4.3. Potencia indicada

Es la realmente desarrollada sobre el émbolo del motor por el proceso de combustión. Esta potencia es la que realmente se tendría que aprovechar pero debido a que existen pérdidas por fricción en los émbolos, cojinetes y otras partes mecánicas del motor, además de pérdidas por transferencia de calor con el refrigerante y lubricante.

1.4.4. Potencia de la fricción

La potencia consumida por la fricción en los aros del émbolo y cojinetes se llama potencia de la fricción. Esta potencia no se puede aprovechar perdiéndose en calor. Es muy difícil obtenerla por medios experimentales ya que no existe un método directo para medirla.

La relación entre la potencia al freno, la potencia indicada y la potencia de la fricción es la siguiente:

Potencia indicada = potencia al freno + potencia de la fricción

1.4.5. Presión media efectiva

La presión media efectiva es la presión teórica que se ejerce sobre el émbolo durante la carrera de fuerza, produciéndose de esa manera la potencia teórica.

La presión media efectiva al freno, esta puede calcularse por medio de la siguiente expresión:

$$P_{mef} = A \times L \times n \times N/X$$

Donde:

P_{mef} : presión media efectiva al freno en libras por pulgada cuadrada.

A : área de la cabeza del émbolo en pulgadas cuadradas.

L : longitud de la carrera del émbolo en pulgadas.

N : revoluciones por minuto.

X : número de revoluciones necesarias o cada carrera de potencia producida por cilindro; 2 para un motor de cuatro carreras y 1 para el motor de dos carreras.

n : número de cilindros del motor.

1.4.6. Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible es un parámetro de comparación que muestra con cuanta eficiencia convierte un motor el combustible quemado en trabajo mecánico. Cuanto menor sea el consumo de combustible con una potencia desarrollada, mayor será la eficiencia del motor.

Cabe mencionar que el consumo dependerá directamente del régimen de giro del motor, además, indirectamente de factores como la temperatura de operación, que tan bien esté calibrado el sistema de inyección y del suministro de aire en la carrera de admisión; una cantidad pobre de aire y una baja temperatura impedirá que el motor funcione adecuadamente, disminuyendo la eficiencia del motor en relación al consumo específico.

1.4.7. Relación aire combustible

La relación aire combustible para una correcta combustión en un motor de encendido por compresión es de 14 a 1, es decir, 14 kilogramos de aire por 1 kilogramo de combustible.

1.5. Curvas características del motor de encendido por compresión

Estas curvas muestran en un plano bidimensional las variables de torque al freno, potencia al freno y consumo específico de combustible versus revoluciones por minuto. Estas curvas se pueden obtener por medios experimentales utilizando dinamómetros, poniendo cuidado a los parámetros atmosféricos existentes e indicarlos en las gráficas resultantes.

Es importante mencionar, que dependiendo de la ubicación geográfica habrá una pequeña variación de los resultados, también de la humedad relativa de esa manera, será el porcentaje de oxígeno existente en el aire y de esa magnitud será la eficiencia del motor. Los fabricantes de motores han desarrollado motores que se adaptan muy bien a las condiciones ambientales exigidas.

1.5.1. Parámetros de referencia

Son aquellas condiciones ambientales presentes cuando se efectúa la caracterización de un motor en particular, las condiciones ambientales a tomar en cuenta son: la presión, temperatura, altura sobre el nivel del mar y humedad relativa, estas son las más importantes a tomar en cuenta.

Existen diversas normas internacionales que exigen diferentes condiciones para poder realizar pruebas a un motor en específico, algunas de estas son la Norma SAE J1816B, Norma 85-AU 141A, Norma Japan Industries Standards (JIS) y las Normas Deutchz Industry Norms (DIN). Todas estas normas establecen condiciones ambientales y operativas del motor, entre las operativas del motor se pueden mencionar: desmontar el filtro de aire, el acelerador completamente abierto, temperatura del refrigerante y del aceite, sin alternador, sin ventilador, compresor descargado, etc. Estas condiciones podrían variar según el fabricante.

1.5.2. Curva de par motor o torque

Cuando se realiza una fuerza perpendicular a la dirección radial sobre algún punto de pivote, se provocará un esfuerzo de giro, este esfuerzo de giro se llama torque o par, es el que se produce entre el eje cigüeñal y la biela del

motor, donde la fuerza la proporciona el émbolo, gracias a la presión de combustión ejercida sobre la cabeza de este.

Para calcular el torque o par motor se utiliza la ecuación que relaciona lógicamente la distancia o brazo y la fuerza. El torque es directamente proporcional al brazo y a la fuerza aplicada, si se eleva la fuerza manteniéndose el brazo el torque aumenta, si aumenta el brazo manteniéndose la fuerza se eleva el torque. Obviamente se quiere mayores torque con poca energía consumida, en este caso se lograría aumentando solamente el brazo. La unidad de medida, que generalmente se utiliza para expresar el par motor o torque es metro-kilogramo o pie-libra. El par motor se expresa por la siguiente expresión:

$$T = R \times F$$

Donde:

T: par motor o torque expresado en pies-libra.

R: brazo o distancia expresado en pies.

F: fuerza ejercida expresada en libras fuerza.

La curva característica de par motor muestra el torque en el eje vertical y las revoluciones por minuto en el eje horizontal, la curva muestra al principio una pendiente positiva hasta un punto máximo cuando empieza a descender teniendo una pendiente negativa.

Dependiendo de la aplicación del motor se le encontrará utilidad a la gráfica, si se necesita el máximo torque, se relaciona a las revoluciones por minuto requeridas, obteniendo de esa manera el torque requerido. También, si

necesita un par motor en específico, solamente es de referirse a las revoluciones por minuto en la curva.

1.5.3. Curva de potencia al freno

Sabiendo que el torque es un esfuerzo que provoca rotación, es más fácil entender el concepto de potencia al freno. Potencia al freno es la rapidez con que se efectúa aquel esfuerzo de giro. Si no existe torque o trabajo no puede existir potencia, ya que la potencia se relaciona obligatoriamente con el trabajo o torque realizado en una unidad de tiempo.

La potencia se expresa matemáticamente por una expresión relacionando las variables de fuerza, distancia y tiempo como se mencionó anteriormente, se expresa como sigue:

$$P = T/t \text{ ó } P = (F \times R)/t$$

Donde:

P: potencia al freno expresado en caballos de potencia.

T: par motor o torque expresado en pies-libra.

R: brazo o distancia expresado en pies.

F: fuerza ejercida expresada en libras fuerza.

La curva de potencia al freno muestra en el eje vertical la potencia y en el eje horizontal las revoluciones por minuto, la curva muestra al principio una pendiente positiva hasta un punto máximo, luego empieza a descender teniendo una pendiente negativa.

La curva de par motor y potencia al freno muestran un punto máximo y luego una pendiente negativa, esto se debe a que disminuye el rendimiento volumétrico. A mayores regímenes de giro disminuye el flujo de aire al cilindro del motor, en motores diésel esto es crítico, ya que se necesita una gran cantidad de aire y temperatura para poder quemar todo el combustible.

1.5.4. Curva de consumo específico de combustible

El consumo de combustible es una medida de cuántos kilogramos de combustible se queman por unidad de tiempo. El consumo específico de combustible es el medio más utilizado para medir la eficiencia del motor, comparando con cuánto rendimiento se convierte el combustible en trabajo mecánico.

Este parámetro dependerá, grandemente, de las condiciones de estado del sistema de inyección, temperatura del motor y de las revoluciones por minuto. Una forma sencilla de medir el consumo específico de combustible es por medio de la siguiente expresión:

$$CEC = 60 \times (m/t)$$

Donde:

CEC : consumo específico de combustible en libras sobre minutos.

m : masa del combustible en libras.

t : unidades de tiempo medido en segundos o minutos.

60 : constante.

La curva de consumo específico de combustible muestra sobre el eje vertical el consumo de combustible, en este caso diesel o biodiesel, y en el eje horizontal las revoluciones por minuto. Mientras menor se consuma combustible a una velocidad de giro específica, mayor será el rendimiento del motor. Si se quiere que el motor consuma la menor cantidad de combustible solo es de referirse a la curva característica en cuestión y encontrar las revoluciones por minuto donde ocurra esto.

1.5.5. Construcción de curvas características

El torque o par motor, la potencia al freno y el consumo específico de combustible variará conforme cambie las revoluciones por minuto del motor, mayor aun, estos parámetros variarán según el tipo del motor y el fabricante.

La construcción de las curvas características de un motor se pueden construir con la ayuda de los dinamómetros mecánicos o eléctricos, dependiendo de la disponibilidad del equipo y de la calidad de este así serán los resultados obtenidos. En este caso se utilizará el dinamómetro tipo freno Prony, que en trabajos anteriores ha dado buenos resultados.

El par motor, la potencia al freno y el consumo específico de combustible van sobre el eje vertical y las revoluciones por minuto sobre el eje horizontal. Mientras se realicen mayores cantidades de pruebas más exacta será la gráfica.

1.6. Rendimiento del motor

El rendimiento es una medida de cuánta calidad se efectúa un proceso relativo a uno ideal, es decir, siempre existe un proceso ideal que sirve como

meta para lograr, aunque no se logre. En realidad, en un motor de combustión interna no existe un proceso ideal, ya que una parte de la energía se pierde en el proceso de combustión. La segunda ley de la termodinámica explica que no existen los procesos ideales, existe entropía, que es una medida de la energía no aprovechable.

1.6.1. Rendimiento mecánico

El concepto de rendimiento es la relación entre lo hecho y lo requerido. El rendimiento mecánico se define como la relación entre la potencia al freno desarrollada por el motor sobre la potencia indicada. El rendimiento mecánico muestra que cierta energía se perdió en fricción entre los aros de émbolo y los cojinetes, esto siempre sucede aunque exista una buena película de lubricación.

El rendimiento mecánico se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$RM = (pf/pi) \times 100$$

Donde:

RM : rendimiento mecánico expresado en porcentaje.

pf : potencia al freno expresada en caballos de potencia.

pi : potencia indicada expresada en caballos de potencia.

1.6.2. Rendimiento térmico

El calor es una forma de energía que indica un movimiento molecular de partículas de una sustancia o mezcla de sustancias. Una máquina térmica es

cualquier dispositivo que funciona entre dos recintos térmicos, a diferentes temperaturas y efectúa algún trabajo. Para que haya transferencia de calor es necesario que exista una diferencia de temperatura entre los recintos.

El rendimiento térmico de una máquina térmica es la relación entre el trabajo realizado y la energía realmente suministrada a la máquina térmica, por el recinto de mayor temperatura. La otra parte de la energía se evacúa al recinto de menor temperatura. Este es el principio de Carnot.

El rendimiento térmico de un motor se define como la relación entre la energía suministrada por el combustible y la energía desarrollada en el volante del motor. La otra parte de la energía térmica se pierde en el calentamiento del refrigerante, lubricante, paredes del cilindro del motor y en la energía cinética que llevan los gases de escape al ser evacuados.

La expresión matemática para calcular el rendimiento térmico de un motor de combustión interna, es la siguiente:

$$RT = W/Q$$

Donde:

RT: rendimiento térmico expresado en porcentaje.

W : trabajo desarrollado en el volante del motor en pie-libra.

Q : calor otorgado por el combustible en British thermal unit (BTU) por mol.

Por lo común, los motores de encendido por compresión desarrollan rendimientos térmicos menores al 50 por ciento. Existen formas de aumentar el rendimiento de un motor, una manera es aumentando el diámetro de los

cilindros del motor, esto elevaría la relación de compresión proporcionando mayor tiempo para que se expanda todo el combustible antes que toque las paredes refrigeradas del cilindro y exista mucha diferencia de temperaturas, provocando en esa proporción transferencia de calor.

1.6.3. Rendimiento volumétrico

Es la relación entre la cantidad de aire aspirada en el cilindro y la que podría entrar en condiciones ideales. El rendimiento volumétrico varía según el régimen de giro del motor. A bajas velocidades hay más tiempo para llenar el cilindro, por el contrario, a altas velocidades no se tiene el suficiente tiempo para llenarlo. Existe un punto donde se tiene el mayor rendimiento volumétrico, es decir, la máxima aspiración; es ahí donde se desarrolla el máximo torque o par motor.

Se han hecho modificaciones a los motores para mejorar el rendimiento volumétrico. Por ejemplo, se han fabricado las válvulas de admisión más grandes, los conductos de admisión con mayor diámetro y mejor acabado superficial para disminuir la fricción, y actualmente vienen motores con turbocargador aumentando a más del doble el flujo de aire.

1.6.4. Rendimiento total

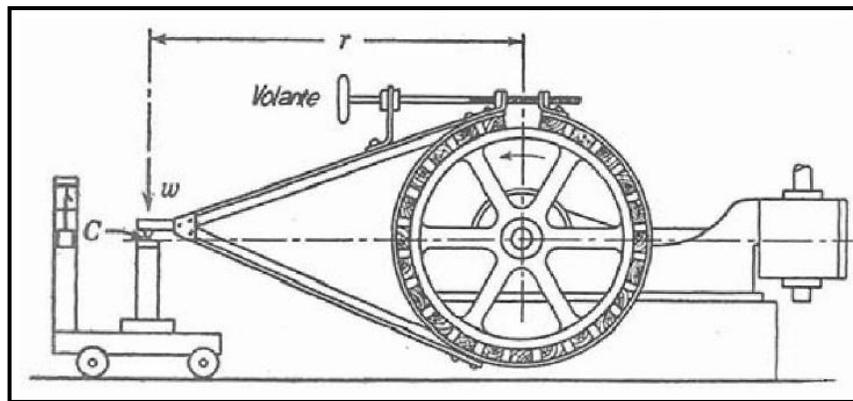
El rendimiento total del motor en un automóvil se ve afectado por todas las pérdidas energéticas existentes en el motor. Tales como: pérdidas de calor en el agua de refrigerante y lubricante, calor de los gases de escape, por rozamiento de los aros del émbolo y cojinetes. Además de las pérdidas mencionadas hay pérdidas exteriores al motor como son el rozamiento en los

engranajes del tren de potencia, en la rodadura de las ruedas motrices, las producidas por la fuerza del viento contra el automóvil, entre otros.

1.7. El freno Prony

Existen varios mecanismos que se utilizan para medir la potencia o el torque por unidad de tiempo en el eje de salida de las máquinas de movimiento alternativo, como son los motores encendidos por compresión. El mecanismo utilizado para medir esos parámetros en un motor relativamente pequeño es el freno Prony. Ver figura 11.

Figura 11. El freno Prony



Fuente: SEVERNS, William. La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. p.14.

El torque y potencia real cedida por el eje de cigüeñal o desarrollada en el volante del motor se denomina torque y potencia al freno respectivamente. A causa de las pérdidas e irreversibilidades que existen en el motor la potencia al freno es menor que la potencia indicada.

Este mecanismo se compone, básicamente de una rueda con un revestimiento interno, regularmente asbesto, el cual hace contacto con la superficie del eje cigüeñal o volante del motor. La fuerza de fricción generada al cigüeñal cuando este se encuentre girando a velocidad constante tenderá a frenar el motor. Esta fuerza de fricción será transmitida por medio de un brazo de radio constante a una báscula, la cual indicará la magnitud de dicha fuerza, esta acción transmitida del cigüeñal a la báscula se denomina torque al freno. Este torque generado, cuando el motor gira a una velocidad angular constante, se denomina torque al freno por unidad de tiempo o potencia al freno.

Los datos de potencia y torque son unidades básicas para determinar la capacidad de trabajo o producción de un motor. Normalmente esos datos se trazan en las curvas características del motor.

El torque se define, como el producto de la distancia o radio por la fuerza que actúa a lo largo de ese camino. En el caso del freno Prony, el torque se mide por el producto de la longitud del brazo del freno por la fuerza de la balanza, este torque es el producido por la acción de la fuerza de freno. Matemáticamente el torque al freno se expresa de la siguiente manera:

$$T = r \times F$$

Donde:

T : torque al freno en pies-libras.

r : largo del brazo en pies.

F : fuerza de fricción o freno de la báscula en libras.

La potencia se define como la rapidez al cual se efectúa trabajo o en este caso torque. Se expresa de la siguiente manera:

$$P = T \times w$$

Donde:

P : potencia en caballos de potencia.

T : torque al freno en pies-libras.

w : velocidad angular del motor en revoluciones por minuto.

2. TERMODINÁMICA DEL MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

2.1. Primera Ley de la Termodinámica

La termodinámica es la ciencia de la energía, estudia la transformación de esta y las relaciones de las propiedades físicas de la sustancia afectada por aquella transformación, la sustancia puede ser un líquido, cuerpo sólido o un gas. En ingeniería mecánica, el término energía implica capacidad para realizar trabajo, pero trabajo disponible.

Es importante mencionar que cualquier sustancia o materia contiene energía. En un balance energético esa energía disponible se expresa en términos de entalpía. Entalpía es la cantidad de energía contenida en un cuerpo.

Se define energía como la aptitud latente para producir un cambio en las condiciones existentes de un cuerpo o sustancia. Por ejemplo, el trabajo mecánico que desarrolla un motor en el volante es gracias al cambio de este, sufrido por la mezcla de combustible-aire dentro del cilindro al añadirsele energía en forma de calor. Esa enorme cantidad de energía cedida al sistema provoca un cambio en las propiedades intensivas de la sustancia, tales como: presión, volumen y entalpía. No toda la energía suministrada al sistema se convierte en trabajo, existe pérdida por entropía.

La Primera Ley de la Termodinámica es un postulado de la conservación de la energía. Esta indica que la energía no se crea ni se destruye, solamente

se transforma. La unidad de medida de la energía puede ser en joule/kilogramo o British thermal Unit (BTU) / libra.

Para analizar el motor encendido por compresión, por medio de esta ley, se toma la cámara de combustión como un sistema cerrado. El aire comprimido dentro de la cámara es la sustancia afectada, el calor lo suministra el combustible al momento de ser inyectado y el mecanismo biela manivela otorga el trabajo disponible. Entonces se conserva la energía, solo es transformada en trabajo. Esto se puede mostrar mediante la siguiente ecuación matemática:

$$w = \Delta u + q$$

Donde:

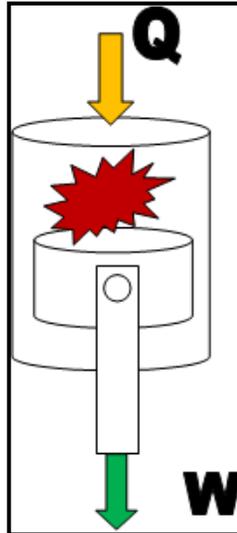
Δu : cambio de energía interna expresado en British thermal unit (BTU) por libra.

q : calor suministrado expresado en British thermal unit (BTU) por libra.

w : trabajo efectuado expresado en British thermal unit (BTU) por libra.

La ecuación anterior se llama: ecuación general de la energía. En la figura 12 se puede comprender mejor la Primera Ley de la Termodinámica, haciendo la analogía al motor encendido por compresión.

Figura 12. **Sistema cerrado del motor de combustión interna**



Fuente: elaboración propia.

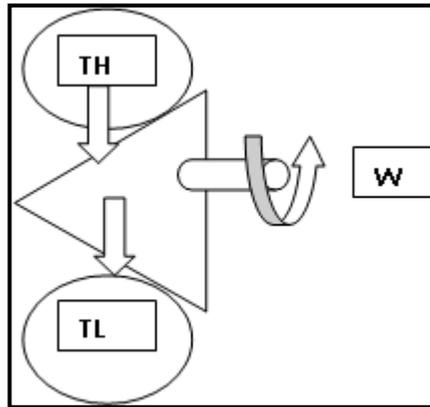
2.2. **Segunda Ley de la Termodinámica**

Lord Kelvin postuló la Segunda Ley de la Termodinámica de la siguiente manera: es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo¹. Esta segunda ley señala que en cualquier proceso térmico siempre existirá una pérdida de energía. Por lo tanto, la energía pierde su calidad al pasar de una forma a otra. La energía perdida fluye hacia el lugar de menor nivel energético.

La figura 13 ilustra una máquina trabajando entre dos recintos térmicos TH de alta temperatura, TL de baja temperatura y W el trabajo realizado.

¹ CENGEL, Yunus, Termodinámica, p. 289.

Figura 13. Segunda Ley de la Termodinámica



Fuente: elaboración propia.

En un motor encendido por compresión, la energía química contenida en el combustible diésel se transforma en energía calorífica durante el proceso de combustión, luego esta misma energía se convierte en trabajo mecánico directamente aprovechado por el eje cigüeñal del motor. Pero no toda la energía calorífica es aprovechada.

En el motor, básicamente existen dos maneras de perder energía, una parte se pierde en intentar vencer la fricción y sollicitaciones entre componentes mecánicos, la otra parte de la energía se pierde en transferencia de calor. Por experiencia se sabe que la energía tiende a fluir a un nivel menor de la que se encuentra, claro ejemplo es la electricidad que busca siempre el camino más fácil para circular o sea busca la menor resistencia a su paso.

Se han hecho esfuerzos para evitar pérdidas energéticas dentro del motor, se ha reducido la fricción al máximo con una mejor lubricación y mejor acabado superficial, fabricado piezas con materiales más ligeros y empleado materiales con bajo coeficientes de transferencia de calor. Cabe destacar que no existe

aún un motor con cien por ciento de rendimiento, esto implicaría romper la segunda ley de la termodinámica.

2.3. Tercera Ley de la Termodinámica

El tercer principio de la termodinámica afirma que el cero absoluto no se puede alcanzar por ningún procedimiento que conste de un número finito de pasos. Es posible acercarse indefinidamente al cero absoluto, pero nunca se puede llegar a él.

2.4. Ley Cero de la Termodinámica

Esta ley establece que, cuando dos cuerpos están en equilibrio térmico ambos comparten una misma propiedad llamada temperatura. La temperatura indica la magnitud del movimiento de las partículas en una sustancia, este movimiento se relaciona con la cantidad de energía cinética contenida por ellas.

En realidad, de aquí parten las demás leyes, analizando el párrafo anterior se pueden encontrar las dos primeras leyes estudiadas. Primero que existe un equilibrio térmico, es decir, ambos cuerpos alcanzarán la misma temperatura. Esto debido a que existe una transferencia de calor de un cuerpo con elevada energía interna al otro con menor energía interna, se observa energía que entra y sale. Por último, el sistema cederá energía al entorno, no solo a los cuerpos en contacto térmico, ya que este se ve afectado por la energía contenida en ambos. No existe una transferencia de calor perfecta.

2.5. Ciclo diésel teórico

El motor de combustión interna encendido por compresión basa su funcionamiento en el ciclo ideal termodinámico propuesto por Rudolph Diesel. Un ciclo termodinámico como se ha mencionado, es una serie de eventos en los que se recibe energía de un tipo a un elevado nivel, luego se convierte en trabajo la cantidad más grande posible y el resto se pierde en los alrededores.

Para estudiar el ciclo de potencia de un motor de combustión interna se eliminan todas las complejidades existentes en su operación, tales como: fricción y la falta de tiempo para que se complete el ciclo, al efectuar esto el ciclo se vuelve internamente reversible. La falta de fricción, el aislamiento en los ductos de aire y el proceso de expansión y compresión isoentrópicos son algunas de las idealizaciones que se toman para considerar este ciclo ideal.

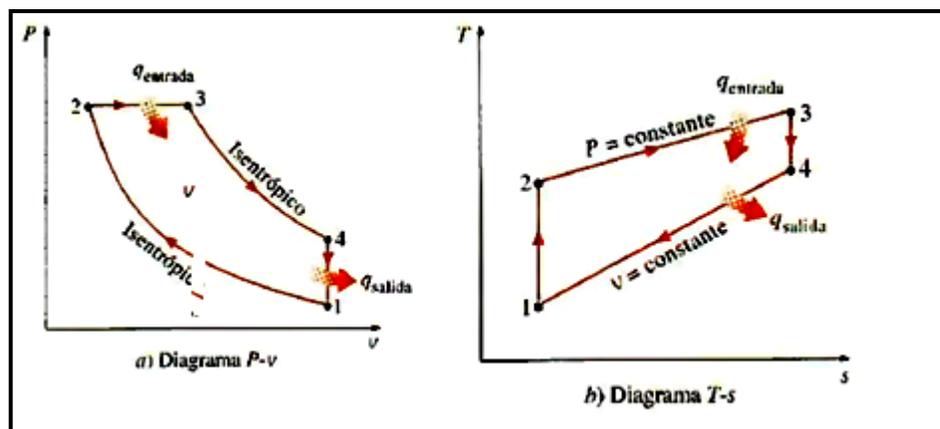
Existen otras simplificaciones que se toman para que sea más manejable el ciclo diésel, entre ellas están: el aire se considera un gas ideal o estándar, es un sistema cerrado, el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante y el proceso de escape se sustituye por un proceso de rechazo de calor a volumen constante que regresa el gas a sus condiciones iniciales.

Una herramienta muy útil para analizar el ciclo diésel son los diagramas de presión-volumen y temperatura-entropía. El diagrama presión-volumen muestra en el eje vertical la variable presión y en el eje horizontal el volumen. El diagrama temperatura-entropía enseña en el eje vertical la variable temperatura y en el eje horizontal muestra la entropía.

En realidad, los motores de combustión interna no siguen un proceso ideal, esto se asume para poder analizarlo termodinámicamente e intentar llegar al máximo rendimiento térmico teórico. El ciclo ideal diésel sigue los siguientes procesos: isoentrópico, isobárico e isométrico.

Donde obedece la siguiente secuencia de procesos, compresión isoentrópica del punto uno al dos, adición de calor a presión constante del punto dos a tres, expansión isoentrópica del punto tres al cuatro y retorna en un proceso de expulsión de energía a volumen constante, tal como lo muestra la figura 14.

Figura 14. Diagramas P-V y T-S para el ciclo diésel teórico



Fuente: CENGEL, Yunus, Termodinámica, p.506.

2.5.1. Compresión isoentrópica

La compresión isoentrópica supone que en el proceso no existe transferencia de calor, es decir, el proceso es adiabático. Al existir una diferencia de temperatura entre dos recintos habrá la posibilidad de un cambio

en las propiedades del gas en cuestión, por lo tanto habrá un cambio en el nivel de energía y, como es bien sabido por la Segunda Ley de la Termodinámica, que la transferencia de energía no es perfecta, perdiéndose una parte de ella.

Lo anterior no sucede en este proceso, ya que idealmente el sistema está aislado, es decir, el flujo neto de calor es cero. No hay cambio de entropía aunque una diferencia de temperatura involucre lo contrario. Existe un trabajo que se realiza sobre el sistema, el fluido es fuertemente comprimido dentro de la cámara de combustión, elevándose de esa manera la energía cinética molecular mostrándose la elevación de la temperatura. Por eso es que en el diagrama de temperatura-entropía sube la línea de uno a dos, como lo muestra la figura 14 parte b.

2.5.2. Adición de calor a presión constante

En este proceso se asume que la combustión ocurre a presión constante, esto debido a que el combustible se inyecta con anticipación al punto muerto superior y tomando parte del tiempo de expansión. Idealmente se recibe energía calorífica por medio de la energía química que contiene el combustible finamente atomizado y distribuido en la sección de la cámara de combustión.

En este pequeño lapso de adición de calor a presión constante las válvulas se encuentran completamente cerradas, el combustible es inyectado a velocidades supersónicas que depende del régimen de giro del motor, ocurre la primera parte de la combustión y se considera enteramente adiabático.

2.5.3. Expansión isoentrópica

Este proceso consiste idealmente en el aprovechamiento de toda la energía calorífica generada por el proceso de combustión. El aire y el combustible atomizado introducidos en la cámara de combustión se encuentran teóricamente mezclados formando una masa de gas ideal. Esta mezcla tiene que cumplir las leyes de los gases ideales, tales como: la suma de presiones parciales es igual a la presión total dentro del cilindro, tienen la misma temperatura y forman un solo volumen.

El término isoentrópico implica que no existe transferencia de calor durante el proceso, la cámara es adiabática y el gas ideal sufre una expansión, es decir, existe un aumento del volumen del aire. El aumento del aire implica una variación en sus propiedades intrínsecas. Recordando la ley de los gases ideales donde el volumen está relacionado directamente con la temperatura e indirectamente relacionado con la presión.

Por tanto, hay un aumento de volumen, una disminución de la presión y isotrópicamente la temperatura se mantiene constante. Esto en la realidad no ocurre, es cierto que la pared del cilindro se considera adiabática, pero existe fricción en la pared del cilindro, esto produce un aumento de temperatura, que en menor o mayor proporción se transfiere al gas ideal modificando las propiedades intrínsecas.

2.5.4. Rechazo de calor a volumen constante

En este proceso se inicia el rechazo de energía al exterior, esto es por medio de la expulsión de cierta cantidad de calor a un medio de menor nivel de energía. En el diagrama presión volumen, de la figura 14, se aprecia que

durante este proceso hay un descenso de la presión y en el diagrama temperatura entropía se aprecia una disminución de la temperatura, así como de la entropía. La entropía está solo en función de la temperatura, esta relación es directamente proporcional, la disminución de ambas involucra un descenso de la calidad de la energía del gas ideal. Es por eso que en la práctica este gas es sustituido por una nueva masa de aire, durante la carrera de admisión de aire.

En síntesis, estos procesos termodinámicos conforman un ciclo ideal que se deriva del ciclo ideal de Carnot. La sustancia de trabajo es aire y la fuente de calor es el combustible finamente atomizado, que pasa a formar parte del gas ideal. Con auxilio de la Segunda Ley, se puede tomar en consideración flujos de energía que producen pérdidas caloríficas que ocurren realmente durante la operación del motor, y al final dificultan obtener un rendimiento térmico parecido al de la máquina ideal de Carnot.

3. LA COMBUSTIÓN DEL MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

La combustión es una reacción termoquímica muy rápida entre el oxígeno y el combustible, para formar teóricamente CO₂ y H₂O más el consecuente desprendimiento de calor. La combustión es en realidad una reacción química exotérmica que consiste en la unión del oxígeno con una materia combustible en un espacio confinado, esta materia proporciona la energía calorífica necesaria para que acontezca la combustión.

Figura 15. Elementos del triángulo de fuego

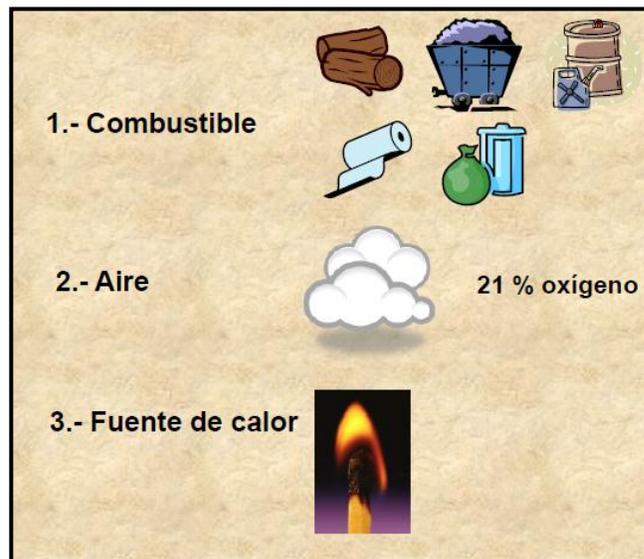


Fuente: <http://ingsixtopaz.blogspot.com/2013/06/triangulo-del-fuego.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

Básicamente, para que exista combustión son necesarios que se encuentren presentes tres elementos vitales: el combustible, oxígeno y calor, llamándose estos conjuntamente como el triángulo de la combustión, en la

figura 16 se esquematiza este concepto. Si hace falta alguno de estos elementos es imposible que surja la combustión, o si existe una proporción incorrecta entre oxígeno y combustible la combustión será ineficiente.

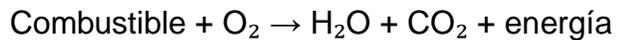
Figura 16. **Elementos de la combustión**



Fuente: <http://ingsixtopaz.blogspot.com/2013/06/triangulo-del-fuego.html>. Consulta: 27 de julio 2013.

Existe una relación de pesos o volúmenes de oxígeno y combustible que se debe cumplir en una combustión ideal, cuando se oxida todo el combustible, la combustión ocurre de manera entera, entonces se dice que la combustión es completa. Cuando la cantidad de oxígeno es insuficiente, la mezcla oxígeno-combustible es pobre y la temperatura es demasiado baja para mantener la combustión entonces se dice que la combustión es incompleta, presentándose partículas de combustible no oxidado.

También existe la combustión estequiométrica o teórica en la cual la cantidad de oxígeno es la mínima requerida para que no existan sobrantes de combustible no quemado u oxidado, esta es el punto de referencia para ajustar la combustión de los motores de combustión interna. En este tipo de combustión no existe presencia de oxígeno en los humos debido a que este se utilizó para la oxidación total del combustible. Ejemplo de la combustión de cualquier combustible con el oxígeno, según la fórmula siguiente,



El combustible reacciona químicamente con el oxígeno, para ello es necesario una adición de calor, para luego producirse el consecuente dióxido de carbono, agua y el desprendimiento de calor requerido para producir trabajo mecánico. En realidad es imposible que exista una combustión estequiométrica, ya que el aire en el ambiente solo contiene 21 por ciento de oxígeno y el resto 79 por ciento de nitrógeno en volumen, esto produce que surjan sustancias contaminantes en los humos de la combustión.

Para que se produzca la combustión de una manera eficiente, el elemento combustible debe estar presente en forma gaseosa para poder así mezclarse completamente con las moléculas presentes de oxígeno. Generalmente el elemento combustible puede ser orgánico o inorgánico. Entre los tipos de combustibles inorgánicos se puede mencionar los combustibles derivados del petróleo y los orgánicos se refieren a los biocombustibles.

Al comenzar la combustión de cualquier combustible, es importante y necesario que este logre alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como, en grados centígrados y a 1 atmósfera, temperatura a la que los vapores de un combustible arden

espontáneamente. La temperatura de inflamación, en grados centígrados y a 1 atmósfera, es aquella a la que, una vez encendidos los vapores del combustible, estos continúan por sí mismos el proceso de combustión. La combustión en los motores encendidos por compresión se basa en la inflamación espontanea del combustible.

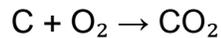
Para la ocurrencia de una idónea combustión en los motores de combustión interna encendidos por compresión se tienen que cumplir dos premisas importantes:

- El combustible que inicialmente se encuentra en estado líquido debe ser convertido ha estado gaseoso. Si el combustible es de un peso molecular alto será difícil su atomización, volviéndose dificultosa la combustión.
- Oxígeno que se encuentra en el aire y el combustible se mezclen íntimamente para formar una reacción química homogénea dentro del recinto de la combustión. Entonces, para mantener la combustión en los motores de encendido por compresión es necesario que se cuente con tiempo, temperatura y turbulencia.

La ignición del combustible se produce cuando las gotas de este, finamente formadas por el inyector están a una temperatura suficientemente alta dentro de la cámara de combustión, normalmente arriba de la temperatura de ignición. Sin embargo, si las condiciones en la cual se da la combustión no es la adecuada, el combustible se quemará parcialmente formando muchas veces carbonilla u hollín y otras partículas contaminantes.

3.1. Ecuaciones de la combustión

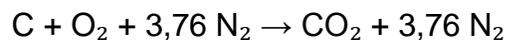
La ecuación de combustión del carbono con el oxígeno, de acuerdo con los fundamentos de la química, se presenta de la siguiente manera:



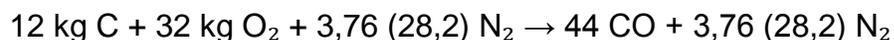
Esta ecuación implica que una molécula de carbono se combina con una molécula de oxígeno para producir una molécula de dióxido de carbono. En pesos los elementos de esta ecuación se puede expresar mediante los pesos moleculares siguientes,



La ecuación anterior encierra que doce kilogramos de carbono se unen con treinta y dos kilogramos de oxígeno para formar cuarenta y cuatro kilogramos de dióxido de carbono, esto es una reacción química de combustión completa. Debido a que la combustión se realiza con aire, se debe tomar en cuenta el porcentaje de nitrógeno presente en la mezcla, existe una relación molar entre el oxígeno y el nitrógeno, la cual establece que para cada mol de oxígeno lo acompaña 3,76 moles de nitrógeno. Por consiguiente la ecuación queda de la siguiente manera:



En forma de pesos moleculares resulta de la siguiente manera,

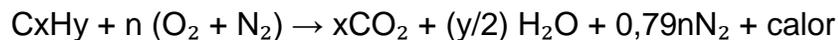


Dividiendo sobre doce en ambos lados,



Balanceada la ecuación de la reacción química, se nota que es necesario 11,5 kilogramos de oxígeno para que se queme toda la cantidad de carbono presente y sin restos del elemento combustible que en este caso es el carbono.

El proceso de combustión en los motores de encendido por compresión se utiliza como combustible el mencionado hidrocarburo diésel No.2D, el cual cumple con la formula C_xH_y , además, estequiométricamente se debe cumplir con la siguiente ecuación química balanceada,



3.2. Propiedades del aire

El comburente utilizado para la combustión en los motores de combustión interna proviene del ambiente, recibiendo el nombre general de aire. El aire es el agente que aporta el oxígeno requerido para la reacción de combustión, siendo la fuente más usual y económica disponible.

El aire seco presente en el ambiente es una mezcla de gases que ciertamente contienen una proporción representativa de volúmenes, expresado en porcentajes, 20,99 por ciento de oxígeno, 78,03 por ciento de nitrógeno, 0,94 por ciento de gases inertes, 0,03 por ciento de bióxido de carbono y 0,01 por ciento de hidrógeno. Por cuestiones prácticas se considera que el aire del ambiente está compuesto de 21 por ciento de oxígeno y 79 por ciento de nitrógeno, tal como se ha estado trabajando.

El nitrógeno no interviene en la combustión, pero debe ser tomado en cuenta. Se ha visto que existen 3,76 moles de nitrógeno por mol de oxígeno, por consiguiente, en la reacción oxidante resultan gases no quemados por la falta de partículas de oxígeno. En el caso de un motor de combustión interna esos gases no quemados se presentan como carbonilla u hollín, que en realidad son muy contaminantes para el medio ambiente.

Para que ocurra la oxidación completa del elemento combustible en la reacción exotérmica es necesario un mínimo de moles de oxígeno, este recibe el nombre de aire teórico. Este supone que se cuenta con la cantidad de moles necesario para que se queme todo el combustible, produciéndose solamente CO_2 y H_2O .

En la práctica real siempre es necesario un excedente de aire con relación al aire teórico, con la finalidad que se encuentren las partículas suficientes de oxígeno para lograr quemar todas las moléculas del combustible debidamente pulverizadas

3.3. Elementos combustibles en los carburantes

Los combustibles comerciales utilizados en los motores de combustión interna derivados, particularmente del petróleo, están acompañados de elementos carburantes, que son los que hacen posible el aprovechamiento de la energía calorífica que se desprende mediante la reacción de combustión.

Los elementos carburantes fundamentales que predominan en los combustibles son el carbono y el hidrógeno. En muchas ocasiones los combustibles comerciales contienen pequeñas cantidades de azufre, este

elemento no se considera como combustible, sino como un elemento indeseable debido a la corrosión y contaminación que puede provocar.

3.4. Combustión con aire

En los motores de encendido por compresión se utiliza aire atmosférico para la combustión y no con oxígeno, como teóricamente debería de ser. Los gases inertes que contiene el aire atmosférico simplemente se diluyen con el oxígeno y muchas veces aparece como productos no quemados en los gases de combustión.

Es necesario cierto exceso de aire para que se complete la combustión de los elementos carburantes de los combustibles comerciales. Dicho exceso de aire dependerá, generalmente de la calidad del combustible, se deberá tener precaución, ya que un exceso de oxígeno podría provocar problemas de corrosión y una mezcla demasiado pobre, disminuyendo la eficiencia de combustión y por ende un menor trabajo mecánico en el eje cigüeñal, en el caso de los motores de combustión interna.

Una mezcla pobre, además de los problemas de rendimiento, surgirán una cadena de inconvenientes que afectaran el funcionamiento correcto de un motor diésel. Por ejemplo, un cabeceo característico de los motores fríos, corrosión en los pistones y culata, exceso de humo de escape, entre otros.

Los fabricantes de motores de combustión interna establecen un criterio de relación de cantidades de aire y combustible que varían de acuerdo al tipo de combustible utilizado, al país y clima donde operara dicho motor, y de acuerdo al diseño de la cámara de combustión. Dicha relación que se debe

cumplir, por lo menos estequiométricamente, recibe el nombre de relación aire-combustible, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Aire-combustible: peso del aire / peso del combustible}$$

Comúnmente, los motores encendidos por compresión mantienen una relación aire-combustible de 15 a 1, es decir, se necesitan 15 kilogramos de aire para que se queme 1 kilogramo de combustible diésel. Experimentalmente se ha visto que esta misma relación se mantiene cuando se utiliza como comburente los combustibles alternativos llamados biodiésel.

3.5. Calor de combustión

El calor de combustión o entalpia de reacción de un combustible es igual al aumento de calor liberado cuando se quema completamente y los productos resultantes son enfriados hasta la temperatura a la cual iniciaron la combustión. La entalpia de reacción será diferente dependiendo de la presión y temperatura específicas existentes en la cámara de combustión.

El calor de combustión liberado en un proceso de oxidación puede ocurrir de dos maneras: a volumen constante o a presión constante. En ambos procesos ocurre una reacción exotérmica.

La diferencia práctica se observa en los dos tipos de motores más comunes. En un motor encendido por chispa la combustión ocurre teóricamente a volumen constante, en cambio un motor encendido por compresión, la combustión ocurre teóricamente a presión constante. Esto es fácilmente observado en los diagramas de los ciclos otto y diésel.

3.6. Poder calorífico superior e inferior

Otro término importante utilizado en la combustión es el poder calorífico del combustible o a veces llamado potencia calorífica. El poder calorífico de un combustible se define como la cantidad de calor liberado por unidad de peso o volumen cuando este se quema por completo en un proceso de flujo estacionario y los productos resultantes regresan al estado inicial. En otras palabras, la potencia calorífica es el valor absoluto de la entalpia de combustión del combustible, es decir:

$$\text{Poder calorífico} = | \text{entalpia de combustión} | \text{ en joule/kilogramo}$$

Los combustibles que contienen hidrógeno, poseen dos poderes caloríficos, el superior e el inferior. Este hidrógeno usualmente se encuentra presente con oxígeno para formar H_2O , el poder calorífico presente dependerá del estado en que se encuentre el agua.

Si el agua se encuentra en fase de vapor, el poder calorífico se denominará poder calorífico inferior. Estas potencias caloríficas pueden determinarse a partir de cálculo o mediante un calorímetro.

3.7. Proceso de la combustión

La combustión que acontece en un motor de encendido por compresión basa su principio en la elevación de presión y temperatura de la sustancia operante dentro de la cámara de combustión, en este caso el aire, para luego, por medio de la inyección del elemento combustible debidamente atomizado pueda ser quemado, de esa manera producir la presión requerida sobre los

émbolos del motor y producirse el trabajo mecánico que será transmitido por el eje cigüeñal a los elementos motrices hasta el volante del motor.

En el motor encendido por compresión se comprime aire en la carrera de compresión dentro de la cámara de combustión, llevándolo a altas temperaturas. A continuación se introduce el chorro de combustible finamente atomizado a presiones regularmente entre 105,4 hasta 2 109 kilogramos por centímetro cuadrado. En tales condiciones el combustible se desintegra en un núcleo de combustible rodeado por una cubierta con partículas de aire y combustible pulverizados.

El combustible líquido se inyecta en forma de finas gotas al final del periodo de compresión del cilindro. En tal punto el aire comprimido está bastante por encima de la temperatura de ignición del combustible, por lo cual la ignición se produce de una manera instantánea. Sin embargo, existe un lapso de tiempo suficiente como para que parte del combustible se evapore. Este se mezcla seguidamente con el aire y se forman reacciones de preinflamación por rotura de moléculas de combustible en presencia de aire para formar radicales, que son sustancias inestables con gran facilidad para reaccionar, los cuales son capaces de extender la cadena de reacción de combustión exotérmica.

Normalmente, la formación de la mezcla y las reacciones de pre inflamación se producen en diversos puntos alrededor del chorro de combustible. Estas reacciones de preinflamación inducen a cierto retraso, del cual se debe mantener un estricto control. Se desea que este retraso sea lo más corto posible, ya que si es muy largo el tiempo de estas prereacciones podría producirse el golpeteo.

El golpeteo causa una gran pérdida de energía calorífica, eficiencia del motor y puede llevar incluso a provocar averías. Este típico golpeteo en un motor de encendido por compresión se acentúa cuando el motor está frío o con bajas cargas. Para controlarlo es importante poseer un combustible que se autoinflame fácil e instantáneamente.

La medida de la calidad de la ignición por compresión es el llamado número de cetano, cuanto mayor sea este número menor tenderá al golpeteo. Se manejan confiablemente un Número de cetano alrededor de 100 para los motores encendidos por compresión.

Las características de combustión de un combustible pueden ser comprendidas por medio del análisis de desprendimiento de calor y mediante la observación de la presión en el cilindro durante el proceso de combustión. Mediante el análisis de estos se consigue obtener suficiente información sobre el proceso de combustión y la existencia de alguna anomalía.

En el siguiente tema se estudiará el diagrama de presiones-tiempo que gobierna dentro del cilindro de un motor, el cual permitirá comprender lo que ocurre durante un ciclo del motor de cuatro tiempos y se desenvuelve la combustión durante su ocurrencia en las carreras de compresión y expansión.

3.8. Diagrama de presión

Para comprender el ciclo de un motor de cuatro tiempos, estudiar la variación de la presión en el interior del cilindro en función del tiempo o del ángulo girado por el cigüeñal y comprender algunos fenómenos que ocurren durante la reacción de combustión se utiliza el llamado diagrama de presión-tiempo o presión-ángulos del cigüeñal. Los valores que este diagrama presente

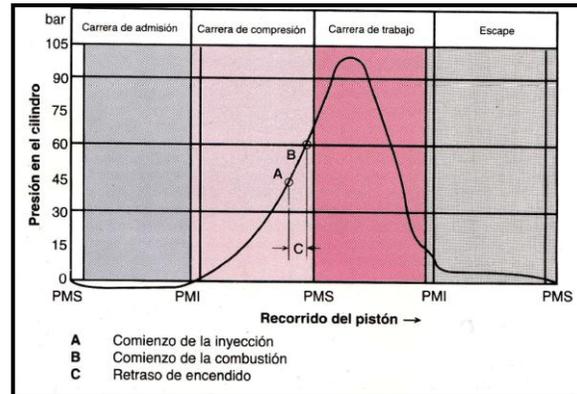
variarán según el fabricante del motor, según las condiciones ambientales y el estado del motor.

En este diagrama se representa en ejes cartesianos las variables de presión y tiempo, sobre el eje horizontal el giro del cigüeñal contado desde el inicio de la carrera de admisión hasta la carrera de escape, y en el eje vertical las presiones dentro del cilindro durante el desarrollo de un ciclo completo del motor.

En la figura 17 se puede observar un diagrama presión-tiempo básico para un motor encendido por compresión. El diagrama señala que es necesario que se inyecte el combustible un tiempo antes del punto muerto superior, punto A. En la práctica este ángulo dependerá del fabricante, se manejan ángulos entre 6 y 14 grados antes del punto muerto superior (PMS). Este retraso de la inyección se debe a que se requiere un tiempo prudencial para que se logre mezclar el combustible dosificado con el aire a alta temperatura y se pueda empezar la combustión, punto B.

El tiempo que se lleva del comienzo de la inyección hasta el inicio de la combustión se conoce como retraso de encendido, distancia C. El inicio de la inyección debe ser al instante preciso para obtener el mayor aprovechamiento de la energía que libera la combustión. Esto se logra con una sincronización correcta de la bomba de inyección según los datos del fabricante.

Figura 17. **Diagrama presión tiempo para motor encendido por compresión**



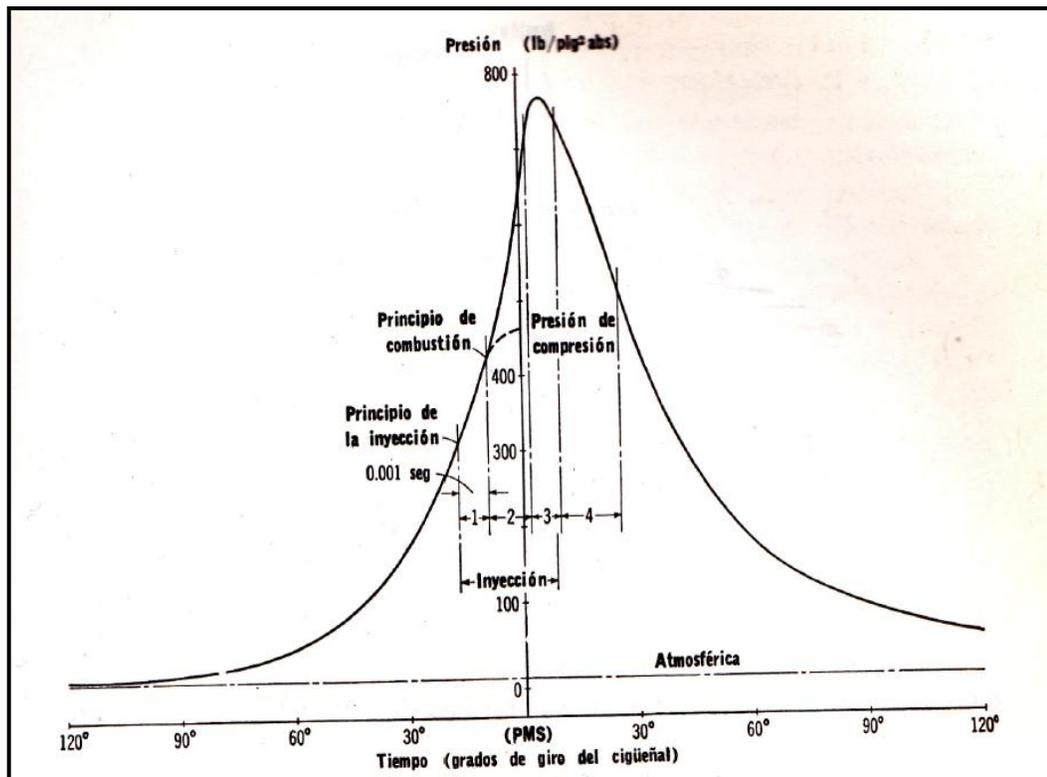
Fuente: BICKEL, Jon, Control de emisiones de gases. p.6.

3.9. Período de la combustión

En el diagrama presión-tiempo de la figura 18 se hacen notorios ciertas características de la reacción de combustión exotérmica en un motor encendido por compresión. Se logra además, ilustrar en la figura 18, cuatro etapas de la combustión. Ellas son las siguientes:

- Demora del encendido, en 1.
- Combustión incontrolada, en 2.
- Combustión controlada, en 3.
- Incendio atrasado, en 4.

Figura 18. Diagrama presión tiempo para motor encendido por compresión a inyección mecánica y plena carga



Fuente: OBERT, Edward. Motores de combustión interna análisis y aplicaciones. p.193.

Si el tiempo de demora o retraso de encendido 1, es mayor al normal, habrá un aumento de combustible inyectado, inicio en 2, el cual se irá acumulando para luego auto encenderse violentamente en la etapa controlada de la combustión 3. Por otro lado, si el periodo de demora es pequeño comparado con la duración de la inyección, se disminuirá la sobrepresión en la etapa de la combustión controlada 3 debido a que aumentará el periodo de la etapa de combustión incontrolada 2, es decir, en la segunda etapa existirá más tiempo para que más gotas de combustible se incendien en el seno del aire caliente.

3.9.1. Demora del encendido

Se ha dicho que la demora del encendido se refiere al tiempo transcurrido desde el comienzo de la inyección hasta el inicio de la combustión. La demora de encendido se divide en dos etapas, la primera etapa recibe el nombre de demora física, la segunda etapa se conoce como demora química. Ambas demoras deben ser controladas para que acontezcan antes del punto muerto superior.

La etapa de la demora física se refiere al lapso entre el comienzo de la inyección y el logro de las condiciones de la reacción química. En este periodo el combustible es dosificado, inyectado, atomizado, mezclado con el aire comprimido y aumentado su temperatura.

En la etapa de demora química, la reacción inicia relativamente lenta y luego se acelera hasta que ocurre la inflamación, esto es antes del punto muerto superior. Para que esta etapa ocurra de la mejor manera posible es necesaria una gran turbulencia, de esa manera pueda mezclarse homogéneamente el combustible con el aire y se logre completar la combustión.

En resumen se puede decir, que la demora del encendido de un motor consiste en la suma de la demora física y la demora química respectivamente. La desintegración del combustible inyectado, mezclado del combustible con el aire, vaporización del combustible, mezcla del vapor de combustible con el aire, oxidación del combustible antes de haber inflamación y encendido local comprenden el retraso del encendido para los motores encendidos por compresión.

3.9.2. Elevación rápida de la presión

El combustible líquido se inyecta en finas gotas al final de la carrera de compresión. El aire en este punto tiene una temperatura superior a la temperatura de ignición del combustible, de manera que la ignición se produce de una forma rápida. Sin embargo, existe un lapso de tiempo suficiente como para que parte del combustible se evapore, es aquí donde este se mezcla instantáneamente con el aire y se forman las primeras reacciones de preinflamación que se van expandiendo por toda la cámara de combustión.

Esta etapa se conoce también, como combustión por inflamación de la premezcla. En este caso se presenta una rápida elevación de la presión como consecuencia de la presencia de puntos de incendio y la acumulación de combustible durante el periodo de demora. En esta etapa se forma la llama que terminará de encender el restante de combustible que será inyectado.

El motor encendido por compresión tiene tendencia a las sacudidas, porque la presión inicial se eleva brusca y repentinamente. El autoencendido no produce solamente las altas relaciones de la elevación de la presión, sino que también la aceleración extremadamente alta de esas relaciones. Debido a que se producen presiones muy altas en los motores encendidos por compresión estos deben ser construidos más pesados y robustos.

3.9.3. Presión controlada

Una vez la combustión ha iniciado, el combustible actúa parecido a una llama de difusión. Es decir, es inyectado en forma de chorro se mezcla y va reaccionando con el aire hasta formar zonas de rocío.

Esta llama que alcanza el punto estequiométrico de la combustión, se encarga de quemar más homogéneamente la mezcla de aire-combustible que se fue formando durante la demora de encendido y la combustión incontrolada. Para lograr una buena mezcla los motores de encendido por compresión necesitan velocidades de torbellino muy altas.

Durante el periodo controlado de combustión, el combustible se quema según se va inyectando a una velocidad constante, por esta razón se considera que la combustión se efectúa a presión constante.

3.9.4. Incendio en la carrera de expansión

Debido a que por naturaleza se van formando zonas ricas y pobres en el proceso de combustión se van formando partículas no quemadas de combustible, al final estas partículas serán quemadas durante la carrera de expansión, ya que aun se cuenta con el calor suficiente para su oxidación. En la mayoría de veces esas moléculas de combustible no se queman, debido a que se encuentran como partículas de carbón.

Esas partículas de carbón, ya casi sólidas, es imposible que se oxiden y puedan participar en la combustión, debido a que durante la carrera de expansión existe un enfriamiento de la mezcla. Este enfriamiento prácticamente solidifica las gotas de combustible no quemadas, volviéndose sumamente difícil su reacción química.

Muchas veces este carbón tiende a formar la famosa carbonilla. En los motores encendidos por compresión es muy común que se formen partículas de carbonilla durante este periodo de la combustión.

4. FUNDAMENTOS DEL ACEITE COMBUSTIBLE: BIODIÉSEL Y DIÉSEL COMERCIAL No. 2-D

Se han hecho grandes esfuerzos para mejorar el nivel de vida del hombre mediante el desarrollo de nuevos productos y tecnologías. Como contra parte esto ha venido aumentando el deterioro ambiental y contaminación hasta el punto de que una gran parte del aire, agua y tierra están contaminados.

En el sector automotriz se han efectuado ciertas actividades que han propiciado un nuevo horizonte sobre el cuidado del medio ambiente. Tales actividades como pequeñas modificaciones a los vehículos, rediseño de motores y hasta la implementación de biocombustibles.

A pesar que, los combustibles derivados de los hidrocarburos, como el diésel, han provocado mucho daño a la atmósfera, sin embargo, no es justo menospreciar el gran avance tecnológico que estos han permitido alcanzar. Avances tecnológicos como el desarrollo de motores de alto rendimiento, desarrollo de aviones JET, entre otros.

El combustible comercial utilizado en los motores encendidos por compresión debe cumplir ciertos requerimientos para que se produzca adecuadamente una dosificación, mezclado y oxidado durante el proceso de la combustión.

Los biocombustibles deben cumplir estrictamente con los mismos requerimientos del combustible diésel.

4.1. El petróleo

El petróleo es, actualmente, la principal fuente de energía, y la materia prima más importante objeto de comercio entre países en todos los continentes. En realidad, más de la mitad de la energía que mantiene en actividad a la civilización proviene de esta fuente energética no renovable.

El petróleo, aceite crudo o vagamente llamado oro negro tiene su origen en la descomposición de los pequeños organismos acuáticos que vivían en los antiguos mares de la Tierra hace millones de años. Organismos que provenían de especies animales y vegetales que morían y caían al fondo de las grandes masas de agua, para luego descomponerse con el paso del tiempo hasta formar el aceite crudo.

El petróleo es un líquido viscoso de color verde, amarillo, marrón o negro, que está constituido por diferentes hidrocarburos, es decir, está conformado por compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno en cantidades variables. De esa manera, cada uno tiene sus propiedades químicas y físicas, características y su fórmula molecular. Se puede decir que varían grandemente según el depósito en que se encuentren.

Los elementos químicos que predominan en el petróleo son el carbono e hidrógeno, unidos mediante cadenas largas, ramificaciones y anillos. El petróleo contiene, además otros elementos, o impurezas, de importancia tales como: el azufre, el nitrógeno, el oxígeno y agua.

Aunque los componentes del petróleo varían ampliamente de depósito a depósito, los constituyentes finales son relativamente fijos, el porcentaje de carbono varía generalmente de 83 a 87 por ciento y el de hidrógeno de 11 a 14

por ciento. Los hidrocarburos derivados del petróleo, generalmente se dividen en tres familias según su composición química, ellas son las parafinas, naftenos y aromáticos. En la tabla I se muestran las fórmulas generales de las familias de hidrocarburos.

Tabla I. **Principales familias de hidrocarburos en el aceite crudo**

Familia		Fórmula	Estructura
Parafina		C_nH_{2n+2}	Cadena
Nafteno		C_nH_{2n}	Anillo
Aromáticos	Benceno	C_nH_{2n-6}	Anillo
	Naftaleno	C_nH_{2n-12}	Anillo

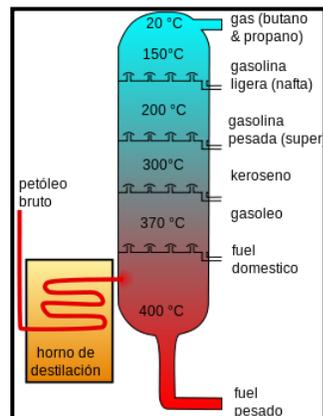
Fuente: OBERT, Edward. Motores de combustión interna análisis y aplicaciones. p.275.

El petróleo, comúnmente se encuentra en el fondo de los océanos, para lo cual se utilizan plataformas submarinas para su extracción. Un ejemplo de este tipo de extracción se puede observar en el golfo de México. Una vez se ha extraído el petróleo se procede a llevarlo a las refinerías, en donde se limpia y transforma en combustibles útiles, tales como el diésel y la gasolina.

El primer paso para la obtención de derivados comercializables e útiles a partir del petróleo crudo es la destilación fraccionada. Este proceso se basa en la obtención de diferentes productos derivados del petróleo a partir del calentamiento y la consecuente ebullición de los diferentes compuestos que lo conforman.

En la figura 19 se observa de una forma simplificada del proceso de la destilación fraccionada, el cual es el primer paso para cualquier otro proceso de refinación para obtener algún otro tipo de combustible especial.

Figura 19. **Destilación fraccionada del petróleo**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Petr%C3%B3leo>. Consulta: 27 de julio de 2013.

El petróleo crudo hierve, aproximadamente a casi 400 grados centígrados. El proceso de fraccionamiento comienza cuando se introduce el petróleo a la parte baja de la torre de destilación. Todas las sustancias que se evaporan a esa temperatura pasan como vapores a la cámara superior algo más fría y en ella se condensan las fracciones más pesadas que corresponden a los aceites lubricantes.

Cada hidrocarburo que compone el petróleo tiene diferentes temperaturas de ebullición, por tanto se formarán diferentes productos. De esa forma se obtiene el combustible diésel, gasolina, keroseno, entre otros.

4.2. Diésel derivado del petróleo

La palabra diésel se deriva del nombre del ingeniero alemán Rudolf Christian Karl Diesel, que en 1892 inventó el motor encendido por compresión o como actualmente se le conoce motor diésel. Este es un combustible derivado del petróleo mediante el proceso de destilación fraccionada. Este combustible se encuentra presente, generalmente, por compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos.

El mejor combustible diésel se obtiene entre la fracción de keroseno y los aceites combustibles domésticos (figura 19). En el combustible diésel el número de carbonos es regularmente fijo, pudiéndose encontrar entre el C10 y C22. La fórmula general del combustible diésel es $C_{12}H_{23}$. Sin embargo, se manejan rangos de composiciones químicas que van desde $C_{10}H_{20}$ al $C_{15}H_{28}$.

El diésel es relativamente más simple de refinar en comparación con la gasolina. Es combustible contiene hidrocarburos con una temperatura de ebullición entre 180-360 grados centígrados. Las propiedades físicas y químicas de los aceites combustibles para motores encendidos por compresión dependen de la calidad de su proceso de refinación para su obtención.

Los combustibles para motores de encendido por compresión se pueden clasificar según su volatilidad y la velocidad del régimen de giro del motor. En Guatemala existen las Normas COGUANOR, las cuales clasifican los combustibles diésel en tres tipos: aceite combustible para motores diésel grado No.1-D, grado No. 2-D y grado No. 4-D. El combustible que tiene mayor comercialización en Guatemala es el de grado No. 2-D.

El aceite combustible grado No. 2-D es el que se utiliza normalmente para los motores de vehículos livianos, de transporte pesado, maquinaria agrícola, motores estacionarios, generadores eléctricos de emergencia, motores para molinos de maíz, algunas aplicaciones en hornos para preencendido, entre otros. Este combustible se caracteriza por trabajar con motores de encendido por compresión con velocidades uniformes y cargas relativamente altas.

Todos los combustibles derivados de la destilación del petróleo causan contaminación a la ecología. A través de los gases de escape resultado del proceso de combustión salen vapores que son los que dañan el medio ambiente. El combustible diésel No. 2-D vendido en las bombas de las estaciones de combustible no siempre son limpios, esto viene a aumentar los efectos negativos a la ecología, sin mencionar los daños que pueden causar al sistema de inyección de los motores.

Generalmente, los elementos del combustible que son expulsados en los gases de escape y causan contaminación a la ecología son: el azufre, el nitrógeno, hidrocarburos, carbono, entre otros.

El azufre sale expulsado de los gases de escape como óxido de azufre, el cual al unirse con la humedad del aire se convierte en ácido sulfúrico, aportando a la creación de lluvia ácida. Este elemento también provoca algunos efectos negativos, semejantes a severos ataques químicos en la bomba de inyección, válvulas de escape, colector de escape y álabes de turbina del turbo-cargador.

El nitrógeno sale expulsado en los gases de escape como óxido de nitrógeno a causa de altas temperaturas en el motor. Esta excesiva temperatura puede ser debido a problemas en el sistema de enfriamiento, mala

sincronización del sistema de inyección, problemas en el empaque de culata, entre otros. Este elemento, también contribuye a la formación de la lluvia ácida.

Los hidrocarburos y carbonos son generalmente expulsados en los gases de combustión a causa de una combustión incompleta. Esta combustión incompleta es provocada por la escasez de oxígeno en la reacción de combustión. Los sobrantes de estos elementos en combinación con el oxígeno del ambiente constituyen el monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros hidrocarburos que son causantes del efecto invernadero.

Para impedir la contaminación al ambiente, el desgaste y la corrosión del sistema de inyección y partes internas de los motores encendidos por compresión se requiere que el aceite combustible sea muy limpio y que cumpla con algunas especificaciones técnicas y calidades establecidas por cada país.

4.3. Especificaciones para aceite combustible

El combustible diésel No. 2-D debe cumplir con algunas especificaciones técnicas requeridas para ser utilizado en los motores encendidos por compresión.

Estas características fueron establecidas con varios objetivos, tal como, proteger las partes internas del sistema de inyección y motor, proteger la salud humana y cuidar al medio ambiente.

En la tabla II se aprecian algunas especificaciones básicas para este combustible.

Tabla II. **Especificaciones para el combustible diésel No. 2-D**

Parámetro	Norma	Unidades	UNE en 590 Diésel No. 2-D
Densidad (15°C)	En ISO 12185	g/cm ³	0,820-0,850
Viscosidad cinemática	En ISO 3104	cSt	2,0-4,5
Punto de inflamación	En ISO 3679	°C	55 min
Azufre	En ISO 14596	Ppm	350 máximo
Residuos carbonosos (10%)	En ISO 10370	%	0,30 máximo
Contaminación total	En ISO 12662	Ppm	24 máximo
Agua	En ISO 12937	Ppm	200 máximo
Corrosión de cobre	En ISO 2160	-	Clase 1
Cenizas sulfatadas	En ISO 6245	%	0,01 máximo
Estabilidad de oxidación	En ISO 12205	mg/l	25 máximo
Número de cetano	En ISO 5165 ASTM D613	-	51 min
Índice de cetano	En ISO 4264 ASTM D4737	-	46 min

Fuente: CIRIA, Ignacio, Propiedades y características de combustibles diésel y biodiesel.

Consulta: 27 de julio de 2013.

4.3.1. Número de cetano

Este número guarda relación con el tiempo que se ocupa entre la inyección del combustible y el comienzo de su combustión, llamado intervalo de encendido. Una buena combustión, en los motores diésel, ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del combustible.

Para determinar el número de cetano de un combustible se hace una comparación de la facilidad de inflamación del combustible en cuestión con la de un combustible de referencia, usualmente se compara con el cetano al cual se le asigna el número de 100. Esta comparación se efectúa utilizando un motor de prueba, diseñado para evaluar el retraso de ignición del combustible.

En los motores diésel, es preferible números de cetano del orden de 50 a 60. Cuando este es más elevado, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. En caso contrario, aquellos combustibles con un bajo número de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y luego se queman espontáneamente, produciéndose elevaciones de presión demasiado bruscas.

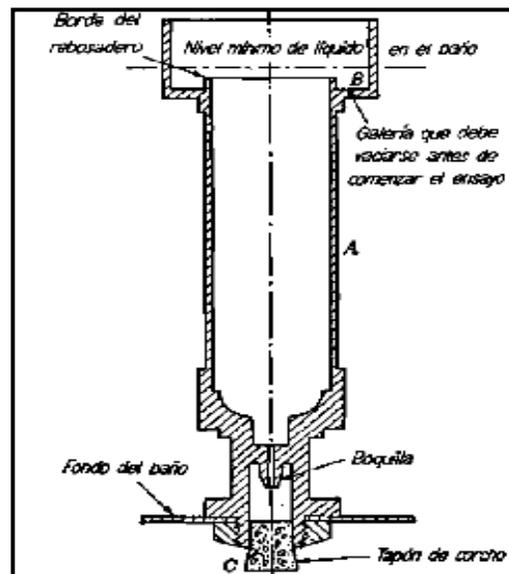
Si el número de cetano es demasiado bajo, por ejemplo 40, ocasionaría aumento excesivo de los humos de escape, demasiado golpeteo, fatiga del motor, aumento de consumo de combustible y pérdidas significativas de potencia.

4.3.2. Viscosidad

La viscosidad de un fluido se define teóricamente como la relación del esfuerzo cortante entre la velocidad de corte. En términos generales, la viscosidad se liga al tiempo requerido para que cierta cantidad de un fluido pase a través de un orificio sometido a la fuerza de gravedad.

La figura 20 muestra el diagrama de un viscosímetro Saybolt, mediante este aparato puede determinarse la viscosidad de cualquier fluido. Entonces, la viscosidad Saybolt es el tiempo, en segundos, requerido por una muestra de aceite de 66 centímetros cúbicos para fluir a través del tubo de salida calibrado. Al realizar la medición el aceite debe mantenerse a una determinada temperatura mediante un baño de agua controlado.

Figura 20. **Viscosímetro Saybolt**



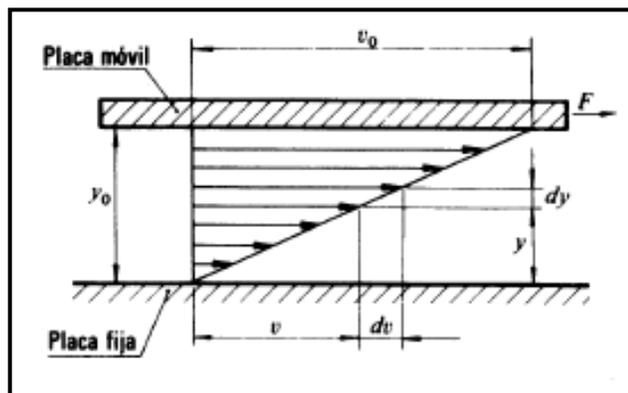
Fuente: SEVERNS, William, La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. p.107.

La viscosidad es una medida de la resistencia que opone un fluido a fluir. En una tubería esta resistencia va en aumento del centro de la sección a la superficie de contacto entre el fluido y la tubería. La resistencia de un líquido a fluir está relacionada directamente a la rugosidad de la tubería por la cual circula.

Cuando aumenta la rugosidad aumenta la resistencia al flujo, esto significa que se pierde energía cinética en forma de calor. En caso contrario el fluido circula con mayor libertad y por ende se pierde menor energía cinética al fluir.

Existen dos tipos de viscosidad, la dinámica y la cinemática. La viscosidad dinámica o absoluta fue analizada y establecida por Isaac Newton, la cual se muestra esquemáticamente en la figura 21.

Figura 21. **Viscosidad dinámica de un fluido entre dos placas**



Fuente: MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, segunda edición. p. 22.

La ley experimental de Newton sobre la viscosidad dinámica afirma que la resistencia de un fluido a fluir depende de fuerzas F y esfuerzos cortantes y de

la velocidad del fluido. La viscosidad dinámica de los fluidos newtonianos, fluidos de pequeña densidad, depende de la presión y la temperatura.

La viscosidad cinemática es directamente proporcional a la viscosidad dinámica e inversamente proporcional a la densidad del mismo. La viscosidad cinemática se expresa en unidades convenientes, generalmente se utiliza las dimensionales metros cuadrados por segundo. Esta viscosidad es la que mayormente influye en el combustible diésel el cual fluye dentro de la bomba de inyección, tuberías de baja y alta presión, inyectores y finalmente se atomiza en la cámara de combustión.

La viscosidad del combustible desempeña una gran influencia en la formación del rocío. Altas viscosidades producen poca atomización, gotas muy grandes, alta penetración del chorro, una combustión rica, exceso de hollín y por ende efectos negativos al medio ambiente por los hidrocarburos no quemados.

Muy bajas viscosidades provocan fugas en los elementos dosificadores de la bomba de inyección, en las tuberías de baja y alta presión y en las agujeras de las toberas de los inyectores. Estas fugas se acentúan más cuando existe desgaste en los elementos donde haya rozamiento.

La viscosidad del combustible diésel No.2-D debe cumplir una viscosidad en la cual no existan pérdidas de potencia debidas a fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además este combustible debe cumplir con características mínimas lubricantes para los elementos móviles dentro de la bomba y el inyector.

Es importante saber que el combustible diésel No.2-D debe trabajar en las condiciones óptimas del motor, si existe un sobrecalentamiento habrá una variación de la viscosidad, esta disminuirá, y por ende existirán los inconvenientes mencionados anteriormente.

4.3.3. Gravedad American Petroleum Institute (API)

Es un indicativo de la densidad o peso por unidad de volumen del combustible. La gravedad específica se define como el peso de la unidad de volumen de un fluido comparado con el mismo volumen de agua a 15 grados centígrados. La gravedad API es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. La gravedad API se define en función de la gravedad específica como:

$$\text{Gravedad API} = (141,5/\text{GE a } 60^{\circ}\text{F}) - 131,5$$

La industria petrolera expresa las densidades en grados de la escala API. La densidad o gravedad API relaciona el peso del aceite por volumen, así como el poder calorífico por peso.

La densidad o gravedad API expresa una idea del contenido de energía del combustible. Por lo mismo, mayores densidades indican mayor energía térmica y aumento en la economía del combustible.

4.3.4. Azufre

Este elemento se encuentra en mayor cantidad en el combustible diésel que en el combustible gasolina. El azufre contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos carbonosos en los émbolos y anillos del motor.

Cuando existe azufre en el combustible y existe un exceso de oxígeno, mezcla pobre, resulta la formación de trióxido de azufre en el proceso de combustión. Este elemento resultante ataca el aceite lubricante en las paredes de los cilindros, quedando materiales adheridos a las paredes como barnices y carbón.

Cuando el azufre se une como agua se forma ácido sulfúrico, el cual es el principal causante de la corrosión y abrasión. Se ha concluido que un contenido de azufre superior al 1 por ciento es perjudicial, en tanto que cantidades inferiores a 0,5 por ciento son aceptables.

4.3.5. Residuo de carbón

Cuando en el proceso de combustión existe una cantidad limitada de oxígeno, resulta, generalmente, un producto llamado residuo carbonoso. Esto es porque el combustible no cuenta con el oxígeno necesario para poder producirse la combustión completa, es decir, las moléculas del combustible no encuentran las moléculas de oxígeno suficientes para quemarse.

Los resultantes residuos de carbón tienden a formar depósitos carbonosos en la cámara de combustión, en los émbolos del motor y en las toberas de los inyectores. Cuando se forman estos depósitos en las toberas existe cierta interferencia a la formación del rocío del combustible, produciéndose una deficiencia en la combustión.

4.3.6. Ceniza

En la última etapa de la combustión, incendio tardío, se queman los demás elementos carburantes del combustible, por acción de la llama. Cuando

la llama se ha disipado y no llega a quemarlo todo, lo sobrante se quema por la acción del calor que se transfiere por convección y conducción que existe. Pero esta oxidación no es lo suficiente para reaccionar exotérmicamente y producir trabajo, por lo que tiende a formar cenizas.

El contenido de ceniza especificado en las tablas de propiedades de los combustibles es un indicador de lo abrasivo de los productos de la combustión, que vendrán a provocar desgaste y deterioro en el motor.

4.3.7. Agua y sedimentos

El factor limpieza es una de las especificaciones de gran importancia en el combustible diésel, seguramente debido a la precisión a la cual están acopladas las partes internas de la bomba de inyección y de los inyectores. Cualquier suciedad puede provocar serias averías, que obligarán a realizar reparaciones de gran costo y tiempo.

El agua en exceso es causa de problemas, por ejemplo, corrosión en las partes internas de la bomba inyectora y en las toberas. El agua se forma por la condensación en el tanque de combustible.

Se sabe que el agua nunca viene sola, casi siempre viene acompañada de sólidos en suspensión o disueltos. La existencia de agua y sólidos en los elementos filtrantes puede ocasionar taponamientos de los mismos, con los consecuentes inconvenientes de desgaste excesivo de los elementos de bombeo y problemas por mala combustión.

4.3.8. Calidad de encendido

La facilidad del encendido del aceite combustible en el motor diésel, se le conoce como calidad de encendido del combustible. Un fácil e instantáneo encendido en los motores diésel es de vital importancia, ya que usualmente no se cuenta con una fuente externa para lograrlo, se depende únicamente de la alta temperatura que se alcanza en la cámara de combustión y de la calidad del combustible para auto-encenderse.

La medida por la cual se mide la calidad de encendido del combustible diésel No. 2-D es el número de cetano. Este número representa que tan inflamable es el combustible, mientras más inflamable es un combustible más rápido será la ignición y menor tiempo ocupará el retraso de encendido.

Por tanto, el número de cetano es una medida de la calidad de ignición de un combustible, el cual influye directamente en la calidad de combustión y en las emisiones de los gases de escape.

4.3.9. Punto de fluidez

Este se determina experimentalmente, exponiendo a bajas temperaturas una muestra de combustible en posición vertical, luego se coloca en posición horizontal unos cinco segundos, no debe existir percepción alguna de movimiento. Este punto de fluidez se expresa en grados centígrados.

Es de alta importancia conocer este punto cuando se trabaja con motores expuestos a bajas temperaturas. El punto de fluidez, en un combustible, es también un indicador de temperatura a la cual abajo de este no será posible operar en forma adecuada y eficiente.

4.3.10. Poder calorífico

Calor de combustión de un combustible, como también se le conoce, se define como la cantidad de calor que se libera cuando un combustible se quema completamente en un proceso de flujo estacionario, además los productos de esta liberación de energía regresan a su estado inicial.

En la práctica de los motores de combustión interna no se cumple a cabalidad el proceso de flujo estacionario, ya que el flujo másico de oxígeno es periódico. Por otra parte, se sabe también que el proceso resulta irreversible, por ende no se aprovecha esa energía liberada por peso de combustible.

4.4. Biodiésel

El biodiésel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales, grasas animales o aceites reciclados que puede reemplazar al combustible diésel en los motores encendidos por compresión.

En términos técnicos, el biodiésel es una mezcla de esterres de un ácido graso de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas, que se puede utilizar en los motores diésel, esta es la definición dada por la ASTM D 6751.

Los aceites vegetales o triglicéridos no pueden ser utilizados directamente como combustible en un motor diésel, por razones técnicas como viscosidad excesiva y contenidos jabonosos que vendrán a dañar, principalmente la bomba de inyección e inyectores.

Existe un procedimiento químico que se utiliza para disminuir la viscosidad del aceite y prácticamente eliminar los contenidos jabonosos, el

nombre de este proceso es transesterificación. En la figura 22 se identifica el ciclo para la obtención del biodiésel.

El biodiésel se obtiene básicamente mediante el proceso químico de transesterificación. Este proceso consiste en la unión de un alcohol con los triglicéridos. Este proceso da por resultado dos productos el primero es el éster metílico o biodiésel, el segundo es la glicerina. La glicerina puede ser utilizada para jabones o productos cosméticos. La ecuación química básica de este proceso es la siguiente,

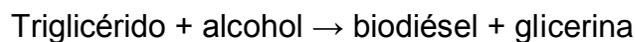
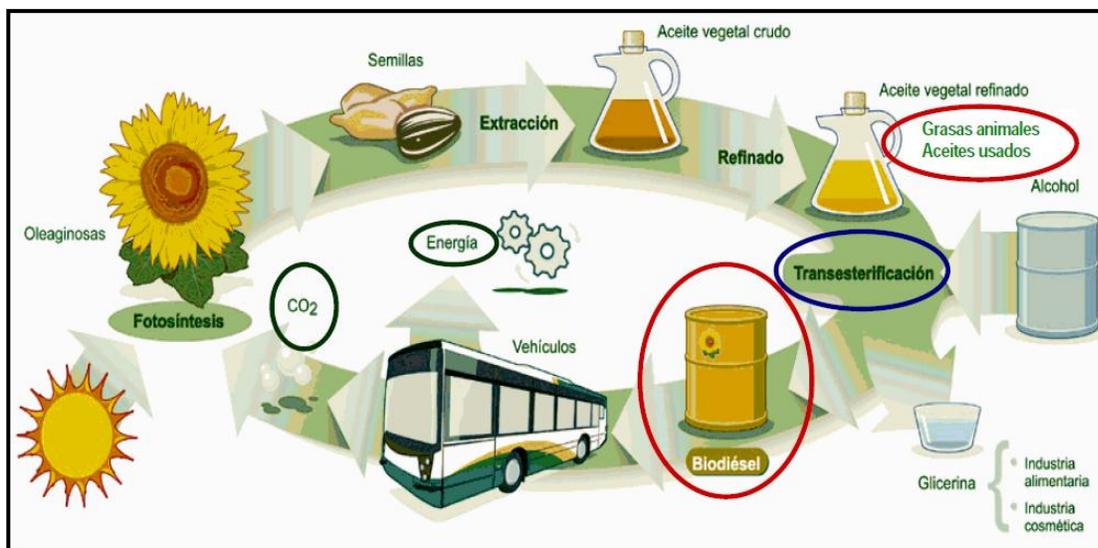


Figura 22. **Ciclo de producción del biodiésel**



Fuente: <http://energia12.com/2012/11/13/plantas-de-produccion-de-biodiésel-enargentina/>.

Consulta: 27 de diciembre de 2013.

El biodiésel tiene propiedades físicas y químicas muy similares que las del combustible diésel No. 2-D derivado del petróleo. Además, el biodiésel cuenta con la ventaja de no contaminar el medio ambiente y de poder ser utilizado en los motores encendidos por compresión sin ninguna modificación adicional al sistema de inyección.

Es posible mezclar el biodiésel con el combustible diésel No. 2-D. Se utiliza la nomenclatura BX para expresar el porcentaje de biodiésel que se le agrega al combustible diésel. La B significa biodiésel y la X representará el porcentaje de biodiésel en la mezcla.

Por ejemplo, en este trabajo se utilizará B20, que significa que de la mezcla total del combustible presente el 20 por ciento es biodiésel y el restante 80 por ciento es combustible diésel No. 2-D. Cuando se habla de B100, significa que el combustible es puramente biodiésel.

4.4.1. Parámetros del biodiésel

Para que el biodiésel, sin importar su origen, pueda ser utilizado adecuadamente en los motores encendidos por compresión debe cumplir con ciertos parámetros y especificaciones que son establecidos por ciertas autoridades, tal como la ASTM, NBB y EN. En Guatemala existen las Normas COGUANOR, la cual funge esta función.

A continuación se presenta la tabla III donde se enumeran las especificaciones establecidas para el biodiésel. Es importante observar que los valores mostrados son muy similares a los de combustible diésel No. 2-D.

Tabla III. Especificaciones técnicas del biodiésel B100

Parámetro	Norma	Unidad	ASTM	CEN 14214	NBB
Densidad (15°C)	ASTM D 1298 EN ISO 12185	g/cm ³	0,860-0,900	0,860-0,900	
Viscosidad cinemática (40°C)	ASTM D 445 EN ISO 3104	cSt	1,90-,.0	3.5-5.0	1,9-6,0
Punto inflamación	ASTMA D 93 ISO 3679	°C	100 min	101 min	130 min
POFF	IP 309	°C	Usuario	Usuario	Usuario
Punto de nube	ASTM D 2500	°C	Usuario	Usuario	Usuario
Azufre	ASTM D 5453 EN ISO 14596	%	0,05 máx.	10 ppm máx.	0,05 máx.
Residuo carbonoso	ASTM D 4530 EN ISO 10370	%	0,05 máx.	0,30 máx. (10%)	0,5 máx.
Agua y sedimentos	ASTM D 2709	%	0,05 máx.		0,05 máx.
Estabilidad oxidación	EN 14112	Horas		6 min.	
Destilación (90%)	ASTM D 86	°C	345 máx.		360 máx.
Agua	ASTM D 1533 EN ISO 12937	-		500 máx.	
Contaminación total	EN 12662	mg/kg		24 máx.	
Corrosión al cobre	ASTM D 130 EN ISO 2160	-	No. 3 máx.	Clase 1	No. 3 máx.
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874 ISO 3987	%	0,02 máx.	0,02 máx.	0,02 máx.
TAN	ASTM D 664 EN 14110	mg KOH/kg	0,80 máx.	0,5 máx.	0,80 máx.
Metanol	EN 14110	%(m/m)	0,20 máx.	0,20 máx.	
Monoglicéridos	EN 14105	%(m/m)	0,80 máx.	0,80 máx.	

Continuación de la tabla III.

Diglicéridos	EN 14105	%(m/m)	0,20 máx.	0,20 máx.	
Triglicéridos	EN 14105	%(m/m)	0,20 máx.	0,20 máx.	
Glicerina libre	ASTM D 6584 EN 14105-06	%(m/m)	0,02 máx.	0,02 máx.	0,02 máx.
Glicerina total	ASTM D 6584 EN 14105	%(m/m)	0,240 máx.	0,250 máx.	0,240 máx.
Contenido en éster	EN 14103	%(m/m)		96,5 min.	
Éster metílico del ácido linoléico	EN 14103	%(m/m)		12 máx.	
Éster metílico poli-insaturados		%(m/m)		1 máx.	
Índice de yodo	EN 14111	-	110 máx.	120 máx.	
Fósforo	ASTM D 4951 EN 14107	mg/kg		10 máx.	10 máx.
Sodio mas potasio	EN 14108-09	mg/kg		5 máx.	
Número de cetano	ASTM D 613 EN ISO 5165	-	40 min.	51 min.	47 min.

Fuente: CIRIA, Ignacio. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel.

Consulta: 27 de julio de 2013.

4.4.1.1. Punto de ignición

El punto de ignición o flash point de un combustible es la temperatura a la cual sus vapores se inflaman o encienden espontáneamente. Del concepto anterior se deduce que el punto de ignición es un punto para determinar la inflamabilidad de un combustible.

El combustible diésel No. 2-D tiene un punto de ignición entre 50 y 80 grados centígrados, lo que se considera seguro. El punto de ignición para

el biodiésel B100 se mantiene aproximadamente entre 100 y 130 grados centígrados, como mínimo.

El punto de ignición del biodiésel es relativamente alto en comparación del combustible diésel. Refleja que se necesita mayor temperatura para poder incendiarse, por ende su volatilidad es baja en relación combustible diésel No. 2-D.

El biodiésel es más seguro de almacenar y manipular que el diésel. Este parámetro es útil para satisfacer temas legales de seguridad de las personas.

4.4.1.2. Sedimentos y agua

Dependiendo de la calidad del proceso de estratificación así será la calidad del biodiésel obtenido. Es decir, es posible que no se elimine cierta cantidad de glicerina del biodiésel, siendo utilizado directamente en los motores. La glicerina es un portador de agua, donde esta traerá consigo sedimentos jabonosos, sólidos disueltos o minerales pesados.

El agua es un compuesto químico indeseable para los componentes internos de la bomba de inyección, inyector y para el motor de combustión interna, debido a que actúa como fuente de corrosión y desgaste. Piezas como conjuntos de émbolos y barriles, cremalleras, válvulas y toberas pueden ser las más afectadas por la fricción metal con metal, ya que el agua prácticamente lava las superficies, eliminándose la acción lubricante del combustible.

Los sobrantes de glicerina, residuos jabonosos o sólidos disueltos vienen a dar otro gran problema en los motores. Estos materiales indeseables muchas

veces por ser elementos pesados se depositan en el tanque de combustible, tubería y filtros de combustible.

Estos depósitos que se forman son los responsables de los taponamientos que puedan existir en las tuberías, filtros, émbolos de la bomba e incluso se obstruyen las toberas de los inyectores. Esto lógicamente tiende a disminuir la eficiencia de la combustión, resultando una combustión incompleta por falta de combustible. Al disminuir la eficiencia de la combustión no se efectúa todo el trabajo sobre los pistones del motor y por ende resulta en un bajo torque y potencia.

Debido a los problemas que pueden acontecer si el biodiésel contiene demasiada agua, existen actualmente instituciones que velan para que sea mínima la cantidad de esta, en la medida de lo posible. Con una estratificación adecuada de los aceites vegetales o grasos se lograra separar la mayor cantidad de glicerol del biodiésel, obteniendo de esa manera un combustible de mejor calidad.

4.4.1.3. Residuo carbónico

El residuo de carbón se produce, generalmente de una combustión incompleta, es decir, por falta de oxígeno no se logra quemar todo el combustible. Esta carbonilla se acumula en los pistones y en las puntas de las toberas de los inyectores.

Si es demasiada carbonilla podría incluso variar la relación de compresión afectando directamente el funcionamiento del motor y el rendimiento del mismo. Una relación de compresión muy alta podría quebrar los anillos, émbolos, bielas

y torcer la culata, todo ello debido a una súbita elevada de presión en el periodo de la combustión.

4.4.1.4. Ceniza sulfatada

La ceniza sulfatada es el residuo resultante de la quema del combustible. Estas cenizas se derivan de sustancias no combustibles que son difíciles de quemar durante la combustión de un combustible. Normalmente estas se acumulan cerca del área de la combustión o también pueden salir expulsados en los humos.

Es común encontrar concentraciones de cenizas sulfatadas en mayor cantidad en el biodiésel que en el combustible diésel No. 2-D. Esto es realmente una desventaja de la cual se valen para no aceptar el uso de biodiésel en los motores.

Dependiendo de la calidad del biodiésel utilizado existirán presentes dos tipos de cenizas sulfatadas: sólidos abrasivos y jabones.

- La primera incidirá en el desgaste prematuro de las toberas de los inyectores, racores de la bomba de inyección, segmentos de émbolos y válvulas de admisión y escape.
- Segundo, la presencia de jabones solubles incide negativamente en la formación de depósitos sólidos en los filtros de combustible, produciendo su taponamiento. Por tanto, es necesaria una limpieza con mayor periodicidad de los filtros.

4.4.1.5. Viscosidad

La viscosidad de un fluido en una tubería, es la resistencia que este opone al pasar dentro de la sección transversal del tubo. Depende de la rugosidad, del régimen del fluido (laminar o turbulento), presión, temperatura y del tipo de fluido.

El biodiésel tiene una mayor viscosidad que el propio combustible diésel No. 2-D. Analizando el párrafo de arriba con la oración de antes, es fácil observar que si las condiciones físicas y operacionales del motor no cambian existirá una cierta resistencia del biodiésel a circular en el sistema de inyección, debido a su mayor viscosidad, trayendo consecuentemente una combustión deficiente, aumento del consumo de combustible y una pérdida de potencia.

Gracias a las exigencias cada vez mayores de los propios usuarios del biodiésel, se es requerido que la viscosidad se acerque bastante a la del combustible diésel No. 2-D. Cuando se mezcla el biodiesel con diésel se logra garantizar con mayor precisión que la viscosidad sea mucho mejor.

4.4.1.6. Sulfuros

Un sulfuro es un compuesto químico de azufre y algún otro elemento químico. El combustible diésel No. 2-D contiene por naturaleza una cantidad relativamente alta, lo cual indica que es un combustible que al unirse con otro elemento forma un compuesto contaminante para el ambiente. Por ejemplo, el azufre al unirse con el oxígeno del aire forma el contaminante dióxido de azufre.

La cantidad de sulfuros en el biodiésel es muy pequeña, lo cual es una de las mayores ventajas. La eliminación del contenido de azufre en el biodiésel contribuye al cuidado del medio ambiente y de la salud de las personas.

4.4.1.7. Número de cetano

El número de cetano es solamente un indicativo de que tan fácil un combustible se quema espontáneamente, a las presiones y temperaturas de diseño. Este número, también es útil para cuestiones legales de transporte y almacenamiento. Mientras mayor es el número más seguro es su manejo y más lento es su autoignición.

El número de cetano del biodiésel es relativamente un poco mayor que la del diésel, siendo dramáticos, esta disminución de volatilidad induce a un aumento en el retraso de encendido y un atraso de la etapa de combustión controlada. Exceso de hollín y cascabeleo son características del efecto anterior.

El pequeño aumento del número de cetano del biodiésel puede ser contrarrestado haciendo un pequeño arreglo en la sincronización de la bomba de inyección, realizando un adelanto de la combustión. Esta operación debe ser realizada por un mecánico competente para evitar empeorar la operación correcta del motor.

4.5. Biodiésel de aceite de frituras

En realidad no es nada nuevo que se estén utilizando combustibles derivados de recursos renovables y orgánicos, el padre del motor diésel, el

ingeniero alemán Rudolf Diesel, diseñó su motor utilizando, primeramente aceite de maní, un combustible renovable.

Existe una diversidad de biocombustibles que han venido a intentar sustituir el combustible diésel No. 2-D para el sector automotor. Biocombustibles que provienen de aceites vegetales, aceites animales y aceites reciclados son en gran manera una alternativa, para ya no utilizar el combustible derivado del petróleo. En la tabla IV se muestran algunos aceites vegetales y grasos utilizados para la producción de biodiésel.

Tabla IV. **Aceites vegetales y grasos**

Nombre usual	Nombre IUPAC	Símbolo
Butírico	Butanoico	C4:0
Capróico	Hexanoico	C6:0
Caprílico	Octanoico	C8:0
Otusílico	Cis-4-decenóico	C10:1 (n4)
Caproleico	Cis-9-decenóico	C10:1 (n9)
Láurico	Dodecanóico	C12:0
Lauroleico	Cis-5-dodecenóico	C12:1 (n5)
Lindérico	Cis-4-dodecenóico	C12:1 (n4)
Mirístico	Tetradecanóico	C14:0
Miristoleico	Cis-9-tetradecenóico	C14:1 (n9)
Tsuzuico	Cis-4-tetradecenóico	C14:1 (n4)
Palmítico	Hexadecanóico	C16:0
Palmitoleico	Cis-9-tetradecenóico	C16:1 (n9)
Esteárico	Octadecanóico	C18:0
Petroselínico	Cis-6-octadecenóico	C18:1 (n6)
Oléico	Cis-9-octadecenóico	C18:1 (n9)
Eládico	Trans-9-octadecenóico	C18:1 (tn9)
Vaccénico	Cis-11-octadecenóico	C18:1 (n11)

Continuación de la tabla IV.

Linoleico	Cis-9-cis-12-octadecadienóico	C18:2 (n9,n12)
Linolénico	Cis-9-cis12-cis-15-octadecatrienóico	C18:3 (n9,n12,n15)
Ricinoleico	12-hidroxi-cis-9-octadecenóico	C18: (n9) OH (n12)
Araquidico	Icosanóico	C20:0
Gadoleico	Cis-9-icosenóico	C20:1 (n9)

Fuente: CIRIA, Ignacio. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel.

Consulta: 27 de julio de 2013.

Tabla V. **Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales**

Aceite	Ácidos grasos-símbolos conforme tabla anterior					
	C16 %	C18%	C18:1 (n9) %	C18:2 (n9,12) %	C18:1 (n9):OH(n12) %	Otros %
Algodón	17-23	1-3	23-41	34-55	-	0-5
Maní	8-10	1-4	30-50	34-56	-	0-4
Canola	5	2	58	21	-	14
Colza	2-5	1-2	10-15	10-20	-	55-70
Palma	32-47	1-6	40-52	2-11	-	1-6
Girasol	6	4	19	69	-	2
Higüerillo	2	1	3	5	88	1
Coco	7-10	1-4	5-8	1-3	-	75-86
Soya	7-11	3-6	22-34	50-60	-	11-22

Continuación de la tabla V.

Oliva	14	-	76	10	-	-
Maíz	8-10	1-4	30-50	34-56	-	1-4
Jatropha	16	10	41	32	-	1
Grasa ganado	23-29	21-26	39-59	2	-	4-11
Grasa cerdo	25-30	12-16	41-51	4-22	-	5-18
Aceite usado	17	12	55	8	-	8

Fuente: CIRIA, Ignacio. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel.

Consulta: 27 de julio de 2013.

El aceite de frituras, usado como materia prima para la producción de biodiésel, es una fuente bastante ventajosa desde varios puntos de vista. Es una materia prima relativamente barata, ya que se puede encontrar en los restaurantes de cualquier ciudad. Se descarta la necesidad de eliminarlo en las alcantarillas de las calles, colaborando en ensuciar y contaminar las calles.

4.5.1. Compuestos

La materia prima del biodiésel que se utiliza en este trabajo es aceite reciclado de frituras de papas hidrolizado y compuesto por soya y maíz. Estos aceites vegetales y grasos son lípidos formados básicamente de aceites fijos o triglicéridos, obtenido mediante transesterificación. Aceite reciclados que cumple con las propiedades físicas y químicas mencionadas anteriormente.

4.5.2. Producción en Guatemala

La fabricación de biodiésel, a partir de aceites vegetales, grasos o reciclados es relativamente fácil, ya que el proceso de transesterificación se puede realizar en cualquier laboratorio químico. Muchas veces el problema es producir biodiésel de excelente calidad, donde se necesitan equipos especiales para su purificación y lavado.

En Guatemala existen algunas instituciones privadas que se dedican a la producción de biodiésel a partir de variadas materias primas. El nivel de producción es bajo en comparación de algunos países desarrollados que tienen una gran cultura de innovación y con grandes deseos de cuidar el medio ambiente para sus futuras generaciones.

4.5.3. Ventajas del biodiésel con respecto al uso del diésel comercial

Antes de conocer las ventajas y desventajas del biodiésel respecto al diésel comercial es necesario indicar que estas variarán en gran medida de la proporción en que ambos se combinen.

Cuando se utilice B100 significará que la mezcla será en su totalidad biocombustible sin ninguna adición de diésel comercial. Un combustible B20 significará que se está utilizando 20 por ciento de biocombustible y 80 por ciento de diésel comercial. En caso de una mezcla las ventajas y desventajas se equilibran dependiendo de la proporción de ambos combustibles.

A continuación se presentan algunas ventajas y desventajas del biodiésel B100 respecto al diésel comercial.

Hay que decir que no se puede hacer una comparación absoluta de si es mejor o peor el biodiésel que el diésel convencional. En general, se puede decir que es similar, a veces mejor, otras no tanto. Depende de que biodiésel se esté utilizando para realizar la comparación y con qué combustible derivado del petróleo se le compare.

La calidad del biodiésel depende de dos factores principales:

- Tipo de aceite de origen
- Calidad de fabricación

La calidad del biodiésel dependerá de la materia prima utilizada debido a que cada tipo posee diferentes mezclas de ácidos grasos que se comportaran de distinta forma en el proceso de separación. En realidad este no debería ser un parámetro para diferenciar la calidad del biodiésel ya que finalmente cualquier biocombustible deberá cumplir con las especificaciones establecidas principalmente por la ASTM y la BIO. En países que no existen leyes que regulen la producción de biodiésel es importante tomar la opinión de los profesionales en el campo para poder seleccionar el adecuado para nuestro motor.

En ocasiones es necesario poner atención a los depósitos de almacenamiento de combustibles debido a que acumulan suciedad en el fondo y durante el trasiego se transportan en el fluido, lo cual finalmente disminuyen la calidad del combustible.

Existen métodos caseros para la fabricación de biocombustibles en pequeña escala, estos en ocasiones no es de la calidad esperada ya que se tiene la deficiencia de un buen equipo para la debida separación y purificación

del mismo. Por otra parte existen métodos más eficientes en donde se producen biocombustibles de buena calidad, en plantas que producen a mediana y gran escala.

En Guatemala se encuentra ya algunas empresas que se dedican a la producción a mediana escala de biocombustibles para el uso en flotillas de vehículos livianos, camiones, motores agrícolas y motores estacionarios. Es de conocimiento que es posible el uso de esta ya descubierta fuente energética, es de importancia reconocer las ventajas que este contiene con relación al combustible diésel comercial.

El uso de biodiésel trae ciertas ventajas a nivel social, ambiental y mecánico en relación al uso del diésel, algunas de estas ventajas se pueden apreciar en la tabla VI.

Tabla VI. **Ventajas del biodiésel respecto al diésel**

Ventaja	Biodiésel
Social	Desarrollo a nivel comunitario en sitios donde se cultive materia prima como soja, higuerrillo, palma africana, etc.
	Creación de fuentes de ingreso para las familias que cultiven materias primas para la obtención de aceites vegetales
Ambiental	Es combustible renovable debido a que se obtiene de grasos vegetales, grasos animales o reciclados
	Se eliminan las emisiones de dióxido de azufre y óxidos nitrosos, principales causantes de la lluvia ácida
	Se eliminan las emisiones de dióxido de carbono, causantes del calentamiento global

Continuación de la tabla VI.

Ambiental	Se disminuyen considerablemente las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y hollín, causantes de muchas enfermedades respiratorias
	En el caso de los aceites reciclados se tiene la ventaja de que ya no se desechan en los drenajes provocando molestias de mal olor y contaminación perjudiciales a las personas
Mecánico	Los biocombustibles tiene una gran solubilidad con el diésel, lo cual significa que se pueden mezclar en cualquier proporción
	Mejora la lubricidad en las partes que tienen constante rozamiento (se tiene mayor capacidad para mantener una película fluida lubricante en los componentes internos de la bomba de inyección e inyectores)
	Mayor índice de cetano, lo que provoca que la etapa del retraso de encendido sea menor en comparación con el diésel que es mayor
	La combustión es más eficiente, ya que el biodiesel contiene mayores cantidades de oxígeno ayudando a que la combustión sea más estequiométrica
	El torque, potencia y consumo de combustible se mantienen casi invariables

Fuente: elaboración propia.

La ventaja ambiental del biodiésel sobre el diésel comercial es indiscutible, se reducen en gran medida todas las emisiones nocivas al medio ambiente y a

la salud humana. En cuanto a los aspectos mecánicos de torque y potencia ambos combustibles son muy parecidos, con la ventaja de que el biodiésel no contiene azufre principal causante del deterioro de los anillos de pistón, colector de humos de escape, cabeza de pistón y válvulas.

4.5.4. Desventajas del biodiésel con respecto al uso del diésel comercial

Referente a las desventajas del biodiésel respecto al diésel comercial se mencionan mayormente algunas relacionadas con la descomposición que podría el biodiésel presentar en las tuberías, filtros y bomba de inyección, además del daño que en ocasiones puede causar al aceite lubricante del motor. Se debe de tener claro que la tendencia de un biocombustible a degradarse o envejecerse dependerá, grandemente del tipo materia prima y del proceso para su obtención, es decir, de su calidad.

En la tabla VII se podrán observar algunos problemas que se presentaban cuando se incursionó en la utilización de biocombustibles. Gracias a los mejores métodos de obtención del biodiésel y a las exigencias por parte de los usuarios estas desventajas ya son menos observables.

Tabla VII. **Desventajas del biodiésel respecto al diésel**

Característica del biodiésel	Problema	Forma de fallo
Alta viscosidad a temperaturas bajas	Dificultad para circular en las tuberías de combustible	Pérdida de potencia, por aumentar el retraso de encendido
	Coquización del inyector	Dificultad de atomización provocando una mala combustión

Continuación de la tabla VII.

Alta viscosidad a temperaturas bajas	Calor localizado en los elementos bombeantes de la bomba de inyección	Desgaste excesivo de los elementos bombeantes
Ester metílico derivado del ácido graso vegetal o animal	Degradación de sellos, juntas y mangueras fabricadas de elastómero	Fugas de combustible
Dilución alta con el lubricante	Inicialmente existe una disminución de la viscosidad del lubricante	Deterioro del aceite lubricante, es necesario cambios más periódicos de lubricante
	Aparición de lodos, lacas y depósitos	Deterioro del aceite lubricante Desgaste de los cojinetes de bancadas, biela y cilindro embolo
	Formación de capas de carbonilla blanda en las boquillas de los inyectores, cabeza de pistón y cilindro	Dificultad para la combustión Desgaste prematuro de anillos de los pistones
Metanol y agua libres	Corrosión del aluminio, zinc, plomo, cobre	Corrosión de las partes internas de la bomba de inyección, chumaceras, bulones de biela, engranes de bomba de aceite, enfriador de aceite etc.
Glicerina libre	Corrosión de no metales, formaciones jabonosas en los filtros de combustible, partes móviles y tuberías	Corrosión de partes internas de los filtros, obstrucción de los filtros de combustible y tuberías

Fuente: elaboración propia.

Actualmente, países como Brasil, Alemania y Estados Unidos utilizan biodiésel en sus transportes públicos, sin presentarse problemas en sus

motores. Las ventajas y desventajas son un resumen de la experiencia en el uso de biodiésel de estos países que tienen mayor escuela en la utilización de este combustible alternativo.

5. METODOLOGÍA

Descripción general de las pruebas:

Con el objetivo de evaluar la incidencia del uso de biocombustible en un motor de cuatro tiempos, se procedió a efectuar pruebas de torque-potencia con biodiésel B20 y B100, y por último, realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos en pruebas con diésel comercial No. 2-D, de esta manera determinar desviaciones de las características del motor al utilizarse un combustible renovable en comparación con el uso de diésel comercial.

Las pruebas realizadas consistieron en determinar experimentalmente el torque al freno, velocidad angular, potencia al freno y consumo de combustible, esto para combustible Diesel comercial puro, B20 y B100. Por último construir las curvas características del motor. Dichas curvas contiene gráficamente la siguiente información:

- Torque versus velocidad angular.
- Potencia versus velocidad angular.

El equipo y material utilizado para la elaboración de las pruebas mencionadas se detalla en la tabla VIII.

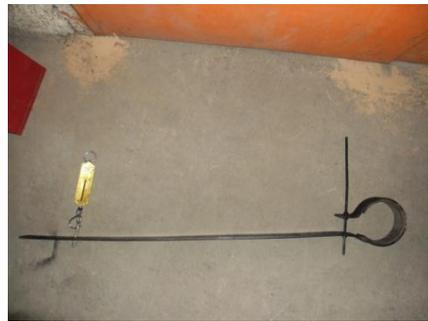
Tabla VIII. **Equipo utilizado**

Equipo y materiales		Descripción
Materiales	Motor de cuatro tiempos	Marca Dubon, tipo Deutz, 7 hp, 1800 rpm con arranque de manivela. Proporcionado por el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica USAC
	Combustible fósil	Combustible diésel comercial No.2
	Combustible renovable	Biodiésel fabricado de aceite reciclado de frituras proporcionado por BIOPERSA, S.A.
Equipo de medición	Freno Prony	Freno tipo Prony artesanal proporcionado por el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica USAC
	Balanza	Balanza latonada tipo resorte de 0 a 66 libras
	Tacómetro digital	Marca Konex, EE-1N, serie No. A33D6190
	Bureta	Bote aforado

Fuente: elaboración propia.

Gracias a la instalación y al freno Prony utilizado en un trabajo de investigación anterior, se logró realizar las nuevas evaluaciones del motor. Se tuvo que reacondicionar esta instalación para poder reutilizarla. A continuación en las figuras 23, 24, 25 y 26 se observará la instalación del motor y el freno.

Figura 23. **Freno Prony utilizado**



Fuente: Laboratorio Motores de Combustión Interna, T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 24. **Instalación motor-freno Prony**



Fuente: Laboratorio Motores de Combustión Interna, T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 25. **Disposición del freno Prony**



Fuente: Laboratorio Motores de Combustión Interna, T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 26. **Equipo auxiliar**



Fuente: Laboratorio motores de combustión interna, T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Es necesario destacar que antes de proceder a realizar las pruebas experimentales fue necesario operar el motor en ralentí para que alcance su temperatura de funcionamiento (aproximadamente 85 grados centígrados), siendo confiable las mediciones a realizar.

Los ensayos consistieron, como primer paso, en abastecer de combustible diésel comercial No.2 el tanque combustible del motor y realizar las pruebas con el freno Prony y la velocidad angular con el tacómetro. El freno se accionó para siete diferentes velocidades y se midió la fuerza resultante indicada por la balanza de resorte para cada una. Luego mediante una fórmula se determinó el torque y la potencia al freno.

Como segundo paso se abasteció con combustible nuevo B20 el tanque de combustible y se realizaron las mismas pruebas que con el diésel comercial. El tercer paso fue el mismo que el anterior solamente que combustible B100.

Mediante un bote aforado se midió el volumen de combustible diésel comercial, B20 y B100 inicial y final en un intervalo de tiempo, para establecer en forma indirecta el consumo de combustible.

Las fórmulas utilizadas para determinar el torque y potencia se pueden observar en la tabla IX.

Tabla IX. **Fórmulas para el cálculo de torque y potencia al freno**

Variable obtenida	Fórmula	Dimensionales
Torque al freno	$T = r \text{ (en pies)} \times F \text{ (en libras)}$	Pies-libras
Potencia al freno	$P = T \text{ (en pies-libras)} \times w \text{ (en rpm)} / 5252$	Caballos de fuerza

Fuente: elaboración propia.

6. RESULTADOS

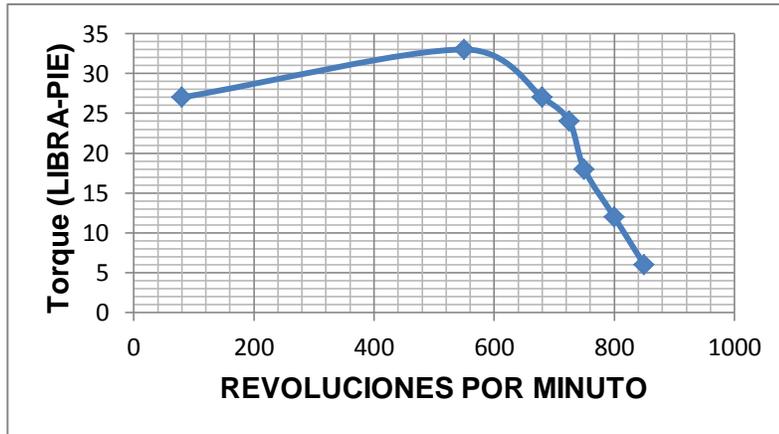
Las fuerzas obtenidas en los ensayos con el freno Prony serán utilizadas para el cálculo de torque y potencia al freno. Las variables principales son fuerza en libras, brazo en pies, torque en libras-pie, potencia en hp. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos para diésel comercial No. 2, biodiésel B20 y biodiésel B100.

Tabla X. **Resultados con diésel comercial**

Fuerza (libras)	Brazo (pies)	Velocidad angular (revoluciones por minuto)	Torque (libras- pie)	Potencia (caballos)
2	3	850	6	0,97
4	3	800	12	1,83
6	3	750	18	2,57
8	3	725	24	3,31
9	3	680	27	3,50
10	3	550	30	3,14
9	3	80	27	0,41

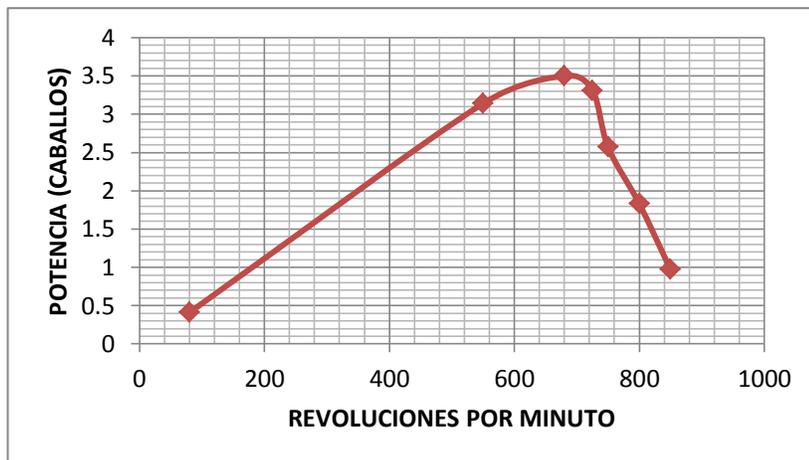
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfico torque versus revoluciones por minuto para diésel comercial**



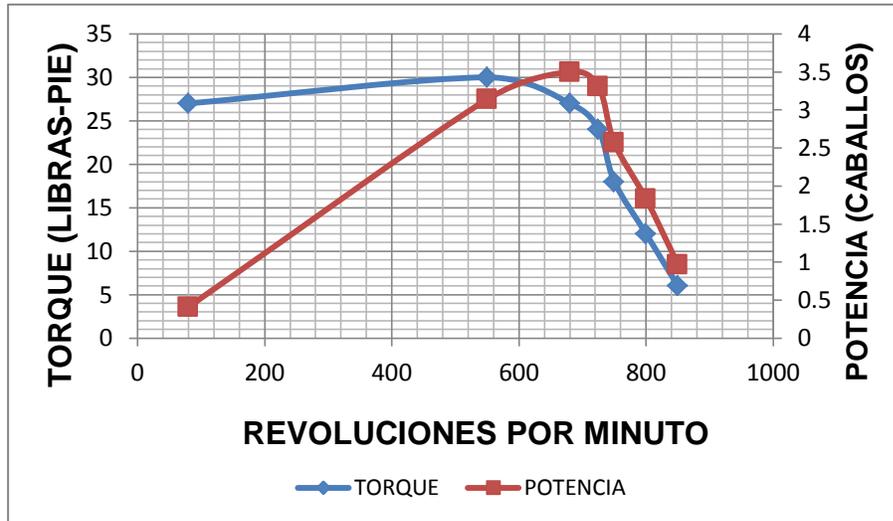
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para diesel comercial**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Curvas características para diésel comercial**



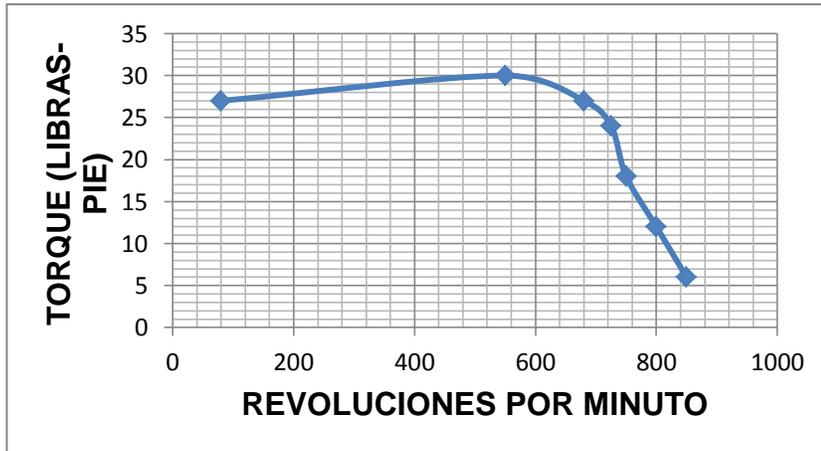
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados con biodiésel B20**

Fuerza (libras)	Brazo (pies)	Velocidad angular (revoluciones por minuto)	Torque (libras-pie)	Potencia (Caballos)
2	3	850	6	0,97
4	3	800	12	1,83
6	3	750	18	2,57
8	3	725	24	3,31
9	3	680	27	3,50
10	3	550	30	3,14
9	3	80	27	0,41

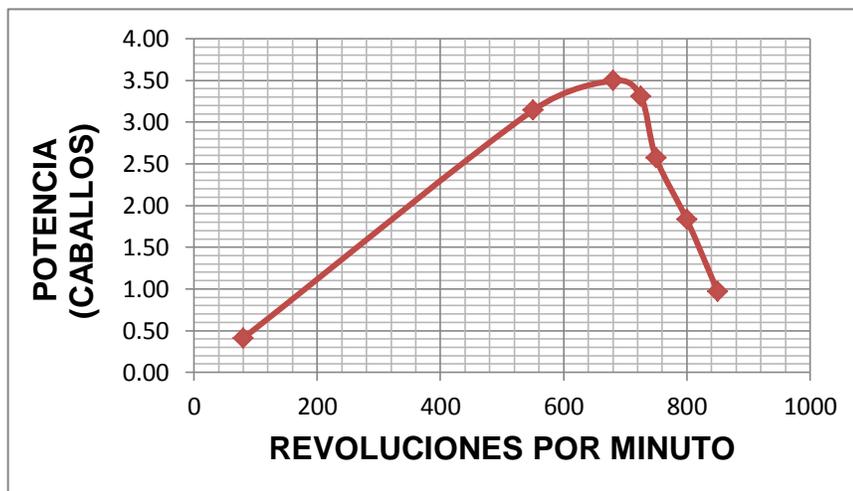
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfico torque versus revoluciones por minuto para biodiésel B20**



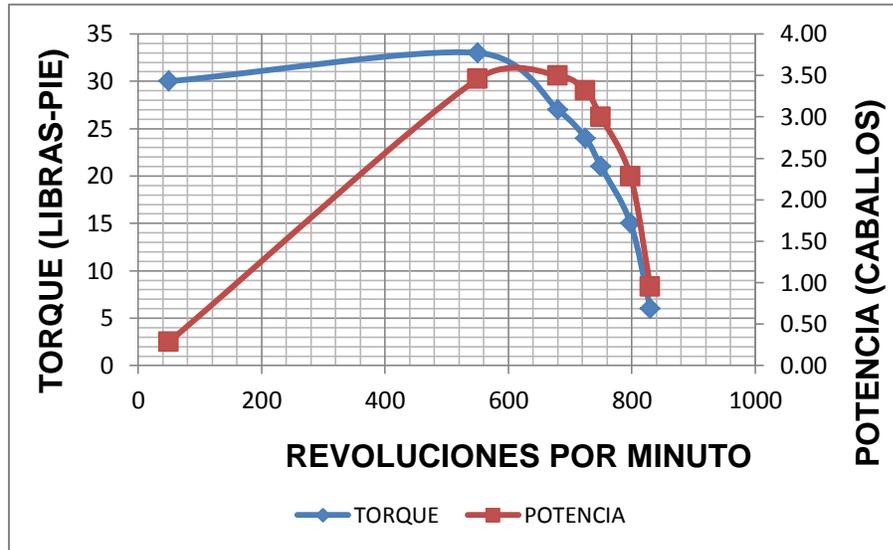
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para biodiésel B20**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Curvas características para biodiésel B20**



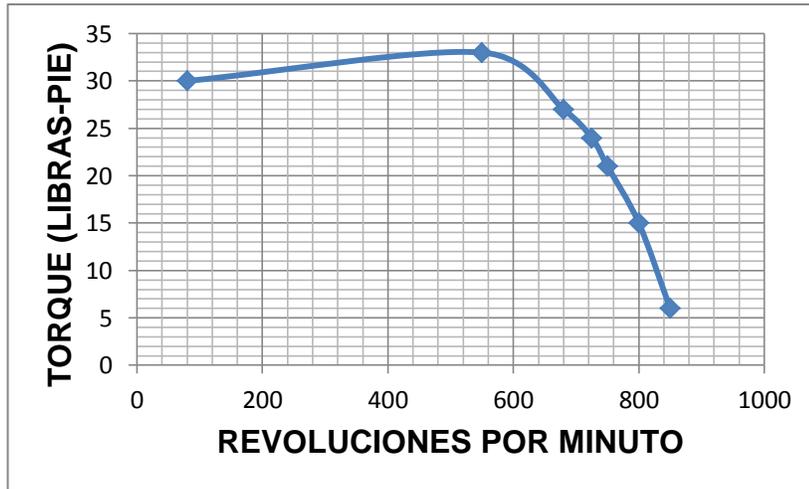
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados con biodiésel B100**

Fuerza (libras)	Brazo (pies)	Velocidad angular (revoluciones por minuto)	Torque (libras-pie)	Potencia (Caballos)
2	3	850	6	0,97
5	3	800	15	2,28
7	3	750	21	3,00
8	3	725	24	3,31
9	3	680	27	3,50
11	3	550	33	3,46
10	3	80	30	0,46

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfico torque versus revoluciones por minuto para biodiésel B100.**



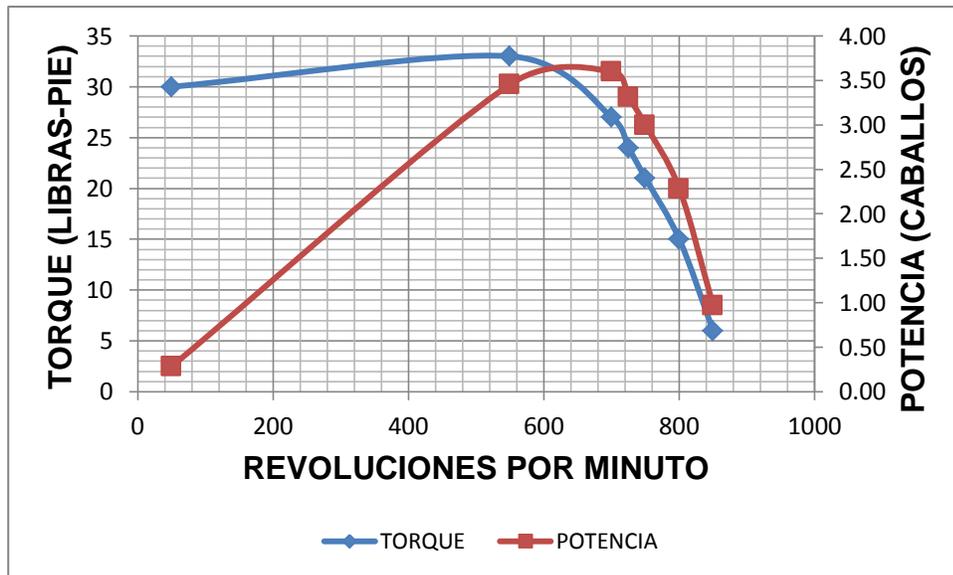
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfico potencia versus revoluciones por minuto para biodiésel B100**



Fuente: elaboración propia

Figura 35. **Curvas características para biodiésel B100**



Fuente: elaboración propia.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

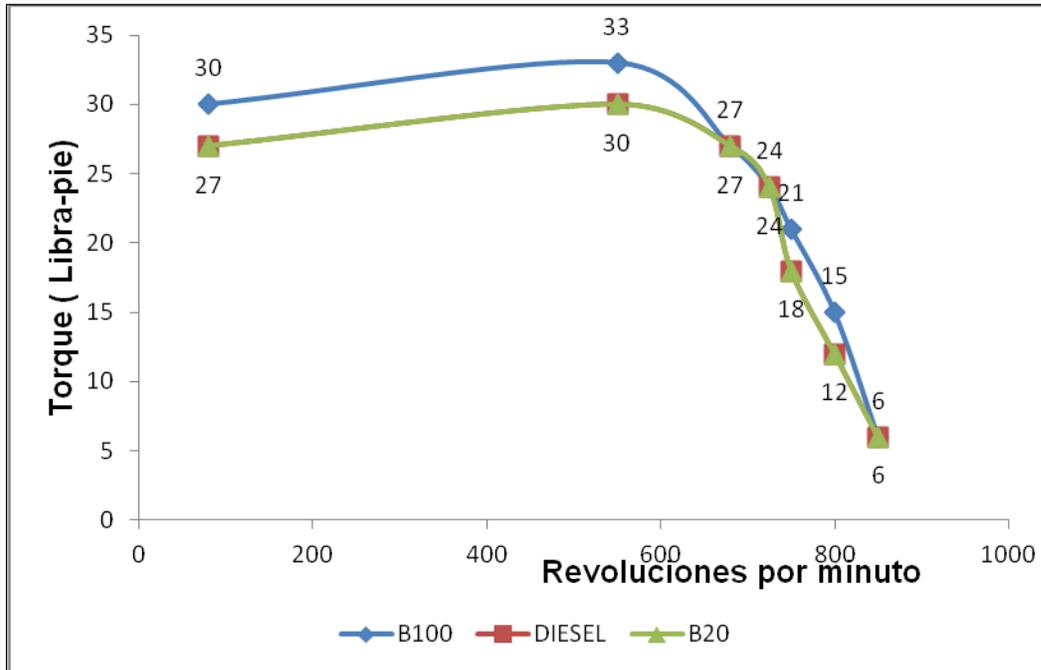
Ensayos anteriores en motores diésel han demostrado que el biodiésel es una fuente de energía química apta para utilizarse, siendo muchas veces inalterable el funcionamiento de estos motores. Con el uso de B100 es necesario, únicamente el cambio de mangueras y sellos de filtros de combustible fabricados de caucho por unos de viton, usualmente en vehículos anteriores al año 1993, debido al deterioro que estos sufren.

Las pruebas anteriores demuestran que el biodiésel B20 y B100 son aptos para poder utilizarlos en un motor de encendido por compresión convencional. El cascabeleo fue normal, la temperatura del motor se mantuvo aceptable y la variación de consumo de combustible se observó invariable.

En las gráficas siguientes se hace una superposición de las diferentes curvas características de torque y potencia versus revoluciones por minuto. La base para determinar posibles diferencias de rendimiento mecánico son la variación en el torque y potencia al freno, pudiéndose observar fácilmente en las curvas características realizadas para cada combustible. El rendimiento de la combustión o térmico es invariable observando que el consumo de combustible no varió apreciablemente.

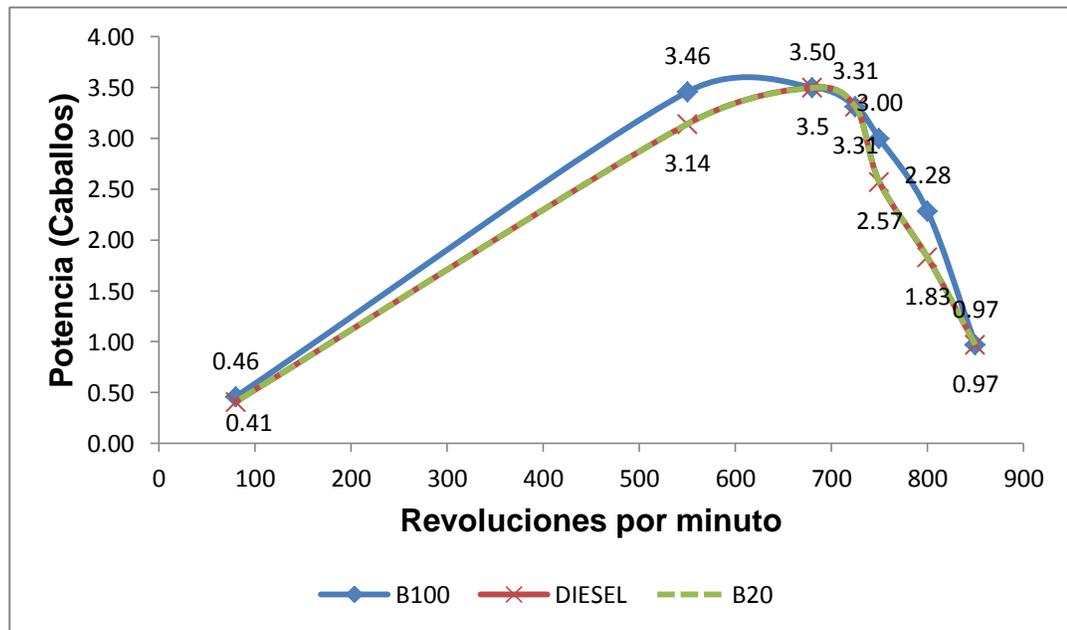
A continuación se analizan las curvas características obtenidas en los diferentes ensayos realizados sobre el motor mencionado. Es importante mencionar que las pruebas fueron realizadas en el laboratorio y con los mismos parámetros de referencia.

Figura 36. **Curvas características de torque para diésel comercial, B20 y B100**



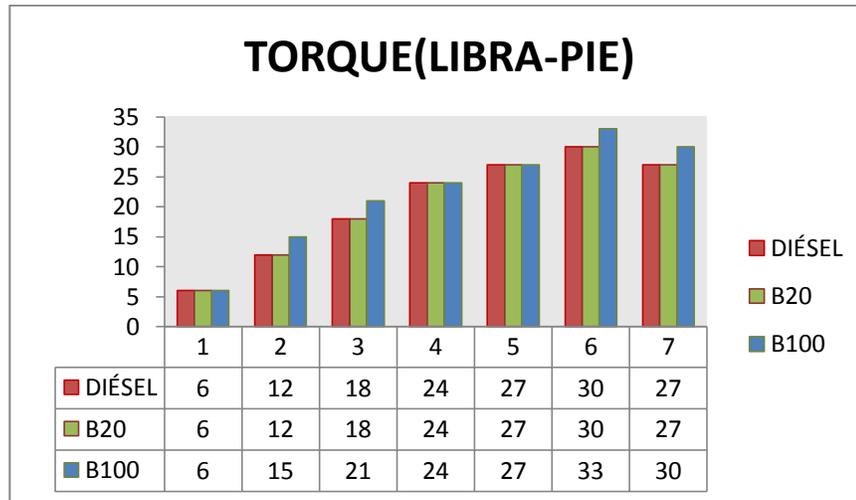
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Curvas características de potencia para diésel comercial, B20 Y B100**



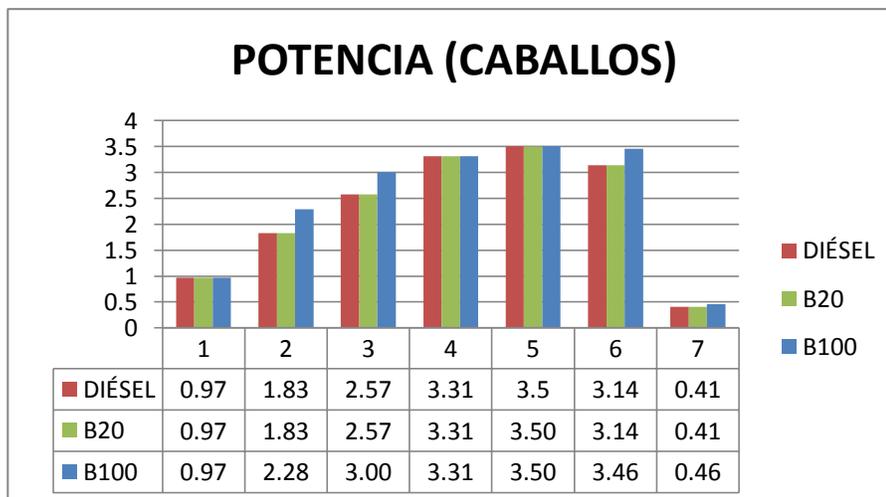
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Comparación de torque para combustible diésel, B20 Y B100**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Comparación de potencia para combustible diésel, B20 Y B100**



Fuente: elaboración propia.

Era de esperarse el comportamiento de las curvas de torque y potencia al freno, primero una pendiente positiva y luego una pendiente negativa. Estas curvas representan claramente el comportamiento del rendimiento volumétrico y mecánico del motor a diferentes velocidades.

A velocidades medias el motor desarrolla un mayor torque debido a que este aspira mayores cantidades de aire, desarrollándose mayor empuje sobre los émbolos del motor. A velocidades altas el rendimiento volumétrico disminuye y por ende el torque desarrollado.

La potencia aumenta con la velocidad del motor, ya que esta es directamente proporcional a la velocidad. Así también, es directamente proporcional al torque. En altas velocidades la potencia disminuye con el torque, ya que como se ha mencionado decae la presión sobre los émbolos del motor. Existe un leve crecimiento de la potencia cuando el torque empieza a disminuir, esto es puramente un efecto del aumento de velocidad que continúa.

Las tendencias de las curvas características del motor son similares para el caso de combustible diésel y biodiésel.

Relacionado con las propiedades del biodiésel B100 sobre el combustible diésel se ha observado que la viscosidad y la densidad son relativamente superiores, el número de cetano es poco superior, los poderes caloríficos son muy similares y el punto de inflamación del biodiésel es muy superior.

Las diferencias mencionadas son las que caracterizan la incidencia del uso de biodiésel en los motores encendidos por compresión. La viscosidad cinemática alta perjudica el desempeño del motor debido a que se produce pérdida de flujo en el sistema de inyección, resultando en la coquización de la

tobera del inyector. Una viscosidad alta ayuda a mejorar la lubricidad de la bomba de inyección, debiéndose tener cuidado de no superar el límite superior.

La densidad es un indicativo de la cantidad de energía por unidad de masa, esto significa que se tiene más calor de combustión, lo cual viene a aumentar el trabajo efectuado sobre los pistones del motor.

El número de cetano es un indicativo de la calidad de ignición o combustión, siendo superior para el biodiésel B100. Un número de cetano alto proporciona una marcha más suave y disminuye el retraso de encendido. Esto proporciona gases de escape más limpios, ayudando aún más a la reducción de emanaciones nocivas para el medio ambiente.

El poder calorífico es un indicativo de la energía liberada por unidad de masa, en ambos casos es muy similar. Es de esperar que para un similar trabajo de salida y poder calorífico, el rendimiento térmico sea aproximadamente el mismo.

Para el biodiésel B100, el punto de inflamación es muy superior respecto al combustible diésel. En los motores encendidos por compresión, la ignición se logra gracias al calor generado por la compresión del aire dentro de la cámara de combustión.

Mayores puntos de inflamación permiten alcanzar rendimientos térmicos superiores. El mayor punto de inflamación del B100 permite que el motor alcance relaciones de compresión mayores, a diferencia del combustible diésel. A mayores relaciones de compresión, mayor es el rendimiento térmico alcanzado en el motor.

De acuerdo a los datos obtenidos se puede concluir, que el torque al freno es similar cuando se utilizó combustible diésel y B20. Para el caso de B100 se observa un leve incremento del par de salida a 550 revoluciones por minuto. Esto debido a que el B100 tiene densidad superior, es decir, mayor energía por unidad de masa.

La potencia al freno es similar cuando se utilizó combustible diésel y B20. Cuando se utilizó B100 la potencia al freno aumentó levemente a las 550 revoluciones por minuto, debido también, al incremento del torque. Se puede acreditar este leve incremento de potencia a la mayor energía por unidad de masa del biodiésel B100.

Evaluando el rendimiento mecánico desde las curvas características de torque y potencia, se puede decir que este es similar en los tres casos, comprobando nuevamente la viabilidad del uso de biodiesel en un motor encendido por compresión.

El consumo de combustible se observó invariable en el medidor análogo instalado, para los tres casos. Se sabe que es posible un consumo más bajo en condiciones de plena carga y máxima potencia desarrollada en el eje del motor, esto por lo menos teóricamente. Analizando las curvas características de torque y potencia para los tres casos estudiados se puede decir que para el caso de B100 existe una leve disminución del consumo específico de combustible ya que se observa un leve aumento de torque y potencia desarrollados en el eje del motor a 550 revoluciones por minuto.

CONCLUSIONES

1. Se desarrollaron pruebas en un motor de cuatro tiempos, utilizando biodiésel B20 y B100 fabricado a base de aceite de frituras, evaluando su buena aptitud mediante la obtención de las curvas características, las cuales resultaron con la misma tendencia que las curvas obtenidas con el combustible diésel comercial No. 2-D.
2. Las curvas características definen el comportamiento del motor en las condiciones del ensayo. Las curvas características obtenidas en los ensayos con biodiésel B20 y B100 manifiestan el comportamiento que presenta el motor, las cuales denotan que el torque y potencia al freno son parecidos a las obtenidas con combustible diésel comercial No. 2.
3. Tomando como base los parámetros obtenidos con combustible diésel No. 2-D en las curvas características se estima que el rendimiento mecánico medido en los ensayos con B20 y B100 es similar, no observándose una variación significativa.
4. El consumo de combustible del biodiésel B20 y B100 se observó invariable respecto al combustible diésel comercial No. 2-D.
5. El proceso de combustión en los motores encendidos por compresión, se fundamenta en la elevación de la presión y temperatura del aire dentro de la cámara de combustión, para luego inyectar el combustible y entonces ocurre la combustión. Gracias a que en los ensayos realizados

se utilizó biodiésel de alta calidad el proceso de combustión fue visiblemente estable.

6. Para que la combustión acontezca eficientemente en el motor encendido por compresión es necesario que se logre una alta temperatura dentro de la cámara de combustión, para que el combustible obtenga la energía suficiente y poder encenderse.
7. De acuerdo a estudios anteriores y, con este trabajo de graduación, se da a conocer que existen ventajas y desventajas del biodiésel respecto al combustible diésel comercial No. 2-D, ellas dependerán, sobretodo de la calidad del biodiésel. La ventaja más destacada es que se disminuyen considerablemente las emisiones nocivas para el medio ambiente y la salud humana.
8. Las propiedades que determinan la aptitud de un combustible son las mismas que para el combustible diésel comercial no. 2-D, las cuales las establece para este caso, las Normas COGUANOR.

RECOMENDACIONES

1. Para garantizar que el motor funcione correctamente a través del tiempo, es necesario desarrollar un programa de mantenimiento preventivo del sistema de combustible, debido a que el biodiésel, por experiencia, se sabe que produce una sustancia jabonosa que tiende a obstruir los filtros de combustible. Este mantenimiento se podría realizar cada 5 000 kilómetros o cada 3 meses.
2. Al director: desarrollar en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala un laboratorio de pruebas de motores de combustión interna, en el cual se pueda obtener mediante un dinamómetro datos más precisos de las curvas características.
3. Al director: gestionar para que en la Universidad de San Carlos de Guatemala se implemente el uso de biodiésel en las unidades de transporte de las diferentes facultades, ya que la Universidad debería ser la primera en incentivar y dar el ejemplo de uso de esta fuente de energía renovable confiable.
4. Al director: gestionar para que se establezcan, implementen y auditen normas de regulación de emisiones de gases quemados en vehículos automotores del sector industrial y transportista. Buscando el cuidado del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bio Procesos Energéticos Renovables. [en línea]. <<http://www.biopersa.com/>>. [Consulta: 19 de agosto de 2012].
2. Biodiésel. [en línea]. <<http://www.biodiesel.org/home>>. [Consulta: 19 de agosto de 2012]
3. CENGEL, Yunus. *Termodinámica*. 6a ed. México: Mc Graw-Hill, 2006. 1008 p.
4. Dirección General de Energía y Minas. Guatemala. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/>>. [Consulta: 19 de agosto de 2013].
5. FLORES BARRIOS, Leslie Mariana. *Análisis comparativo de diésel no. 2-d (automotriz) con biodiésel, elaborado a partir de aceite usado y oleína de palma africana (elaeis guineensis) en mezclas de altos porcentajes, para su evaluación en un motor estacionario de combustión interna*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2008. 89 p.
6. OBERT, Edward. *Motores de combustión interna: análisis y aplicaciones*. México: Compañía Editorial Continental, 1987. 764 p.

7. QUINTERO JORDAN, Jorge Antonio. *Biodiésel de higuierillo (Ricinus communis L.) como combustible en un motor diésel*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2005. 67 p.