

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ESTUDIO TEÓRICO DEL EFECTO DE LA ALTITUD Y LA
UTILIZACIÓN DE MEZCLAS BX SOBRE EL FUNCIONAMIENTO
DE MOTORES ENCENDIDOS POR COMPRESIÓN**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

Alvaro Juan Bardález Bardález

ASESOR: Fernando Octavio Jiménez Ugarte

Lima, setiembre del 2012

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo calcular la variación porcentual de las pérdidas de potencia, eficiencia y aumento de consumo de combustible de un motor de encendido por compresión de aspiración natural, que funciona a diferentes altitudes sobre el nivel del mar utilizando distintas mezclas BX.

La metodología consistió en calcular por separado las variaciones en las características del motor debido a la altitud y mezclas BX, luego se sumaron para encontrar la merma total en el desempeño, esto fue posible utilizando métodos de cálculo empíricos para cada caso y supuestos que no consideran las características del combustible para cuantificar el efecto de la altitud en el motor, a su vez, las propiedades del aire no intervienen en el cálculo del efecto de las distintas mezclas BX en el motor.

El trabajo contiene tres partes: en la primera se analiza el efecto que tiene la altitud en el desarrollo de la potencia, eficiencia y consumo de combustible en el motor, el estudio demuestra que a medida que se incrementa la altura disminuye la densidad y presión atmosférica, limitando la potencia que puede desarrollar el motor.

En la segunda parte se analiza el efecto que tiene el biodiesel de palma aceitera, si bien este combustible tiene características muy parecidas con el diesel 2, algunas propiedades cambian afectando el funcionamiento de un motor de encendido por compresión. El menor poder calorífico del biodiesel limita el desarrollo de la potencia del motor, pero la eficiencia térmica aumenta porque la lubricidad y viscosidad del biodiesel son mayores, lo que disminuye las pérdidas por rozamiento en el sistema de inyección.

Para finalizar se presentan cuatro tablas porcentuales, las cuales permiten determinar la variación de la potencia y eficiencia que un motor de encendido por compresión de aspiración natural puede desarrollar y el consumo específico y volumétrico de combustible para distintas mezclas diesel-biodiesel a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. De esta manera, si un usuario peruano quiere ir en este momento a una ciudad como Huaraz que queda a 3000 metros de altura con combustible B5 puede saber que su motor estará limitado a desarrollar una potencia 35% menor que la nominal, con 20% menos de eficiencia, 45% más de consumo de combustible en masa y 44% de consumo de combustible en volumen.

DEDICATORIA



A mi mamá
y a Carlos

ÍNDICE

Lista de símbolos	v
Introducción	1
Capítulo 1: Factores que afectan la eficiencia térmica, desarrollo de potencia y consumo de combustible en un motor de encendido por compresión	3
1.1 Funcionamiento de un motor de encendido por compresión	3
1.2 Proceso de combustión de un motor de encendido por compresión	5
1.3 Potencia, eficiencia y consumo de combustible	8
1.4 Factores que afectan la potencia, eficiencia y consumo de combustible	9
Capítulo 2: Funcionamiento de un motor de encendido por compresión cuando trabaja a diferentes altitudes sobre el nivel del mar	13
2.1 Condiciones del aire en altitud	13
2.2 Efecto de la altitud en el desempeño de un motor de encendido por compresión	22
Capítulo 3: Características de las mezclas BX y cómo afectan a los motores de encendido por compresión	36
3.1 Normas que regulan las propiedades de las mezclas BX en el Perú	37
3.2 Biodiesel de palma aceitera	44
3.3 Efecto de las mezclas BX en el desempeño de un motor de encendido por compresión	49
Capítulo 4: Efecto de la altitud y mezclas BX en el desempeño de un motor de encendido por compresión	65
4.1 Cálculo de la variación de potencia, eficiencia térmica y consumo específico de combustible para diferentes altitudes	66

y mezclas BX	
4.2 Resultados obtenidos a diferentes altitudes y mezclas BX	72
4.3 Ejemplo con los datos de placa de un motor de encendido por compresión real	78
Conclusiones	85
Observaciones y recomendaciones	87



LISTA DE SÍMBOLOS

MEC	Motor de Encendido por Compresión
D2	Diesel N°2
BX	Mezcla Diesel 2 con X% de Biodiesel
P	Potencia (kW)
p	Presión (kPa)
NC	Número de Cetano
R	Constante Universal de los Gases (J/K-mol)
F/A	Tasa aire combustible (kg-combustible/kg-aire)
η	Eficiencia
\dot{Q}	Calor (kJ)
N	Velocidad del motor (rpm)
sfc	Consumo específico de combustible (g/kW-h)
m	Masa (kg)
\dot{m}	Flujo másico (kg/s)
V	Volumen (m ³)
Q_{HV}	Poder calorífico (KJ/kg)
H	Altura sobre el nivel del mar (m)
C	Constante (°C/m)
g	Gravedad (m/s ²)
FM	Fracción molar (%)
PM	Peso molar (g/mol)

r_c	Relación de compresión
a	Constante de factor de corrección
b	Constante de factor de corrección
ρ	Densidad (kg/m^3)
ν	Viscosidad (m^2/s)
τ	Tiempo de retraso de ignición (ms)
ϕ	Tasa equivalente aire combustible ($\text{kg-aire}/\text{kg-combustible}$)
W	Trabajo (J)

Subíndices

0	Atmosférico
c	Combustible
a	Aire
1	Condición dentro del cilindro
f	Referente al ciclo
d	Desplazado
v	Volumétrico
x	Valor a reemplazar
max	Valor máximo

INTRODUCCIÓN

Existe una tendencia mundial de reemplazar los combustibles fósiles por diversas fuentes de energía para disminuir el impacto ambiental. Ante ello, se proponen muchas alternativas que prometen abastecer el consumo mundial de energía y a la vez ser limpias, sin embargo, cambiar una tecnología por otra implica un alto costo y largo tiempo de adaptación. Es por eso, que muchas investigaciones se centran en encontrar fuentes limpias y ajustables a procesos ya existentes, para evitar excesivo gasto de tiempo y dinero; una de esas alternativas viable a corto plazo es el biodiesel, porque funciona en motores con tecnología actual y pueden usarse como materia prima distintas fuentes vegetales y animales.

El gobierno peruano no es ajeno a esta tendencia ambientalista y firmó el decreto supremo N° 021-2007-EM que, desde el primero de enero del 2011, obliga que la venta de diesel 2 sea una mezcla 5% de biodiesel y 95% de diesel 2, proporción que no afecta significativamente el desempeño del motor según normas como la ASTM D975. Así mismo, el decreto deja abierta la posibilidad de aumentar la proporción de biodiesel en el futuro.

Varios estudios, como los realizados por especialistas de la Universidad Castilla-La Mancha muestran cómo el incremento de biodiesel en la mezcla afecta negativamente el desarrollo de potencia, eficiencia y consumo de combustible en el motor. Todas las investigaciones sobre el efecto del biodiesel en el funcionamiento del motor consideran condiciones atmosféricas a bajas altitudes poco aplicables en el Perú, país que presenta una geografía irregular donde un usuario común puede encontrarse a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Es por eso que el presente estudio teórico analiza la variación del desarrollo de potencia, eficiencia y consumo de combustible cuando se cambian estas dos condiciones iniciales en un motor de encendido por compresión de aspiración natural.

El desarrollo de este trabajo consta de cuatro partes: en la primera se identifican los factores que afectan el desarrollo de la potencia, eficiencia y consumo de combustible de un motor; en las dos siguientes, se cuantifica la variación de los factores que influyen en el funcionamiento del motor cuando cambian la altitud sobre el nivel del mar y mezclas con biodiesel por separado y en el último capítulo, se cuantifica y analiza la importancia del efecto en conjunto que tienen la altitud y distintas mezclas

con biodiesel en el funcionamiento de un motor, con lo cual se pretende contribuir de manera técnica al cuidado del ambiente.



CAPÍTULO 1: FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA TÉRMICA, DESARROLLO DE POTENCIA Y CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN UN MOTOR ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

En este capítulo se presentan los conocimientos teóricos básicos para comprender el desarrollo de la tesis. En la primera parte se explica a grandes rasgos el funcionamiento de un motor de encendido por compresión, el ciclo diesel y el proceso de combustión.

Como segundo punto, se definen los conceptos de potencia, eficiencia térmica y consumo específico de combustible, debido a que el estudio se basa en estos parámetros para evaluar el funcionamiento de un MEC.

Al finalizar el capítulo se mencionan los factores que inciden en la variación del desarrollo de potencia, eficiencia y consumo de combustible. El análisis y cálculo de cambio de estos factores por efecto de la altitud y mezclas BX será tratado en los siguientes capítulos.

1.1 Funcionamiento de un Motor de Encendido por Compresión

En un MEC el aire entra al cilindro separado del combustible. Una vez que una cantidad determinada de aire se encuentra en el cilindro, el pistón reduce el volumen de la cámara y aumenta la presión interior (alrededor de 4MPa). Casi al final de la carrera del pistón (en su mayoría 20° del cigüeñal antes del punto muerto superior) se bombea combustible (diesel o mezclas BX) al interior de la cámara, donde empieza la combustión debido a la alta temperatura (aproximadamente 800K) alcanzada por la alta presión a la que se encuentra la mezcla aire-combustible. Por ese motivo, a diferencia de los motores Otto, es que el control de carga en un MEC se controla variando la cantidad de combustible y no la cantidad de mezcla. El combustible líquido es inyectado en forma de chorro y a medida que entra a la cámara, por la fricción con el aire, se vaporiza, permitiéndose la mezcla de gases dentro del cilindro que propicia el inicio de la combustión [ref. 1.1].

Transcurre una pequeña cantidad de tiempo mientras el combustible se evapora y se mezcla con los gases hasta que se encienda espontáneamente, conocido como “tiempo de retraso” o “ignition delay”. Una vez encendida la llama, esta se esparce por todo el cilindro. A medida que la llama se sigue esparciendo, los gases se expanden y la combustión termina con el descenso del pistón [ref. 1.2].

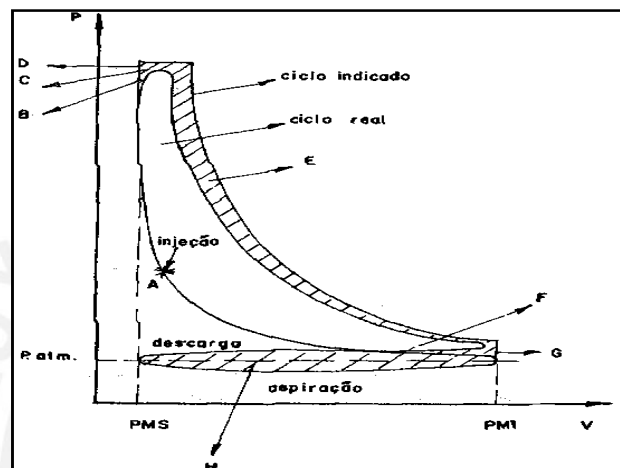


Figura 1.1: Ciclo Diesel [ref. 1.3]

En la figura 1.1 se puede observar el diagrama termodinámico presión-volumen del ciclo Diesel. El área de color blanco representa el trabajo real que entrega el motor, mientras que el área que se encuentra debajo, marcada por líneas, representa el trabajo realizado por la bomba. En la figura se muestra las distintas etapas del ciclo diesel: admisión, compresión, explosión y expansión [ref. 1.4].

La potencia indicada de un motor diesel se obtiene al dividir el trabajo obtenido en el ciclo termodinámico por unidad de tiempo. La potencia indicada no es real porque existen pérdidas por fricción de las partes móviles que componen un motor y gasto de energía para poner a trabajar las máquinas que componen un motor.

Este trabajo analizará la variación de la potencia que entrega el motor debido a cambios en las condiciones iniciales (variación de altitud y tipo de combustible) que afectan al ciclo termodinámico.

1.2 Proceso de Combustión en un Motor de Encendido por Compresión

El proceso de combustión en un MEC comienza cuando el combustible es inyectado a alta presión dentro de la cámara de combustión unos grados del cigüeñal antes de que el pistón alcance el punto muerto superior, es decir cuando el aire dentro de la cámara se encuentra a alta presión y temperatura. El combustible se inyecta en forma de chorros muy finos para facilitar la atomización después del contacto con el aire. En las zonas de la cámara donde la mezcla es propicia para la combustión, se origina una ignición espontánea por la elevada temperatura. Subsecuentemente, la mayoría del combustible se quemará y la presión ira aumentando [ref. 1.5].

El número de cetano es una característica del combustible que permite controlar el inicio de la combustión y que la presión máxima no sobrepase las características de diseño del motor, es por eso que se necesita que el tiempo de retraso se mantenga en un rango establecido [ref. 1.6].

A lo largo del proceso de combustión se libera energía en distintas proporciones y se conoce como tasa de calor cedido. La figura 1.2 muestra un diagrama típico de calor cedido por el combustible a distintos ángulos del cigüeñal en las que se puede diferenciar cuatro etapas de combustión.

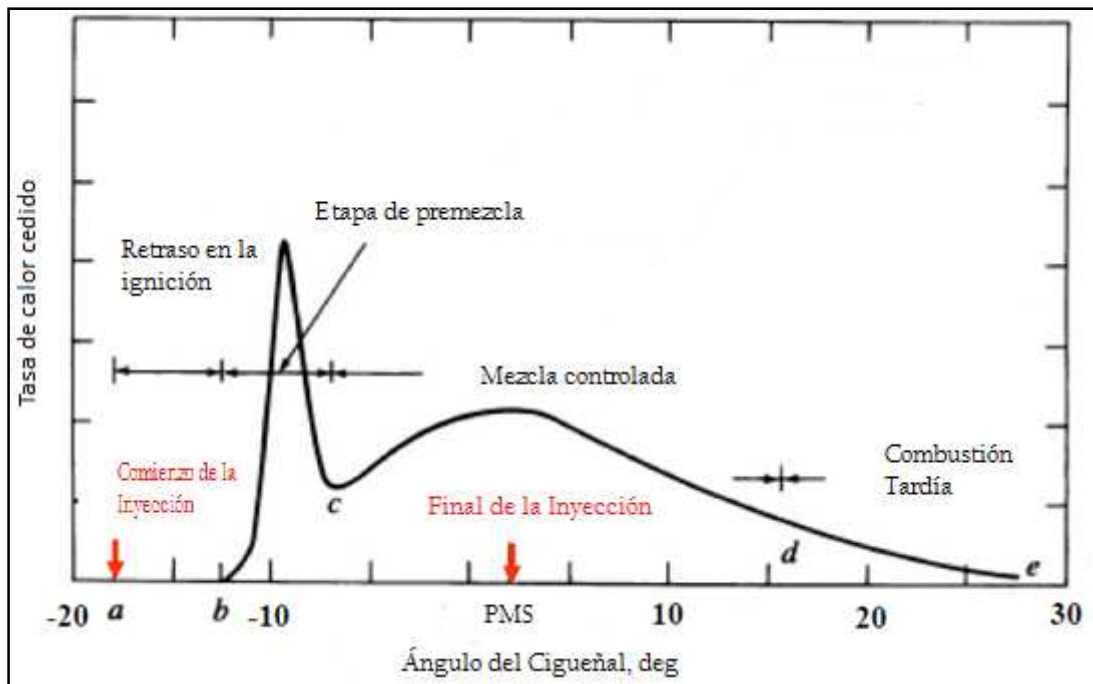


Figura 1.2: Tasa de calor cedido vs ángulo de giro del cigüeñal [ref. 1.7]

Retraso en la ignición (a-b): período entre el comienzo de la inyección del combustible dentro de la cámara de combustión y el comienzo de la combustión. Es el tiempo en que el combustible se demora en penetrar a la cámara, atomizarse, evaporarse y mezclarse con una cantidad suficiente de aire para que esté listo para auto-encenderse. La atomización requiere alta inyección del combustible, pequeño diámetro del inyector, viscosidad óptima del combustible, alta presión del aire dentro del cilindro en el momento de la inyección [ref. 1.8].

La tasa de evaporación depende del tamaño de las gotas, distribución, velocidad, presión y temperatura dentro de la cámara y volatilidad del combustible.

Los factores de la duración del tiempo de retraso de ignición son la presión (a mayor presión menor es el retraso), temperatura y el número de cetano del combustible, a mayor número, más rápido se produce la auto-ignición [ref. 1.9].

La presión y temperatura de entrada afectan el retraso al cambiar las condiciones en que ingresa el aire al motor. A medida que la presión de entrada aumenta, el retraso disminuye y viceversa, lo mismo ocurre con la temperatura.

Según la simulación que modela el funcionamiento de un motor MEC, realizada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Tezpur en la India, el tiempo que demora el retraso en la ignición se calcula de la siguiente manera [ref. 1.10]:

$$\tau = \frac{2.64}{p_1^{0.8} \phi^{0.2}} \exp\left(\frac{16550 - 20NC}{RT_1}\right) \quad (1.1)$$

Donde R es la constante universal de los gases, NC es el número de cetano y ϕ es la tasa equivalente de combustible-aire, P_1 y T_1 son la presión y la temperatura del aire dentro del cilindro.

Pre-mezclado o fase de combustión rápida (b-c): en las zonas donde el combustible se mezcla con el aire dentro de los límites de flamabilidad ocurre una combustión espontánea, esta fase es muy rápida, abarca pocos ángulos del cigüeñal. Por el corto tiempo de la fase y la súbita subida de presión ocurre un alto desprendimiento de calor [ref. 1.11].

Fase de combustión y mezcla controlada (c-d): cuando la fase de combustión rápida fue consumida, el calor liberado es controlado por la tasa a la que la mezcla está disponible para ser quemada. Mientras varios procesos ocurren (atomización, evaporación, mezcla del aire-combustible) la tasa de calor desprendido en esta fase es controlada principalmente por el proceso de mezcla del vapor de combustible con el aire. En esta fase la tasa de calor liberado puede o no alcanzar un segundo pico (el primer pico ocurre en la fase de combustión rápida), lo que si ocurre es que a medida que la fase progresa la tasa va disminuyendo [ref. 1.12].

Fase de combustión tardía (d-e): la liberación de calor continúa a una menor tasa en la carrera de expansión por distintos motivos. Una pequeña fracción de combustible aún no fue quemado. Una fracción de la energía del combustible está presente en hollín y

productos ricos en combustible que pueden liberar calor. La inyección de combustible no es uniforme y la mezcla en este período termina de alcanzar una combustión más completa y gases, como producto, menos desasociados. La cinética del proceso final de combustión se vuelve más lenta, ya que la temperatura de los gases del cilindro caen durante la expansión [ref. 1.13].

1.3 Potencia, Eficiencia y Consumo de Combustible

Potencia teórica: la potencia teórica que desarrolla un motor es la cantidad de energía que aprovecha del combustible en cada ciclo de combustión por unidad de tiempo. Para un motor de cuatro tiempos se calcula con la siguiente fórmula [ref. 1.14].

$$P = \frac{W * N}{2} \quad (1.2)$$

Eficiencia térmica: es la comparación entre la cantidad de potencia que se obtiene del ciclo con respecto al calor que se obtuvo de la combustión [ref. 1.15].

$$\eta_f = \frac{P}{\dot{Q}} \quad (1.3)$$

Consumo específico de combustible: es la división del flujo másico combustible entre la potencia entregada. Este parámetro sirve para comparar distintos qué tan eficiente es un motor en particular para desarrollar trabajo [ref. 1.16].

$$sfc = \frac{\dot{m}}{P} \quad (1.4)$$

Cuanto menor es el valor de sfc es mejor para el usuario. Los valores típicos sfc para motores diesel oscilan por los 200g/kW-h [ref. 1.17].

El consumo específico de combustible y la eficiencia térmica se relacionan en la siguiente ecuación [ref. 1.18].

$$\eta_f = \frac{1}{sfc \cdot Q_{hv}} \quad (1.5)$$

1.4 Factores que Afectan el Desarrollo de Potencia, Eficiencia Térmica y Consumo Específico de Combustible

Tasa aire-combustible: proporción másica entre la cantidad de aire y combustible que entran a la cámara de combustión. El valor está definido por el diseño del motor, generalmente se requiere más aire en la mezcla que la proporción estequiométrica [ref. 1.19].

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} \left(\frac{A}{F} \right) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (1.6)$$

El rango normal de operaciones para un motor diesel es $18 \leq \left(\frac{A}{F} \right) \leq 70$ [ref. 1.20].

Eficiencia volumétrica: el sistema de entrada de un motor (filtro de aire, manifold de entrada, válvulas de ingreso, etc.) restringe la entrada del aire al cilindro. La eficiencia volumétrica, η_v , es un valor que indica porcentualmente la capacidad del motor para introducir aire al cilindro, está definida como la tasa de flujo volumétrico de aire dentro del sistema de ingreso entre el volumen desplazado por el pistón. Teóricamente se calcula con la ecuación 1.7 [ref.1.21].

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,0}V_d N} \quad (1.7)$$

Donde $\rho_{a,0}$ es la densidad del aire de ingreso y \dot{m}_a es la masa del aire succionado dentro del cilindro. Los valores máximos para η_v en motores de aspiración natural a nivel del mar oscilan entre 80 y 90% [ref. 1.22].

La eficiencia volumétrica es afectada las condiciones atmosféricas del aire y diseño del motor.

Densidad del aire: es el volumen que ocupa la masa de aire. Si la densidad disminuye, hay menos partículas de aire dentro de la cámara de combustión con las que el combustible puede reaccionar, afectando la eficiencia de la combustión [ref. 1.23].

Poder calorífico del combustible: es la cantidad de calor que se puede obtener por la combustión del combustible. El desarrollo de potencia de un motor es proporcional al poder calorífico.

Densidad del combustible: es el volumen que ocupa la masa de combustible. Como los sistemas de inyección de combustible son volumétricos, una mayor densidad aumenta el consumo específico de combustible.

Todos los factores antes mencionados afectan al desarrollo de la potencia como se puede ver en la ecuación 1.8 [ref.1.24].

$$P = \frac{\eta_f \eta_{v0,x} N V_d Q_{HV} \rho_{a,0} (F/A)}{2} \quad (1.8)$$

La ecuación 1.9 muestra otra relación para el cálculo de la potencia en términos de la masa de combustible [ref.1.25].

$$P = \frac{\eta_f \eta_{vo} X N Q_{HV} m_c}{2} \quad (1.9)$$

En las ecuaciones 1.8 y 1.9 se puede observar la influencia que tiene la eficiencia de la combustión del combustible, eficiencia volumétrica del aire, poder calorífico, densidad del aire y relación aire combustible en el desarrollo de la potencia de un motor encendido por compresión.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ref. 1.1] HEYWOOD, John, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Edición 2, Nueva York, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1998. p. 18.
- [ref. 1.2] Idem, p. 491.
- [ref. 1.3] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Ingeniería Mecánica. [en línea]. Disponible en: www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/diesel/motor.htm
- [ref. 1.4] HEYWOOD, op. cit, p. 173.
- [ref. 1.5] Idem, p. 491.
- [ref. 1.6] INDECOPI. *NTP 321.125:2008, BIOCMBUSTIBLES Biodiesel: Especificaciones*, 2008. p. 16.
- [ref. 1.7] HEYWOOD, op. cit, p. 57. [ref. 1.8] Idem, p. 506.
- [ref. 1.9] *Ibidem*.
- [ref. 1.10] Idem, p. 543.
- [ref. 1.11] Idem, p.506.
- [ref. 1.12] *Ibidem*.
- [ref. 1.13] *Ibidem*.
- [ref. 1.14] Idem, p.48.
- [ref. 1.15] Idem, p. 52.
- [ref. 1.16] Idem, p. 51.
- [ref. 1.17] Idem, p. 52.
- [ref. 1.18] *Ibidem*.
- [ref. 1.19] Idem, p. 53.
- [ref. 1.20] *Ibidem*.
- [ref. 1.21] Idem, p. 54.
- [ref. 1.22] *Ibidem*.
- [ref. 1.23] LAPUERTA, Magín, ARMAS, Octavio, AGUDELO, John R y SANCHEZ, Carlos A. *Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento*, 2006. p. 1.
- [ref. 1.24] HEYWOOD, op. cit, p. 57.
- [ref. 1.25] *Ibidem*.

CAPÍTULO 2: FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN CUANDO TRABAJA A DIFERENTES ALTITUDES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Este capítulo tiene como objetivo cuantificar de manera teórica, para todos los MEC de aspiración natural, el desarrollo de potencia, eficiencia y consumo de combustible a medida que los MEC trabajan a mayor altitud sobre el nivel del mar.

Lo que primero se hará es calcular la variación de la presión, temperatura y densidad del aire a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Una vez que se conozca cómo cambian las características del aire en la altura, se utilizan los resultados obtenidos para hallar el efecto de la altitud en el funcionamiento de los MEC en base a factores de corrección y las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1.

2.1 Condiciones del Aire en Altitud

2.1.1 Cambio de Temperatura y Presión

A medida que la altura sobre el nivel del mar aumenta, la temperatura y la presión atmosférica varían hacia abajo. La presión y la densidad atmosférica disminuyen debido a la menor columna que el aire tiene que soportar encima, por ese motivo también cambia la composición del aire porque sus componentes tienen diferente peso molecular. Es conocido que la temperatura del medio disminuye a lo alto de la tropósfera.

Para simplificar el cálculo de la disminución de la presión y la temperatura se necesita hacer algunas suposiciones, ya que sus valores en el medio, sobre todo el de la temperatura, son influenciados por la zona geográfica, hora del día y estaciones climáticas. Tomando como base investigaciones realizadas por los especialistas en motores de combustión interna de las Universidades de Castilla-La Mancha y de Antioquia: Pedro Benjumea, Magín La Puerta y John Agudelo; para efectos de cálculo en motores se puede asumir que la temperatura atmosférica disminuye linealmente de 20°C a 0 m.s.n.m. hasta -55°C a 11000 m.s.n.m. como el que se puede observar en la

figura 2.1 [ref. 2.1]. Este perfil de temperaturas es utilizado para cálculos de aerodinámica.

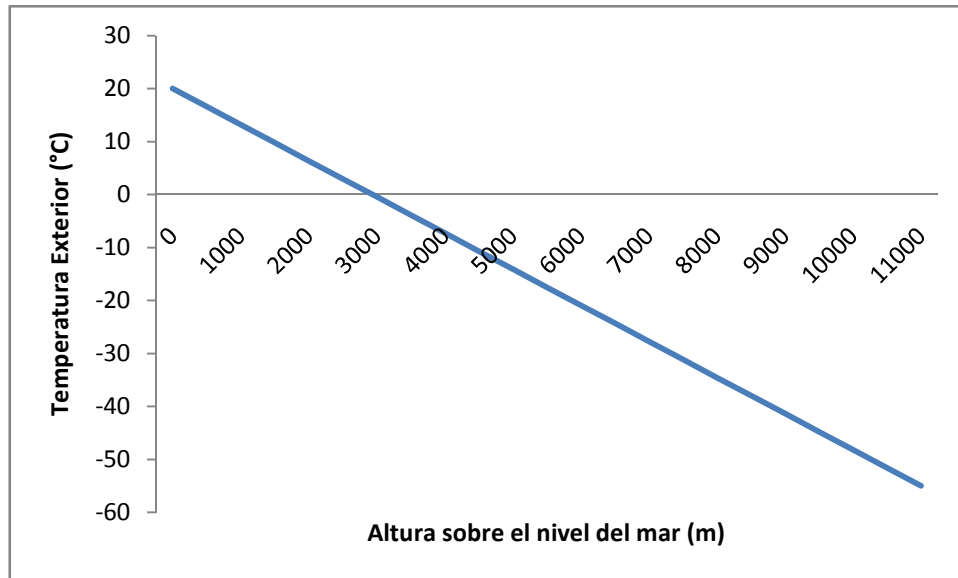


Figura 2.1: Disminución de la Temperatura Atmosférica

Elaboración Propia

De la figura 2.1 se tiene la siguiente ecuación:

$$c = \frac{T_{0,X} - 20^{\circ}\text{C}}{H} \quad (2.1)$$

Donde $T_{0,X}$ es la temperatura atmosférica que se quiere obtener con referencia a la altura H . El valor de c es $6.818 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Por lo tanto, si se asume el aire como gas ideal (el error es muy pequeño), se obtiene la variación de la presión atmosférica con la siguiente ecuación [ref. 2.2]:

$$p_{0,X} = p_0 \left(\frac{T_0}{T_{0,X}} \right)^{\frac{-g}{c \cdot R_a}} \quad (2.2)$$

Donde $p_{0,x}$ es la presión que se quiere hallar con referencia a la temperatura $T_{0,x}$ y R_a es la constante específica del aire (287.053 J/K·kg).

En base a las ecuaciones 2.1 y 2.2 se obtiene la siguiente tabla para diferentes alturas que se utilizará como referencia para los siguientes cálculos.

Tabla 2.1: Variación de la Presión y Temperatura Atmosférica a Diferentes Altitudes

Altura (m)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	100	20
500	94.3	16.6
1000	88.9	13.2
1500	83.7	9.8
2000	78.7	6.4
2500	74	3
3000	69.6	-0.5
3500	65.3	-3.9
4000	61.3	-7.3
4500	57.4	-10.7

Elaboración Propia

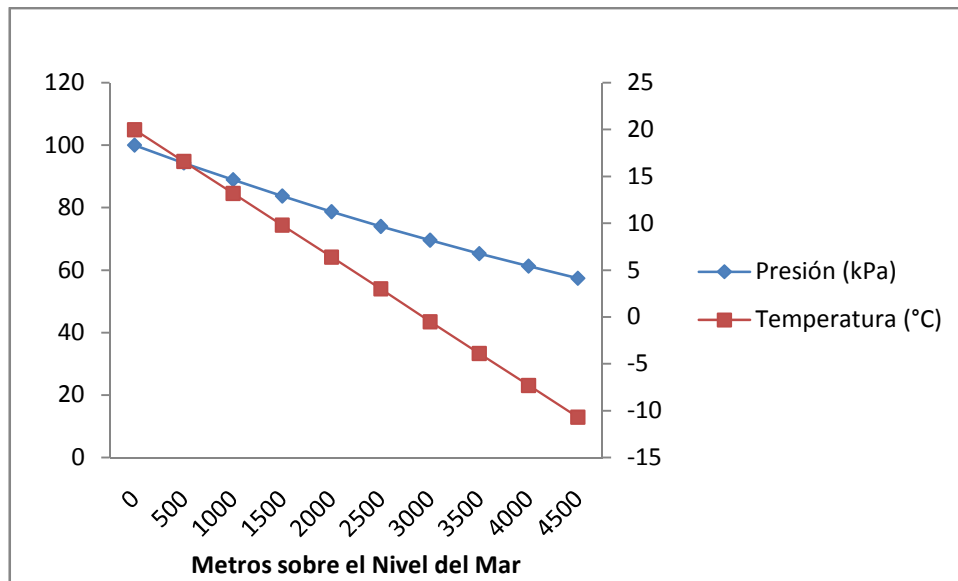


Figura 2.2 Variación de la Presión y Temperatura Atmosférica a Diferentes Altitudes.

Elaboración Propia

En la tabla 2.1 se muestran los datos que utilizaremos para los cálculos en los siguientes capítulos sobre el comportamiento de los motores encendidos por compresión en altura. En la figura 2.2 se puede ver la tendencia de la disminución de presión y temperatura a medida que la altitud se incrementa. Es importante recalcar que la presión a 4500 metros de altura es 57% de la presión a nivel del mar.

2.1.2 Disminución de la Densidad

Como se dijo anteriormente la disminución de la densidad y de la presión son proporcionales y se relacionan por la siguiente identidad, considerando al aire como gas ideal [ref. 2.3].

$$\rho_{0,X} = 3.48 * \frac{p_{0,X}}{T_{0,X}} \quad (2.3)$$

Donde $\rho_{0,x}$ es la densidad del aire, $p_{0,x}$ y $T_{0,x}$ son los valores de la presión y temperatura que han estado cambiando a medida que la altura aumentó.

Basándose en los resultados que se obtuvieron para presión y temperatura de la tabla 2.1, se calcula las nuevas densidades para distintas altitudes.

Tabla 2.2: Variación de la Densidad del Aire a Diferentes Altitudes

Altura (m)	Densidad del Aire (kg/m ³)
0	1.188
500	1.133
1000	1.081
1500	1.03
2000	0.98
2500	0.933
3000	0.889
3500	0.844
4000	0.803
4500	0.762

Elaboración Propia

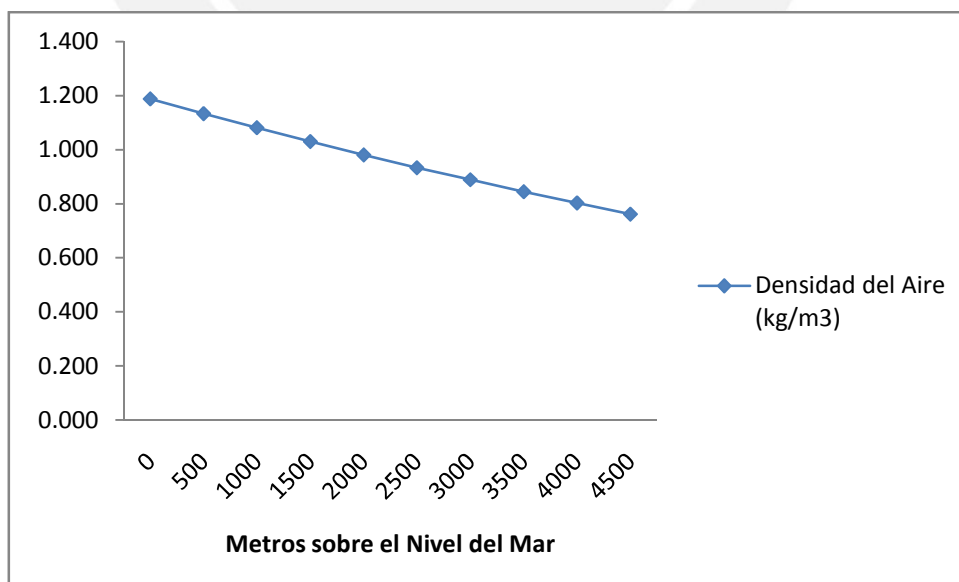


Figura 2.3: Variación de la Densidad del Aire a Diferentes Altitudes.

Elaboración Propia

En la tabla 2.2 se muestra valores de densidades a distintas altitudes que se utilizarán en cálculos posteriores y en la figura 2.3 se puede ver la tendencia de la disminución de la densidad a medida que la altura sobre el nivel del mar se incrementa.

La fracción molar de oxígeno también decrece con la altura, este cambio tiene efectos negativos en la mezcla estequiométrica porque se necesita de más cantidad de aire por unidad de combustible para que se realice una combustión completa. La siguiente ecuación obtenida de un estudio realizado por especialistas de las Universidades de Antioquia y de Castilla-La Mancha [ref. 2.4], relaciona los parámetros de presión y temperatura para hallar la variación de la fracción molar de los componentes del aire [ref. 2.5].

$$FM = FM_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{-g}{R \cdot c}} (PM_n - PM_a) \quad (2.4)$$

Donde FM y FM_0 son los valores de la fracción molar de los componentes del aire, g es la gravedad, R es la constante universal de los gases (8.314J/K-mol), PM_n y PM_a son los pesos molares del gas a calcular y del aire respectivamente.

Como los dos componentes principales del aire son el oxígeno y el nitrógeno, en la tabla 2.3 se muestra como varía la fracción molar de ambos gases.

La fracción molar del O_2 es 20.92% a 0 metros sobre el nivel del mar y la del N_2 es de 78.14% y sus pesos moleculares son 28g/mol y 32g/mol respectivamente.

Tabla 2.3: Variación de la Fracción Molar de Oxígeno y Nitrógeno en el Aire a Diferentes Altitudes.

Altura (m)	O ₂ (%)	N ₂ (%)
0	20.92	78.14
500	20.79	78.29
1000	20.66	78.45
1500	20.53	78.6
2000	20.4	78.76
2500	20.27	78.92
3000	20.14	79.09
3500	20	79.25
4000	19.87	79.42
4500	19.74	79.59

Elaboración Propia

Una relación que se utiliza en los cálculos estequiométricos es la tasa N₂/ O₂ de sus fracciones molares, es conocido que a condiciones normales la relación es de 3.76, si se hace el cálculo para una altitud de 4500 metros sobre el nivel del mar la proporción cambia a 4.03. Eso quiere decir que por cada mol de aire se va a disponer de menos masa de oxígeno, por lo tanto va a necesitarse más aire para completar la combustión, 7.2% más.

La densidad de los componentes del aire también cambiar con altitud y se puede hallar con la ecuación 2.5 [ref. 2.6].

$$\rho_x = FM_x * \rho_{aire} \quad (2.5)$$

Tabla 2.4: Variación de las Densidades del Oxígeno y Nitrógeno en el Aire a Diferentes Altitudes

Altura (m)	O2 (kg/m ³)	N2 (kg/m ³)
0	0.248	0.928
500	0.236	0.887
1000	0.223	0.848
1500	0.211	0.81
2000	0.2	0.772
2500	0.189	0.736
3000	0.179	0.703
3500	0.169	0.669
4000	0.16	0.638
4500	0.15	0.606

Elaboración Propia

En la tabla 2.4 se puede ver el cambio de la concentración de oxígeno en el aire. A 4500 metros sobre el nivel del se ha reducido de 0.248kg/m^3 a 0.150kg/m^3 , en 40% aproximadamente. Como se conoce, los sistemas de succión de aire de los motores son volumétricos, esto quiere decir que por cada unidad de volumen de aire que entre al motor un 40% menos de masa de aire va a estar disponible dentro de la cámara, lo que puede llevar a una combustión incompleta en la altitud por la menor cantidad de partículas de aire que reaccionan con el combustible, lo que conlleva a una menor eficiencia térmica.

En la figura 2.4 se muestra la disminución de la fracción molar y densidad del oxígeno en el aire a medida que la altura sobre el nivel del mar aumenta.

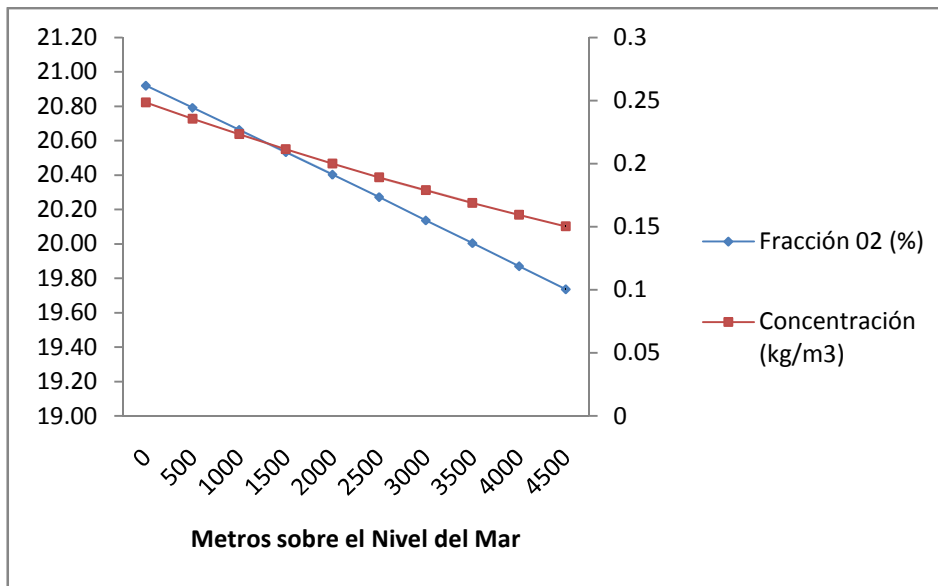


Figura 2.4: Fracción Molar y Densidad del Oxígeno en el Aire a Diferentes Altitudes.

Elaboración Propia

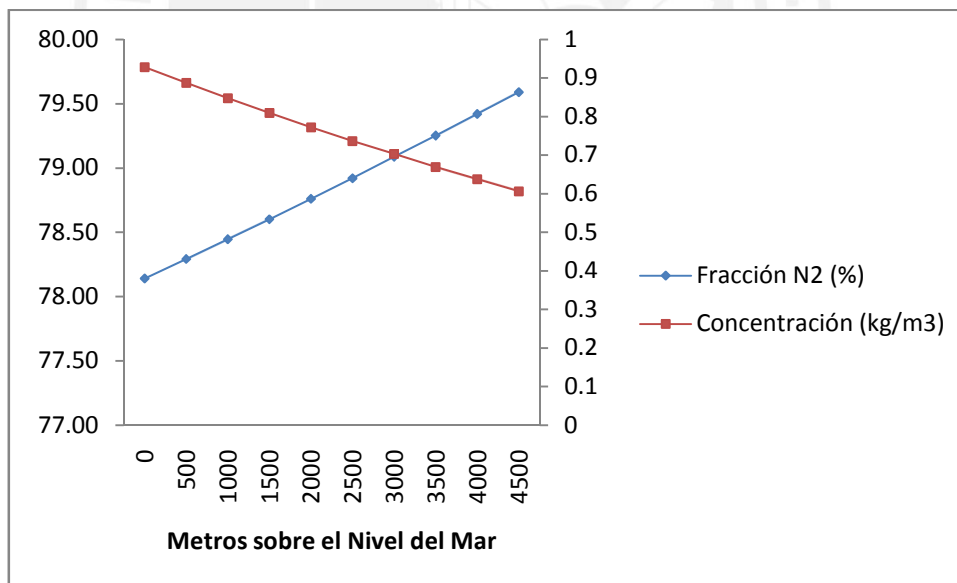


Figura 2.5: Fracción Molar y Densidad del Nitrógeno en el Aire a Diferentes Altitudes.

Elaboración Propia

El nitrógeno disminuye en densidad, pero aumenta en fracción molar a diferencia del oxígeno. Los datos hallados de fracción molar y densidad para los diferentes componentes del aire se utilizarán en este trabajo para explicar el efecto de la altitud

$$P_{max} = r_c * P_o \quad (2.6)$$

La presión a la que se alcanza después de la explosión dentro del cilindro depende directamente de la presión y temperatura del aire antes de la auto-detonación del combustible. Si la presión máxima a la que se llega dentro del motor es r_c veces (relación de compresión) la presión atmosférica en un motor con aspiración natural, entonces en altura la presión antes de la auto-ignición es menor dentro de la cámara, lo que lleva a desarrollar una menor potencia por el MEC porque el empuje que recibe el motor después de la explosión del combustible es menor a comparación de un motor que funciona a nivel del mar.

La menor densidad del aire afecta a la eficiencia térmica del motor porque para un mismo volumen de la cámara de combustión existen menos partículas de aire para que se produzca la reacción de combustión completa, es decir, dentro del motor no hay suficientes moléculas de oxígeno que reaccionen con todo el combustible para formar CO_2 , por lo tanto no se puede transformar toda la energía química del combustible en trabajo.

Diferentes estudios han tratado de cuantificar la pérdida de potencia cuando un motor trabaja a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Shen Lizhong, Shen Yungang, entre otros científicos de la "Society of Automotive Engineers" (SAE) elaboraron un estudio que compara el proceso de combustión de MEC a diferentes altitudes simulándolo con un banco de ensayos que trabaja con diferentes presiones de entrada en una cámara de combustión [ref. 2.10]. El experimento se realiza a tres presiones iniciales: 100kPa, 90kPa y 80kPa; y al mismo régimen: 2200rpm. Los resultados se ven en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Variación de Potencia a Diferente Altitud [ref. 2.11]

Rotación (rpm)	P (kPa)	Potencia (kW)	ge (g/kW-h)
2200	100	43.3	227.6
2200	90	38.4	233.2
2200	80	33.2	237.4

Elaboración Propia

La potencia desarrollada es menor cuando la presión disminuye, la menor eficiencia térmica se constata en el mayor consumo específico de combustible, ya que para poder alcanzar la misma potencia que a otras presiones se necesita más inyección de combustible.

Los resultados del experimento dicen que a 80kPa (1800 metros sobre el nivel del mar aproximadamente) la potencia disminuye en 23.5% y el consumo específico de combustible crece un 4.3%.

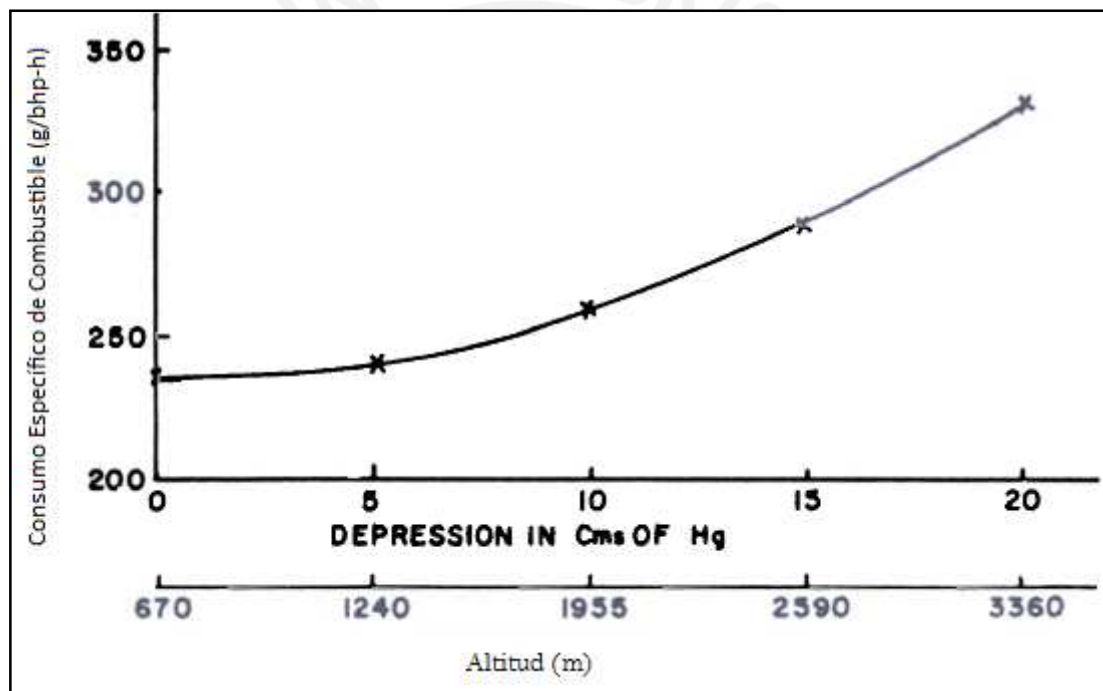


Figura 2.9: Consumo específico de combustible a distintas alturas [ref. 2.12].

La figura 2.9 fue extraída de un estudio elaborado por el Instituto Indio del Petróleo [ref. 2.13] en el cual se compara el consumo específico de combustible de un motor simulado a diferentes altitudes. Se puede apreciar que el consumo entre 670m y 3360m aumenta aproximadamente en 35%.

2.2.1 Factores de Corrección

En este trabajo se utilizarán factores de potencia para calcular la pérdida de potencia de un MEC, que son ecuaciones desarrolladas por distintos institutos, sociedades académicas reconocidas o fabricantes de autos para poder cuantificar la variación de la potencia nominal cuando un motor funciona en distintas condiciones atmosféricas. La forma generalizada que se le ha dado al factor de corrección para calcular la potencia se muestra en la ecuación 2.7 [ref. 2.14].

$$\Delta P = \frac{P_{0,X}}{P_0} = \left(\frac{p_{0,X}}{p_0}\right)^a \left(\frac{T_{0,X}}{T_0}\right)^b \quad (2.7)$$

Lo que se busca calcular con la ecuación 2.7 es la variación porcentual de la potencia, ΔP , que un motor puede desarrollar a diferentes altitudes a comparación de su potencia nominal cuando trabaja a nivel del mar. El cálculo se realiza en base a los valores de presiones y temperaturas a la que se encuentra el lugar donde se quiere analizar la pérdida de potencia del motor. Las constantes a y b corresponden al tipo de motor y condiciones de operación, sus valores provienen de diferentes estudios científicos y cambian de acuerdo a la investigación realizada.

En un estudio desarrollado por científicos de la Universidad Católica de Minas Gerais y el fabricante de autos FIAT [ref. 2.15] se compara los resultados de disminución de potencia obtenidos en un experimento con un auto real con los cálculos realizados en base a cuatro normas científicas desarrolladas por instituciones reconocidas: DIN 70020, SAE J 1349, JIS D 1001 e ISO 1585. El experimento con el auto consistía en acelerar el vehículo de cuatro cilindros desde 40km/h (cuarta marcha en la caja de cambios) hasta que haya recorrido 1000m. La prueba se realizó a 0 y 827m sobre el nivel del mar, a 20, 25 y 30°C, a diferentes momentos del día. Se mide el tiempo que transcurrió hasta que el auto recorra los mil metros. Los resultados fueron comparados con los cálculos realizados en base a las cuatro normas y el cálculo que más cerca estuvo de la realidad es el de la norma SAE J1349, representado en la 2.10 por la leyenda “CF₂”.

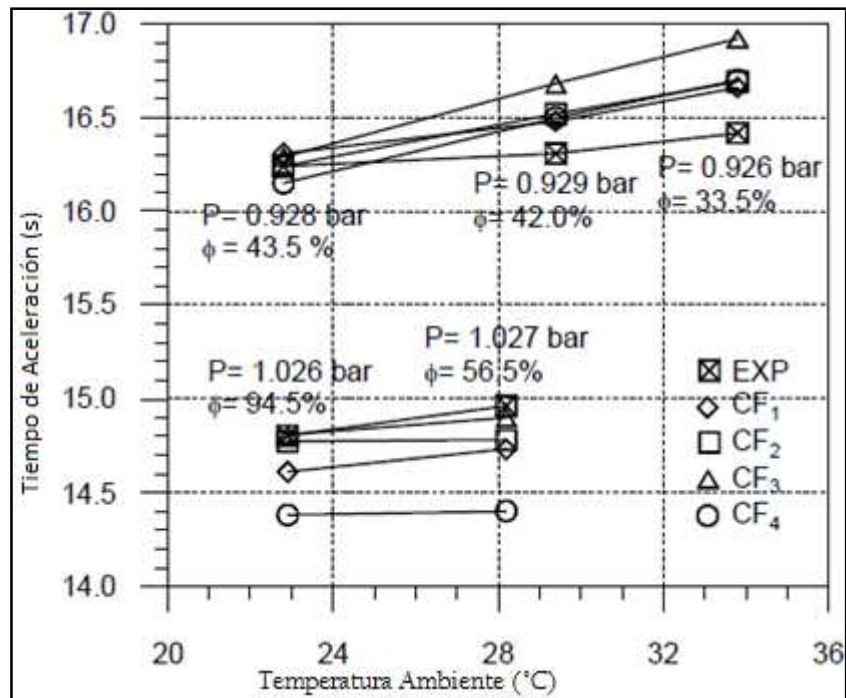


Figura 2.10: Comparación de Factores de Corrección (Pucpminas-FIAT) [ref. 2.16].

Los cálculos de disminución de potencia en este trabajo se harán en base a la norma SAE J1349, se justifica esta decisión en base al estudio realizado por la Universidad Católica de Minas Gerais. El factor de corrección de la norma SAE J1349 se presenta en la ecuación 2.8 [ref. 2.17].

$$\Delta P = \left(\frac{p_{0,X}}{p_0}\right)^1 \left(\frac{T_{0,X}}{T_0}\right)^{0.7} \tag{2.8}$$

Según un estudio realizado por científicos de Castilla-La Mancha la eficiencia volumétrica se puede calcular con la ecuación 2.9 [ref. 2.18].

$$\Delta \eta_v = \frac{\eta_{v0,X}}{\eta_{v0}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.7} \tag{2.9}$$

La ecuación 2.9 es la misma que se utiliza para hallar el factor de corrección, solo que se obvia la relación entre presiones y su exponente.

Las ecuaciones 2.8 y 2.9 en fusión con las mencionadas en el capítulo 1 se tomarán como base para el cálculo de la potencia, eficiencia y consumo de combustible de MEC en altitud.

2.2.2 Cálculo de la Variación de Potencia, Eficiencia Térmica y Consumo Específico de Combustible para Diferentes Altitudes

Una vez obtenidas las ecuaciones con las que se puede calcular la pérdida de la eficiencia en la altura, se pueden hallar los valores de eficiencia y consumo de combustible en base a las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1. Se toman como valores de presión y temperatura atmosférica: 100kPa y 20°C respectivamente.

Se realizará un ejemplo de cálculo y después se mostrará los resultados para altitudes en un rango de 0 a 4500 metros sobre el nivel del mar. Se tomará una altura intermedia para el ejemplo de cálculo: 2500m.s.n.m. Las condiciones atmosféricas del aire a esta altitud son de 74kPa, 3°C y 0.933kg/m³.

En los cálculos se obtienen resultados porcentuales porque no se está comparando un motor en específico, se halla una tasa de variación de potencia, eficiencia y consumo de combustible para motores de encendido por compresión con aspiración natural en general.

Se utiliza la ecuación 2.10:

$$\Delta P = \left(\frac{p_{0,x}}{p_0} \right)^1 \left(\frac{T_0}{T_{0,x}} \right)^{-0.7} \quad (2.10)$$

$$\Delta P = \left(\frac{74kPa}{100kPa} \right)^1 \left(\frac{(273+20)K}{(273+3)K} \right)^{-0.7} = 71.0\% \quad (2.10a)$$

La potencia que un MEC puede generar a 2500 metros sobre el nivel del mar a comparación con un motor que trabaja a nivel del mar es de 71% de su valor nominal.

Una vez calculada la variación porcentual en que disminuye la potencia nominal de un MEC es posible hallar el valor de la eficiencia térmica con la ecuación 2.11 vista en el capítulo 1 [ref. 2.19].

$$P = \frac{\eta_f \eta_{v0,x} N Q_{HV} m_c}{2} \quad (2.11)$$

Se despeja la variable eficiencia térmica:

$$\Delta \eta_f = \frac{2 * \Delta P}{\eta_f \eta_{v0,x} N Q_{HV} m_c} \quad (2.12)$$

Se simplifican todas las variables que permanecen constantes en el análisis: velocidad del motor N , ya que se comparan dos situaciones a un mismo régimen; el volumen de la cámara de combustión V_d es la misma; en este cálculo, todavía no se cambia el combustible, por lo tanto, el poder calorífico es el mismo, entonces Q_{HV} y m_f permanecen constantes.

Simplificando:

$$\eta_f = \frac{\Delta P}{\eta_{vX}} \quad (2.13)$$

Para poder hallar la eficiencia térmica en se utilizará la ecuación 2.13, la que depende de la variación de dos factores: disminución de potencia desarrollada y eficiencia volumétrica.

Para hallar la disminución de eficiencia térmica se calcula la eficiencia volumétrica con la ecuación 2.14.

$$\Delta\eta_v = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0.7} \quad (2.14)$$

Reemplazando valores:

$$\Delta\eta_v = \left(\frac{273+3}{273+20}\right)^{0.7} = 95.9\% \quad (2.14a)$$

Por lo tanto al reemplazar la fórmula inicial:

$$\eta_f = \frac{71\%}{95.9\%} = 74.0\% \quad (2.14b)$$

A 2500 metros sobre el nivel del mar, la variación de la eficiencia térmica es de 74.0%. En conjunto con la eficiencia volumétrica de 95.9% el motor genera un 71.0% de potencia nominal.

El siguiente parámetro a calcular es el consumo específico de combustible, el cual tiene que aumentar debido a que la eficiencia térmica disminuyó, es decir, se necesita de más combustible para generar la misma cantidad de potencia. De todas maneras, el valor de la potencia siempre estará limitado a 71% del nominal a 2500 metros sobre el nivel del mar. En otros regímenes se puede igualar valores de potencia menores con la inyección de más combustible, pero no se puede llegar al valor de potencia máxima que puede desarrollar el motor al nivel del mar. Para calcular el consumo específico de combustible se utilizará la ecuación 2.15 ya mencionada en el capítulo 1.

$$\Delta\eta_f = \frac{1}{\Delta sfc * Q_{hv}} \quad (2.15)$$

Se despeja el Δsfc y se simplifica el poder calorífico.

$$\Delta\eta_f = \frac{1}{\Delta sfc * Q_{hv}} \quad (2.15a)$$

Se reemplazan los valores en la ecuación.

$$\Delta sfc = \frac{1}{78.5\%} = 127.4\% \quad (2.15b)$$

Los resultados que se obtuvieron se interpretan de la siguiente manera: a 2500 metros sobre el nivel del mar el motor va a tener restringido el valor nominal de su potencia a 71% del nominal, esto a causa de la menor eficiencia térmica (74%) y volumétrica (96%). Tanto la eficiencia térmica como volumétrica se vieron afectadas por el cambio de las condiciones del aire, principalmente por la densidad y presión atmosférica, que bajaron a 78.5% y 74% respectivamente. Los motores encendidos por compresión de aspiración natural generalmente son utilizados en vehículos, por lo que trabajan a diferentes regímenes de giro, entonces cuando el usuario siente una disminución de potencia tiende a apretar más el acelerador para inyectar más combustible y, de esa manera, compensar la falta de potencia, lo que conlleva a un mayor consumo específico de combustible, calculado en 27.4% a 2500 metros sobre el nivel del mar de lo que consumiría a nivel del mar.

2.2.3 Resultados

En la tabla 2.6 se pueden observar los resultados de disminución de potencia nominal, eficiencia térmica y volumétrica a diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

Tabla 2.6: Potencia, Eficiencia Volumétrica y Térmica con el Incremento de la Altitud.

Altura (m)	Potencia Desarrollada	Eficiencia Volumétrica	Eficiencia Desarrollada
0	100.00%	100.00%	100.00%
500	93.53%	99.19%	94.30%
1000	87.45%	98.37%	88.90%
1500	81.65%	97.55%	83.70%
2000	76.12%	96.73%	78.70%
2500	70.97%	95.90%	74.00%
3000	66.15%	95.05%	69.60%
3500	61.52%	94.22%	65.30%
4000	57.24%	93.38%	61.30%
4500	53.12%	92.54%	57.40%

Elaboración Propia

A lo largo del desarrollo de este capítulo se había mencionado que a medida que la altitud se incremente los valores de potencia y eficiencia térmica van a disminuir, esto debido, principalmente, a la menor densidad del aire y presión en el ciclo termodinámico. En la tabla 2.6 se muestra la pérdida de potencia hasta una altitud de 4500 metros sobre el nivel del mar, lo que más llama la atención es la disminución sustancial de potencia y eficiencia que el motor deja de desarrollar el motor en la altitud, 53.12% y 57.40% respectivamente. Para vehículos que lleven carga, estos factores son cruciales porque el límite de peso máximo puede verse afectado con la menor potencia desarrollada.

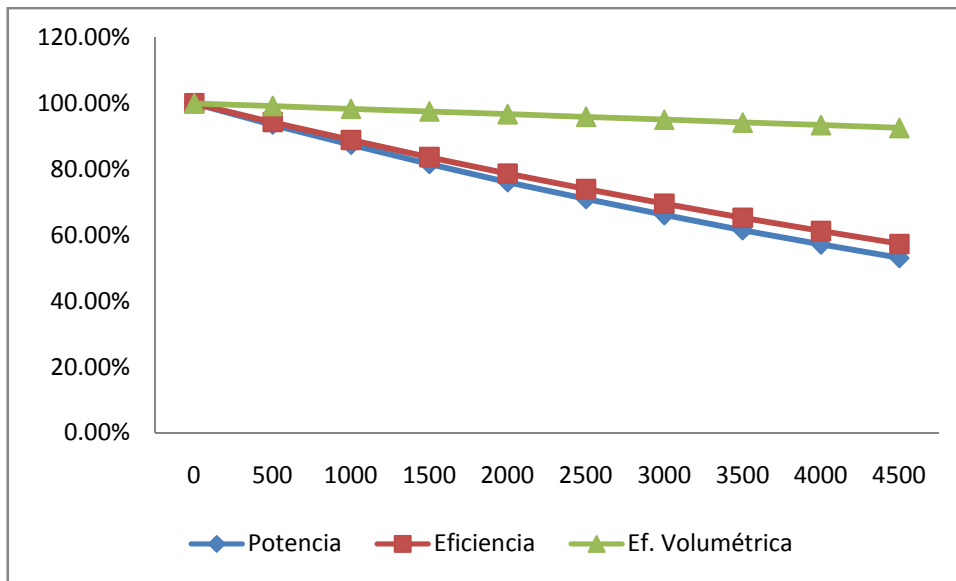


Figura 2.11: Potencia, Eficiencia Volumétrica y Térmica con el Incremento de la Altitud.

Elaboración Propia

En la figura 2.11 se pueden ver los resultados de la tabla 2.6 graficados. En ella se puede observar la tendencia a disminuir que tienen la potencia y eficiencia térmica a medida que la altitud aumenta. Lo que se observa es que la potencia disminuyó en mayor porcentaje que la eficiencia térmica, eso se da porque la pérdida de potencia es producto de la menor eficiencia térmica y volumétrica en conjunto.

Tabla 2.7: Consumo Específico de Combustible con el Incremento de la Altitud

Altura (m)	Cons. Esp. Combustible
0	100.00%
500	106.04%
1000	112.49%
1500	119.47%
2000	127.06%
2500	135.14%
3000	143.68%
3500	153.14%
4000	163.13%
4500	174.22%

Elaboración Propia

Los resultados obtenidos para el consumo específico de combustible se habían mencionado desde antes, a medida que incrementa la altura hay mayor necesidad de inyectar más combustible al motor para que se pueda compensar la potencia perdida debido a la disminución de la eficiencia térmica. Lo que se puede observar en la tabla 2.7 es el dramático incremento del consumo de combustible, ya que a 3000 metros (Cajamarca) se consume 35% más combustible de lo que se consumiría a nivel del mar (Lima), mientras que a 4500 metros (Cerro de Pasco) se necesita 74% extra de combustible de lo que se necesita a 0 metros.

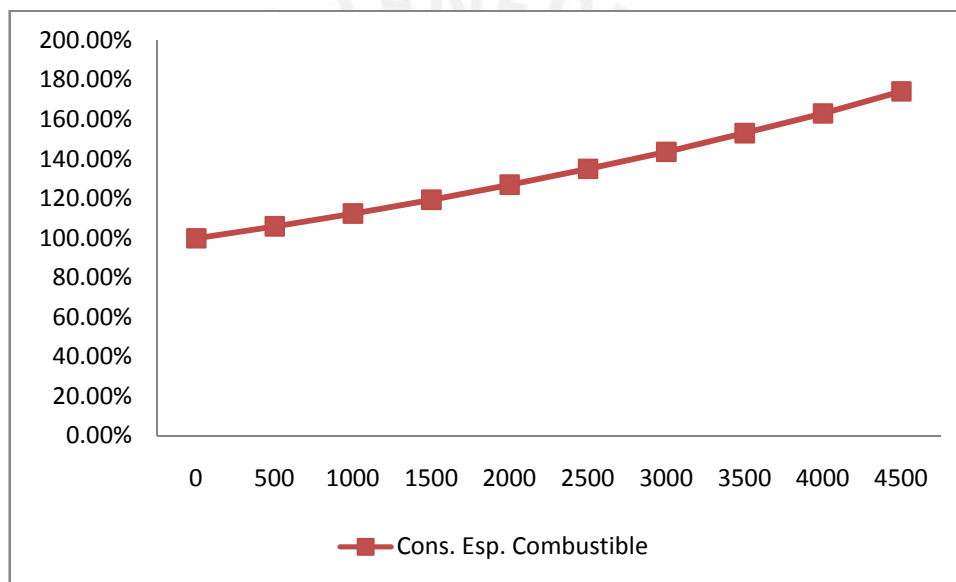


Figura 2.12: Consumo Específico de Combustible con el Incremento de la Altitud.

Elaboración Propia

En la figura 2.12 se puede observar la tendencia del aumento de combustible a medida que se incrementa la altitud. Debido al alto consumo de un motor en altura, es un factor importante a considerar en los costos de cualquier negocio, viaje o actividad que se realice con un auto o MEC en general.

Los tres parámetros calculados (potencia, eficiencia y consumo de combustible) para evaluar el funcionamiento de un motor encendido por compresión de aspiración natural cuando funcionan en altura están relacionados entre sí, es decir, si uno de ellos se ve afectado los otros dos también. Lo que sucede cuando un motor asciende es que la densidad del aire es menor, lo que implica que la cantidad de oxígeno que se

encuentra en la cámara es insuficiente para poder completar la combustión, es por eso que la eficiencia del motor disminuye. Un motor ha sido diseñado bajo ciertos parámetros, para poder obtener la mayor cantidad trabajo de la energía química del combustible, pero si esos parámetros cambian su desempeño se va a ver menguado. Otro factor que también se ve afectado directamente es la densidad del oxígeno en la mezcla, al ser menor, aparte de que se necesite más aire porque la densidad del mismo ha disminuido, se debe incrementar más porque la cantidad molar de oxígeno en el aire es menor. Por lo tanto se puede decir que la necesidad de más aire dentro de la cámara para que la eficiencia térmica aumente se debe a dos motivos: menor densidad del aire y menor fracción molar del oxígeno en el aire.

Otro factor que afecta el desempeño del motor es la menor presión, que afecta la eficiencia térmica porque dentro de todo el ciclo termodinámico hay menos presión y por lo tanto el empuje que recibe el pistón por la explosión es de menor magnitud. La disminución de presión también afecta el inicio de la combustión, hace que se tarde más, porque el combustible necesita que dentro de la cámara se alcancen valores de presión y temperatura adecuados para que se produzca la auto-detonación, se puede decir que si la presión en el interior es menor la temperatura también, por lo tanto la ignición del combustible se tardará más para lo que fue diseñado afectando la eficiencia térmica del motor. La presión también tiene consecuencias negativas en la eficiencia volumétrica del aire, la capacidad de renovar el aire dentro de la cámara, porque si la presión exterior es menor, el empuje que necesita el aire para entrar al pistón y desplazar los gases de escape también va a ser menor, es por eso que los valores hallados de eficiencia volumétrica son ligeramente menor a los que se tienen a nivel del mar.

El aumento de la altitud afecta de todas estas maneras a la eficiencia térmica de un motor de encendido por compresión y esto se ve reflejado en la menos potencia entregada por el motor y mayor consumo de combustible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ref. 2.1] LAPUERTA, Magín, ARMAS, Octavio, AGUDELO, John R y SANCHEZ, Carlos A. *Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento*, 2006. p. 3.
- [ref. 2.2] Idem, p. 4.
- [ref. 2.3] Idem, p. 1.
- [ref. 2.4] Idem, p. 4.
- [ref. 2.5] Ibídem.
- [ref. 2.6] Ibídem.
- [ref. 2.7] Idem, p.1.
- [ref. 2.8] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Ingeniería Mecánica. [en línea]. Disponible en:
www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/diesel/motor.htm
- [ref. 2.9] Idem, p. 181.
- [ref. 2.10] SAE INTERNATIONAL. (1995). *950857-Combustion Process of Diesel Engines at Regions with Different Altitude*, pág 2.
- [ref. 2.11] Ibídem.
- [ref. 2.12] SIVASANKARAN, JAIN. *Performance of Diesel Engines at High Altitudes*, 1998, p. 4.
- [ref. 2.13] Ibídem.
- [ref. 2.14] LAPUERTA y otros, op.cit., p.4.
- [ref. 2.15] SODRÉ. J, SOARES. S. *Comparison of Engine Power Correction Factors for Varying Atmospheric Conditions*, 2003. p. 5.
- [ref. 2.16] Ibídem.
- [ref. 2.17] SAE INTERNATIONAL. *Engine Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Gross Power Rating*, 1995. p. 12.
- [ref. 2.18] LAPUERTA y otros, op.cit., p.7.
- [ref. 2.19] HEYWOOD, op. cit., p. 52.

CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS BX Y COMO AFECTAN A LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

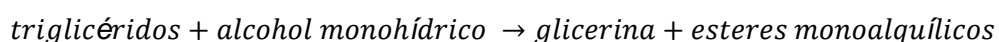
El biodiesel es definido como un combustible compuesto de esteres mono alquílicos de una cadena larga de ácidos grasos derivado de aceites vegetales o animales, designado como B100 [ref. 3.1].

Los aceites vegetales son la fuente principal para la elaboración del biodiesel, debido a la gran cantidad de recursos disponibles para su obtención. Dichos aceites contienen glicéridos que pueden suplir el uso del diesel (hidrocarburo). Presentan alto poder calorífico, tiene bajos niveles de azufre y pocos compuestos aromáticos poli cíclicos resultan de su quema.

Una de las principales ventajas de los aceites vegetales es que provienen de muchas especies y se pueden encontrar en todo el mundo. Por ejemplo, la Unión Europea principalmente produce biodiesel de aceite de colza (principal productor mundial), Estados Unidos de soya, Malasia de palma aceitera y existen otras semillas como el girasol, maní, canola, etc.

Es posible utilizar aceites vegetales o animales directamente en un motor de combustión interna de encendido por compresión, pero algunas de sus características como la viscosidad y lubricidad, principalmente, son distintas a las del diesel, tiene que pasar por un proceso para que se convierta en biodiesel y pueda ser utilizado en motores sin que afecte el tiempo de vida de los mismos. Dependiendo de la materia prima y proceso que se utilice para transformar el aceite en biodiesel, las características del producto pueden diferir, es por eso que se utilizan normas para mantener las características de los combustibles en rangos aceptables para que no afecten a la vida del motor y también para controlar las emisiones que se emanan al medio ambiente.

En el Perú se produce biodiesel de palma aceitera, por lo tanto esta investigación se concentrará en las mezclas diesel con biodiesel que proviene de la palma. El proceso más usado para la obtención de biodiesel se conoce como transesterificación con metanol. Reacción química donde se obtiene esteres y glicerol a partir de la reacción de aceite vegetal con un alcohol.



Al obtener esteres monoalquílicos la viscosidad entra en los rangos establecidos por la norma peruana. De todas maneras se tiene que tener cuidado, ya que en el proceso se usa catalizadores y el combustible tiene que quedar libre de los mismos para que no reaccionen en el motor. De la misma manera, tiene que quedar libre de alcohol y glicerina.

En este capítulo se hablará sobre la norma de combustibles diesel y biodiesel que se utiliza en el Perú para garantizar la calidad del producto. También se mencionarán las propiedades más importantes de los combustibles que afectan el desempeño del motor (desarrollo de potencia y eficiencia térmica) y, por ende, se hará una comparación entre el diesel y biodiesel entre dichas propiedades.

3.1 Normas que Regulan las Propiedades de las Mezclas BX en el Perú

En el Perú, las propiedades de los combustibles y los componentes del mismo se regulan en base a las normas técnicas, las cuales fueron elaboradas para asegurar la calidad de los combustibles y que estos no perjudiquen el funcionamiento de los motores y, también, que los productos de la combustión estén dentro de rangos establecidos para contaminar lo menos posible el medio ambiente.

La norma que estandariza las propiedades y los componentes del biodiesel puro en el Perú es la NTP 321.125:2008.

La norma que estandariza las propiedades y los componentes del diesel hasta con un porcentaje de 5% de biodiesel (DB5) es la NTP 321.003:2005.

Las mezclas con más de 5% de biodiesel no están normadas, por eso se utilizará como referencia la norma ASTM D7467-10 para mezclas entre 6% y 20% de biodiesel. Se asocia este estándar, ya que el documento NTP 321.003:2005 hace referencia a la norma ASTM D975 para las especificaciones del diesel, así como el documento NTP 321.125:2008 hace referencia a la norma ASTM 6751 para las especificaciones del biodiesel.

Otro estándar de importancia para la elaboración de las normas técnicas peruanas es la EN 14214:2003 (Requerimientos y métodos de prueba para combustibles de automóviles-Esteres monoalquílicos de ácidos grasos.)

La siguiente tabla compara las especificaciones para el diesel 2 (hasta 5% de biodiesel), biodiesel (B100) y mezclas B6-B20. Los valores que se muestra se obtuvieron de las normas NTP 321.003:2005, NTP 321.125:2008 y ASTM D7467-10.

Las especificaciones de las normas se pueden encontrar en los anexos 1, 2 y 3.

Tabla 3.1: Propiedades de los Combustibles Aceptadas por Normas Peruanas

Características	Especificaciones					
	DIESEL N°2 (D2 S - 350) [ref. 3.2]		BIODIESEL B100 [ref. 3.3]		MEZCLAS B6-B20 [ref. 3.4]	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
Contenido de FAME, %Vol		5	100		6	20
Pto. De Inflamación (Copa Cerrada), °C	55		93		55 ^(A)	
Contenido de Metanol, %Vol				0.2		
Densidad a 15°C, kg/m ³	820	845	860 ^(B)	900 ^(B)	820 ^(B)	
Viscosidad Cinemática a 40°C, cSt	2	4.5	1.9	6	1.9	4.1
Punto Nube, °C ^(C)						
Número de Cetano	51		47		47	
Aromáticos, %Volumen		35				35
Azufre Total, mg/kg		350		50		350
Agua y Sedimentos, %Vol		0.05		0.05		0.05
Material Particulado, mg/kg		24		24		24
Lubricidad, HFRR @ 60°C, mm		460				520

Elaboración Propia

- (A) En la norma ASTM D7467-10 no se da un valor para la densidad. Se asume que es la mínima de los componentes que conforman la mezcla.
- (B) La norma ASTM D7467-10 el valor mínimo para el número de cetano es 40. En la tabla 1 se asume como valor mínimo 47, ya que es la temperatura mínima de los componentes de la mezcla B6-B20.
- (C) El punto nube depende del aceite de donde proviene el biodiesel.

Las especificaciones que son de mayor importancia para este estudio son viscosidad, número de cetano, densidad y punto nube. Dichas propiedades afectan directamente al desarrollo de la potencia y eficiencia térmica del motor.

Los otros componentes y características tienen implicancia principalmente en las emisiones, los depósitos posteriores a la combustión, tiempo de vida del motor y calidad del proceso de transesterificación.

Densidad

Es una relación importante para la clasificación de combustibles por peso (liviano o pesado) y también para el funcionamiento del motor y sus accesorios. Como los motores controlan la cantidad de inyección de combustible en base al volumen, a medida que un combustible es más denso se introducirá más masa dentro del cilindro.

Viscosidad

La viscosidad afecta la lubricidad y el grado de atomización del combustible [ref. 3.5]. El rango de viscosidades permitido, según norma, está en 1.9 y 6.0 mm²/s (a 40°C) [ref. 3.6]. Es necesario limitar un valor mínimo de viscosidad para evitar las pérdidas en bombas de inyección e inyectores, estos accesorios necesitan bombear una viscosidad apropiada para operar adecuadamente. Por otro lado, el valor máximo se limita por consideraciones que involucran el diseño y el tamaño del motor. La atomización afecta la combustión en la cámara, por ende el desempeño del motor varía. Cuando el biodiesel se mezcla con diesel N°2 el valor de la viscosidad baja. En

el biodiesel, la viscosidad se relaciona con la cantidad de triglicéridos no reaccionados, a mayor cantidad de triglicéridos, mayor viscosidad [ref. 3.7].

La viscosidad varía de acuerdo al tipo de biodiesel como se muestra en la tabla 3.2. En el caso de la soya se puede observar que depende del tipo del alcohol que se utiliza en la transesterificación la viscosidad puede variar [ref. 3.8].

Tabla 3.2: Viscosidades para distintos combustibles [ref. 3.9]

Combustible	Viscosidad (cSt @40°C)
D2	2.7
Semilla de Colza (metil)	6.7
Soya (metil)	4.08
Palma (etil)	4.5
Soya (etil)	4.41

Elaboración Propia

Número de Cetano

Es un valor que tiene un combustible que indica la facilidad que tiene para auto encenderse bajo compresión, a mayor número de cetano más rápido se auto enciende. En el biodiesel esta propiedad depende del aceite vegetal, es independiente del proceso de producción. Mientras sea mayor la cantidad de parafinas lineares en su estructura, el número de cetano aumentará, ocurre lo opuesto con los aromáticos [ref. 3.10]. El tiempo de espera en que el combustible tarda en encenderse se mide con el número de cetano. El biodiesel tiene un número de cetano más alto que el del D2 por su mayor contenido de oxígeno [ref. 3.11].

El número de cetano depende del diseño del motor, pero un valor muy bajo demora el encendido del combustible en la cámara bajando el desempeño del motor debido a una combustión incompleta y poco aprovechamiento de la carrera de expansión, sobre todo en climas fríos. Un número alto aumenta la robustez de la combustión.

El número de cetano, como ya fue mencionado, cambia de acuerdo al origen del aceite, en la siguiente tabla se muestra algunos tipos de aceites y sus respectivos números de cetano [ref. 3.12].

Tabla 3.3: Combustibles y sus números de cetano [ref. 3.13]

Combustible	Número de cetano
Biodiesel	45-65
Canola	40-50
Semilla de colza	54.4
Soya (metil)	46.2
Palma (etil)	56.2

Elaboración Propia

La tabla 3.3 muestra algunos valores de número de cetano para distintos tipos de biodiesel, en la primera fila se toma los valores promedio que tienen distintos esteres de biodiesel. Como se mencionó antes, el biodiesel en su mayoría tiene un mayor número de cetano que el D2 (51 como mínimo según norma peruana), pero en algunos casos como en la soya dicho número puede ser menor. Según los datos de esta investigación el cetano para el diesel de palma es mayor que el que enuncia la norma, como ya se comentó la palma es la principal materia prima para producir biodiesel en el país.

Punto Nube

Temperatura a la cual el combustible empieza a cristalizarse. El “pour point” es la temperatura a la cual el combustible deja de fluir, cercano a esta temperatura es más difícil el bombeo. En el biodiesel esta propiedad depende de su estructura, las parafinas tienen un punto nube más alto que las naftas [ref. 3.14]. El biodiesel producido de palma aceitera tiene un punto nube muy alto, es una dificultad técnica que tiene la producción de biodiesel de palma aceitera en el Perú. En climas fríos debe haber mayor cuidado con uso y almacenamiento.

El punto nube en el biodiesel, es una propiedad que varía mucho respecto al origen del aceite, en la siguiente tabla se puede apreciar valores para punto nube de biodiesel producidos de distintos aceites y en distintas concentraciones de mezclas BX [ref. 3.15].

Tabla 3.4: Puntos nube para distintos biodiesel y distintas mezclas BX [ref. 3.16]

Concentración de Biodiesel	SME	CME	LME	ETME	ITME	LYGME	HYGME
0	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18
0.25%	-20	-18	-18	-16	-16	-15	-18
0.50%	-17	-18	-17	-16	-17	-14	-15
1%	-16	-18	-17	-15	-17	-16	-15
3%	-16	-17	-16	-13	-14	-16	-15
5%	-16	-17	-15	-12	-13	-16	-14
10%	-15	-17	-14	-9	-10	-13	-13
20%	-14	-15	-3	-2	-6	-6	-8
35%	-9	-12	-3	0	0	5	-6
50%	-9	-10	-2	3	4	13	-3
100%	2	-3	14	20	23	42	8

Elaboración Propia

Donde:

SME: ester metílico de soya.

CME: ester metílico de canola.

LME: ester metílico de manteca.

ETME: ester metílico de grasa comestible.

ITME: ester metílico de grasa no comestible.

LYGME: ester metílico de grasa amarilla con bajo contenido ácidos grasos libres.

HYGME: ester metílico de grasa amarilla con alto contenido ácidos grasos libres.

En la tabla 3.4 se puede observar que a medida que la proporción de biodiesel aumenta en la mezcla el punto nube también aumenta. El valor del punto nube del D2, según la tabla, es de -18°C (primera fila). Dicha temperatura está muy alejada de la menor temperatura de los tipos de biodiesel mencionados en la tabla, que es la de canola con -3°C .

Existe otra especificación de mucha importancia para el desarrollo de potencia en el motor que no se menciona en las normas presentadas en la tabla 3.1. Se conoce como poder calorífico.

Poder Calorífico

El poder calorífico es la cantidad de calor por unidad de masa que el combustible entrega cuando se oxida, está relacionado con la estructura molecular del fluido que entra en combustión.

Es importante hacer pruebas al combustible que se utiliza para conocer su poder calorífico porque de este depende la energía entregada del motor y también la eficiencia del mismo por efectos de diseño. En la tabla 3.5 se muestra valores de poder calorífico para distintos tipos de biodiesel y D2 [ref. 3.17].

Tabla 3.5: Combustibles y sus poderes caloríficos [ref. 3.18]

Combustible	Poder calorífico (kJ/kg)
D2	45600
Biodiesel	37500-45500
Canola	40100
Soya (metil)	39800
Palma (etil)	39070

Elaboración Propia

En la tabla 3.5 se puede observar que el poder calorífico del D2 es mayor que el del promedio de biodiesel que existen en el mercado. El biodiesel de soya y de palma tiene un poder calorífico bastante inferior que el del D2, esto influencia en la potencia que entrega el motor.

3.2 Biodiesel de Palma Aceitera

Científicos de la Universidad de Antioquía y de la Universidad de Colombia Sede Medellín investigaron sobre el cambio de las propiedades de distintas mezclas de diesel – biodiesel de palma, coincidentemente el biodiesel de palma aceitera es el de principal producción en el Perú, por lo tanto el análisis de sus características se ajusta a nuestra realidad.

Cuando los combustibles están expuestos a diferentes temperaturas su densidad y viscosidad cambian. La temperatura atmosférica está relacionada con la altura sobre el nivel del mar, es notorio que cuando uno está más alto es más frío. A continuación se muestra resultados del cambio de densidad y viscosidad de mezclas BX cuando varía la temperatura a la que están expuestos:

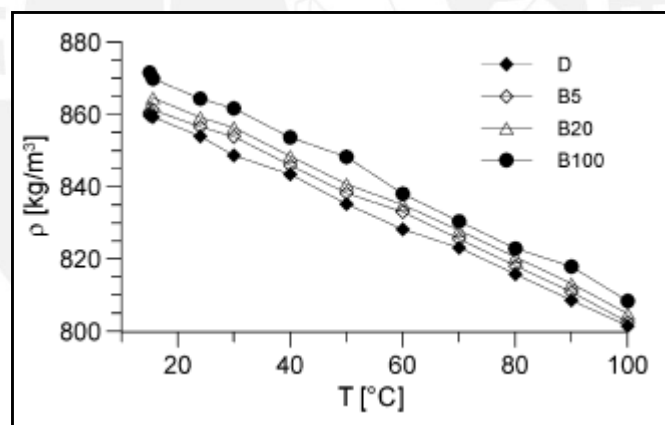


Figura 3.1: Cambio de la densidad de mezclas BX de palma aceitera respecto a temperatura atmosférica [ref. 3.19]

Como es de esperarse, a mayor temperatura la densidad del combustible disminuye. Se puede observar que los comportamientos de las distintas mezclas son casi lineales. En efecto, en el estudio se muestra que las densidades varían en la siguiente forma [ref. 3.20]:

$$\rho = c + d(T) \quad (3.1)$$

En la tabla 3.6 se muestra los valores que toman las constantes c y d de la ecuación 3.1.

Tabla 3.6: Valores de regresión lineal para densidades de mezclas BX [ref. 3.21]

Combustible	C	d	R ²
B100	882.67	0.734	0.997
B20	876.64	0.712	0.998
B5	873.06	0.692	0.994
D2	869.62	0.679	0.997

Elaboración Propia

En el siguiente gráfico se muestra la variación de la viscosidad cinemática de las mismas mezclas de biodiesel:

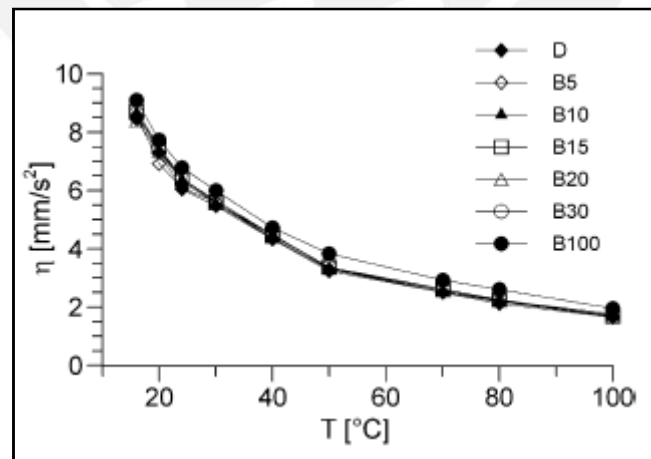


Figura 3.2: Cambio de la viscosidad de mezclas BX respecto a temperatura atmosférica [ref. 3.22].

Como se puede observar, a diferencia de la densidad, la viscosidad varía bastante a lo largo del rango entre 20°C y 100°C, entre 9mm/s² y 2mm/s².

Al igual que la densidad se hallaron líneas de tendencia, las cuales tienen aproximaciones muy cercanas a los puntos. La ecuación tiene la siguiente forma [ref. 3.23]:

$$\nu = e^{(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2})} \quad (3.2)$$

Los coeficientes de acuerdo al tipo de combustible se presentan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Coeficientes de Regresión para Hallar la Viscosidad para Diferentes Tipos de Mezclas BX [ref. 3.24]

Combustible	A	B	C	R ²
B100	0.3642062	55.22819	-416.2889	0.98862
B20	0.1624003	61.85122	-491.0632	0.96232
B5	0.2200899	56.05624	-409.7122	0.97861
B0	0.1429544	60.16295	-456.7099	0.98695

Elaboración Propia

A continuación se muestran gráficos que muestran la variación del poder calorífico, punto nube y número de cetano de las mezclas, ninguno de ellos depende de la temperatura a la que se encuentra el combustible.

El siguiente gráfico muestra la pérdida de poder calorífico cuando la concentración de biodiesel de palma es mayor.

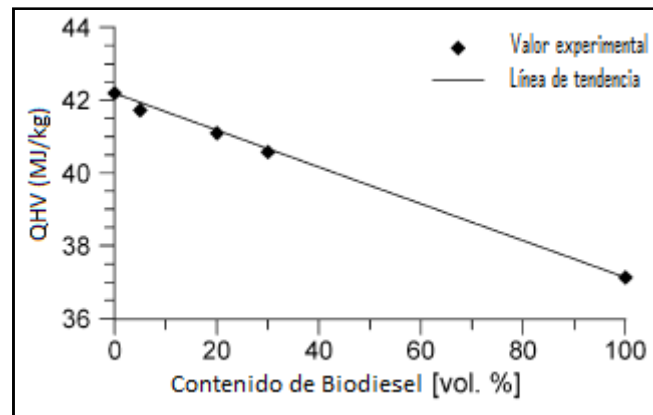


Figura 3.3: Cambio del poder calorífico de mezclas BX respecto a temperatura atmosférica [ref. 3.25].

El poder calorífico desciende de 42MJ/kg, cuando es D2, a 38MJ/kg con B100. La disminución obedece a una tendencia lineal.

Otra propiedad importante, sobre todo para las variadas condiciones atmosféricas que presenta el territorio peruano, es el punto nube, temperatura a la cual el combustible comienza a formar cristales. El gráfico 3.4 muestra que la variación del punto nube es casi lineal a lo largo de las mezcla con biodiesel de palma. Lo que llama más la atención son las distancia entre las temperaturas entre el B100 y D2, cuando es biodiesel al 100% el punto es 16°C y para diesel -5 °C.

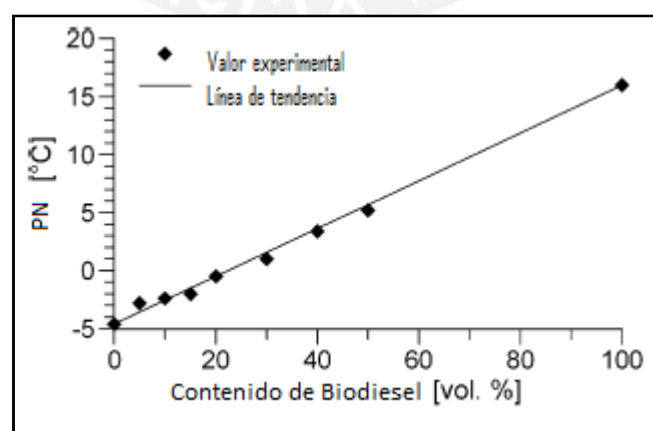


Figura 3.4: Cambio del punto nube de mezclas BX respecto a temperatura atmosférica [ref. 3.26].

Una propiedad igual de importante que las anteriores es el número de cetano que indica la capacidad de autoencendido del combustible. En este caso el biodiesel es de mejor característica que el diesel, ya que tiene una mayor número de cetano, por lo tanto más facilidad de autoencendido.

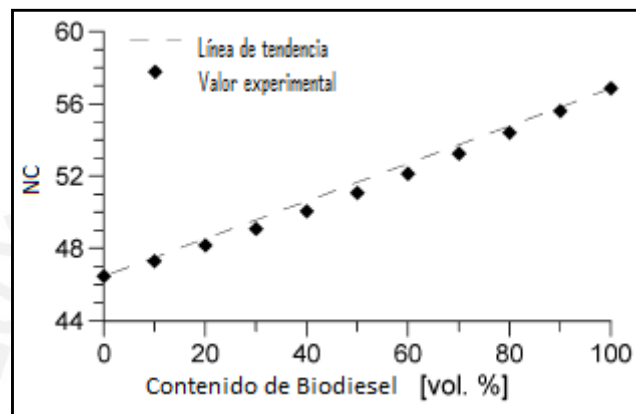


Figura 3.5: Cambio del número de cetano de mezclas BX respecto a temperatura atmosférica [ref. 3.27].

Para los tres casos (poder calorífico, punto nube y número de cetano) se puede observar que siguen una tendencia lineal que depende de la cantidad de porcentaje de biodiesel o diesel. Por lo tanto, se puede decir que si se conoce el valor de las propiedades de ambos combustibles en estado puro, el de la mezcla se puede hallar con una regla de tres [ref. 3.28].

La tabla 3.8 muestra el valor de las propiedades de los combustibles en estado puro que se obtuvieron a partir de la investigación realizada por los investigadores de las universidades ya mencionadas.

Tabla 3.8: Propiedades del Diesel y Biodiesel [ref. 3.29]

Propiedades	Unidades	Diesel N°2	Biodiesel de Palma
Densidad a 25°C	kg/m ³	853.97	864.42
Viscosidad Cinemática a 40°C	mm ² /s	4.33	4.71
Poder Calorífico	MJ/kg	45.273	39.837
Punto Nube	°C	-5	16
Índice de Cetano		46.3	57.3

Elaboración Propia

3.3 Efecto de las Mezclas BX en el Desempeño de un MEC

Como ya se vio dentro de este capítulo anteriormente, algunas características del biodiesel cambian con respecto al diesel N°2 que se consume normalmente, es por eso que se han desarrollado distintas investigaciones, las cuales han arrojado varias conclusiones que en algunos casos se contradicen.

Se muestra un estudio realizado por científicos de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad de Maribor [ref. 3.30], donde se hizo pruebas y simulaciones a diferentes cargas a un motor de bus con sistema M alimentado con diesel 2 y biodiesel de aceite de canola (tiene propiedades físicas parecidas al biodiesel de palma). Los resultados se muestran en la figura 3.6.

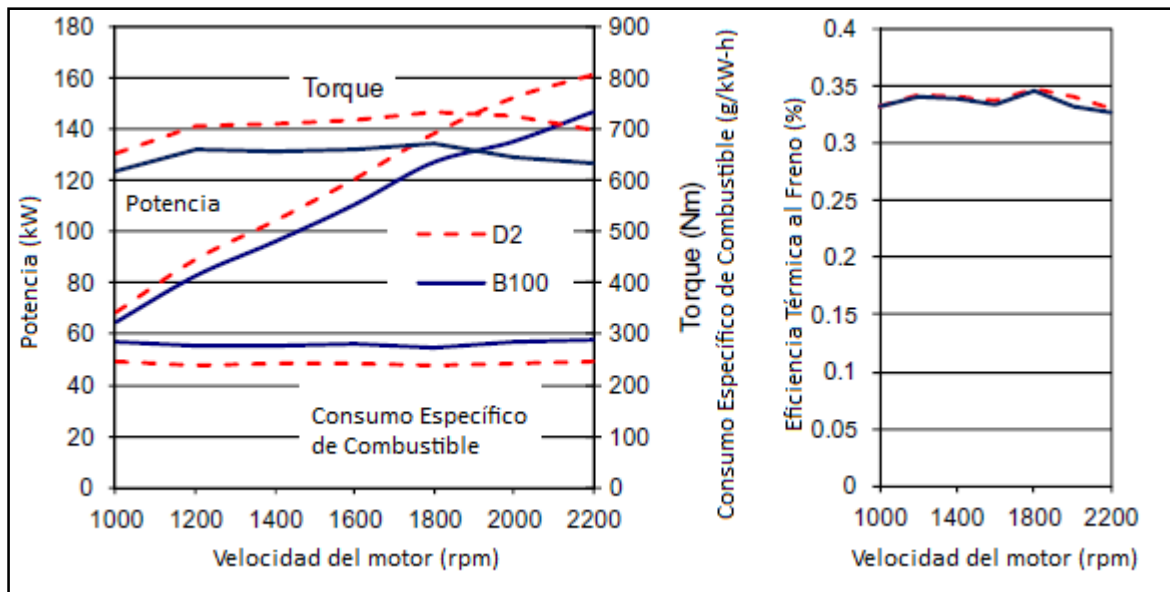


Figura 3.6: Potencia, Torque, Eficiencia y Consumo Específico de Combustible con D2 y Biodiesel de Canola [ref. 3.31].

Tanto la potencia como el torque disminuyen un 10% cuando se cambia a biodiesel. La eficiencia también disminuye, pero esto se refleja a cargas más altas. La pérdida de potencia y torque se puede explicar por el menor poder calorífico que tiene el biodiesel cuando es comparado con el diesel, el mayor consumo de combustible se debe a que la densidad del biodiesel es mayor, acompañado también por la pérdida de eficiencia que muestra el estudio para regímenes de giro altos, que haría que el consumo específico de combustible sea aún mayor.

En otro experimento realizado por científicos de la Universidad Tecnológica de Malasia probaron un motor encendido por compresión a diferentes velocidades y compararon las potencias de los combustibles diesel tres mezclas BX con biodiesel de palma (B2, B5 y B10.)

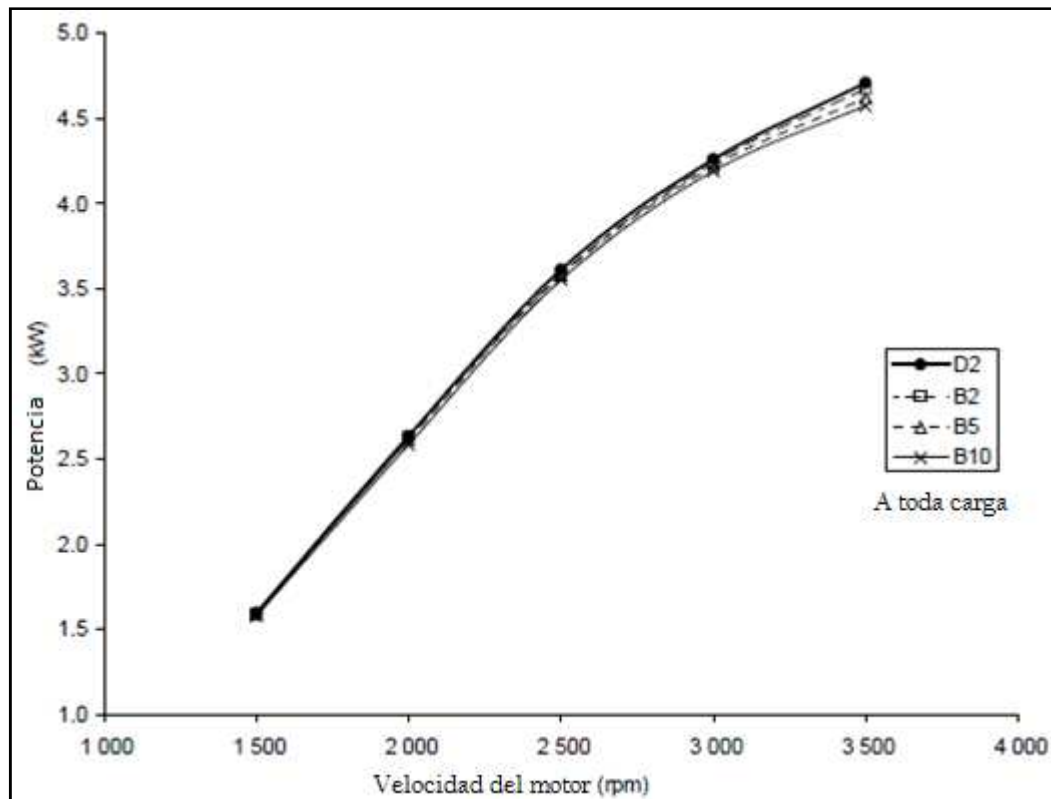


Figura 3.7: Potencia desarrollada por un motor con mezclas BX a diferentes cargas. [ref. 3.32].

En este experimento, elaborado con un motor de un cilindro, se puede notar similitudes con los resultados del gráfico anterior. En los dos gráficos se puede ver que para bajas cargas todos los combustibles desarrollan una potencia parecida en los cuatro casos. La diferencia se hace más notoria cuando la carga aumenta donde el diesel desarrolla más potencia que cualquiera de las mezclas BX. A bajas velocidades la diferencia entre el diesel y las mezclas biodiesel está en el rango del 0.4% y 3.7%, mientras que a altas velocidades ese rango aumenta y está entre 4.14% y 13.35%.

Los gráficos de los experimentos mostrados son solo dos de muchos que se han realizado. Por ese motivo, para tener una idea de los consensos a los que las comunidades científicas llegan respecto al efecto que tienen los combustibles biodiesel en la performance de un motor encendido por compresión, investigadores de la Universidad Castilla-La Mancha colectaron varios documentos científicos y resumieron los resultados en los que la mayoría de especialistas en temas de diesel y biodiesel concuerda. En el artículo, dentro de muchos temas, se habla del efecto del biodiesel

en la potencia, eficiencia térmica y consumo específico de combustible. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en el artículo con respecto a la performance del motor (los resultados son porcentuales).

Tabla 3.9: Comparación Porcentual de Conclusiones Respecto al Efecto del Biodiesel en el Motor [ref. 3.33]

Característica	Aumenta	Igual	Disminuye	Sinergia
Potencia	0	2	96	2
Eficiencia Térmica	8	80	4	8
Consumo Específico de Combustible	98	2	0	0

Elaboración Propia

Potencia

En la tabla 3.9 se observa que existe casi un consenso en los artículos especializados en que la potencia disminuye cuando se utiliza biodiesel como combustible en reemplazo del diesel. La explicación de esta pérdida de potencia es el menor poder calorífico. En los vehículos, los usuarios no suelen darse cuenta porque el acelerador es pisado de acuerdo al requerimiento de potencia, pero cuando se necesita desarrollar la mayor potencia del motor esta se verá limitada por el menor poder calorífico del biodiesel. Otro factor que también afecta el desempeño del motor es la mayor dificultad que tiene el biodiesel para ser atomizado a comparación del diesel.

La mayor densidad del biodiesel permite que entre más masa dentro del cilindro, lo que ayuda a recuperar la pérdida de potencia respecto al menor poder calorífico.

La mayor viscosidad también aumenta la cantidad de flujo y masa de combustible inyectado, ya que disminuye las pérdidas por contra flujo debido a los espacios libres en el pistón. La masa y flujo podrían aumentar entre 1.2-3.2% [ref. 3.34].

Las pérdidas de potencia debido al retraso de la chispa para mantener bajas las presiones y temperaturas dentro del pistón se compensan por el mayor número de cetano del biodiesel. El B100 tiene mayor módulo de elasticidad, por esto la reacción

del fluido ante el empuje de la bomba es más rápida, lo que permite que se adelante el inicio de la combustión porque el combustible comienza a inyectarse antes.

Hay menores pérdidas por rozamiento porque tiene más lubricidad que el diesel.

En total se espera una pérdida de potencia en el orden del 8 a 10% [ref. 3.35].

Eficiencia Térmica

La mayoría de estudios concluye que no existe variación en la eficiencia térmica según los resultados que constan en la tabla 3.9. Esto quiere decir que al rendimiento del motor con biodiesel no se vería afectado independientemente de donde provenga el biodiesel, longitud de la cadena o de dobles enlaces en su composición química.

Otros resultados dicen que la eficiencia térmica mejora debido a la mayor viscosidad y lubricidad del B100, es decir, la eficiencia de combustión no aumenta, pero si las pérdidas por bombeo y rozamiento disminuyen, lo que mejora la eficiencia térmica.

Consumo Específico de Combustible

Se espera que se consuma más combustible para compensar el menor poder calorífico del B100. Según un estudio realizado por la EPA (The United States Environmental Protection Agency) el incremento de consumo específico de combustible con respecto al diesel se puede calcular por la siguiente ecuación [ref. 3.36].

$$\Delta sfc = \frac{sfc_{\%BX}}{sfc_{D2}} = e^{0.0008189\%B} \quad (3.3)$$

Según el estudio, cuando se utiliza B100 se consumiría casi un 9% más de combustible. Este resultado evidencia una mejora en la eficiencia porque el consumo aumenta en mayor proporción que la diferencia de poder calorífico entre el B100 y D2.

Según otros estudios como el realizado por el Southwest Research Institute (USA) el aumento de combustible es proporcional al menor valor poder calorífico del biodiesel, por lo tanto, se debería consumir aproximadamente 14% con el poder calorífico de la palma aceitera o 13% más con la soya.

3.3.1 Cálculo de la Variación de Potencia, Eficiencia Térmica y Consumo Específico de Combustible para Diferentes Mezclas BX

Para poder hacer una comparación entre los motores que utilizan distintas mezclas BX cuando funcionan a distintas alturas se necesita saber cómo varían los parámetros de funcionamiento como potencia, eficiencia térmica y consumo específico de combustible. En base a la ecuación 3.3 de aumento de consumo de combustible desarrollada por la EPA y a las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1, se realiza un ejemplo de cálculo para determinar cómo afectan las mezclas BX al funcionamiento de un motor de encendido por compresión. En el ejemplo se utilizan los datos obtenidos para el combustible B100 de palma aceitera.

$$\Delta sfc = \frac{sfc_{\%BX}}{sfc_{D2}} = e^{0.0008189 \cdot 100\%} \quad (3.3a)$$

$$\Delta sfc = 8.53\% \quad (3.3b)$$

El consumo de combustible aumenta en 8.53% para el biodiesel puro.

Para calcular la eficiencia térmica, se utiliza la ecuación 3.4 mencionada en el capítulo 1 [ref. 3.37].

$$\eta_f = \frac{1}{sfc \cdot Q_{hv}} \quad (3.4)$$

Se reemplaza el valor en porcentaje del aumento de consumo específico de combustible y la variación porcentual de poder calorífico ($Q_{hv.diesel} = \frac{45.273MJ}{kg}$ y $Q_{hv.biodiesel} = \frac{39.837MJ}{kg}$; según tabla 3.8.)

Reemplazando:

$$\eta_f = \frac{1}{108.53\% \cdot 87.99\%} = 104.72\% \quad (3.4a)$$

$$\eta_f = 104.72\% \quad (3.4b)$$

Por lo tanto, la eficiencia aumenta 4.72%.

El siguiente paso es hallar la variación de potencia de acuerdo al combustible con la ecuación 3.35 mencionada en el capítulo 1 [ref. 3.38].

$$P = \frac{\eta_f \eta_{v0} X^N Q_{HV} m_c}{2} \quad (3.5)$$

Como hay valores que son constantes se simplifica la ecuación.

$$\Delta P = \eta_f Q_{HV} \Delta m_c \quad (3.5a)$$

Se simplificaron todos los parámetros que dependían del motor, eficiencia volumétrica y densidad del aire porque el cálculo es a nivel del mar. Se considera la variación de masa porque los combustibles tienen densidades distintas ($\rho_{B100} = 864.42$ y $\rho_{D2} = 853.97$; según tabla 3.8); también se toma en cuenta la variación del poder calorífico de los combustibles ($Q_{hv.diesel} = \frac{45.273MJ}{kg}$ y $Q_{hv.biodiesel} = \frac{39.837MJ}{kg}$; según tabla 3.8); y la

eficiencia térmica hallada en el cálculo 3.34b. Como se mencionó antes, la densidad y poder calorífico se pueden calcular con una regla de tres.

Se reemplaza en la ecuación 3.5a.

$$\Delta P = 104.72\% * 87.99\% * 101.22\% \quad (3.5b)$$

$$\Delta P = 93.26\% \quad (3.5c)$$

La pérdida de potencia por utilizar B100 es de 6.74%.

Es necesario ajustar los cálculos de consumo específico de combustible ($\frac{\text{masa}}{\text{potencia*hora}}$) a la realidad del consumidor, por eso es preferible dar los resultados en consumo volumétrico de combustible ($\frac{\text{m}^3}{\text{potencia*hora}}$), para eso, el resultado obtenido en el cálculo 3.3b se tiene que dividir entre la variación de la densidad del biodiesel con respecto al diesel como se muestra en la ecuación 3.6.

$$\Delta C_{vol} = \frac{\Delta sfc}{\rho_{B100/D2}} \quad (3.6)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 3.6.

$$\Delta C_{vol} = \frac{108.53\%}{101.22\%} \quad (3.6a)$$

$$\Delta C_{vol} = 107.22\% \quad (3.6b)$$

El consumo volumétrico de combustible es 7.2% mayor con biodiesel que con diesel 2. El valor volumétrico disminuye a comparación del específico porque la densidad del biodiesel es mayor que la del diesel.

3.3.2 Resultados para Diferentes Mezclas BX

A continuación se muestra mediante gráficos y tablas los resultados obtenidos de los cálculos de consumo específico de combustible, eficiencia y potencia para las mezclas D2 (B0), B5, B20 y B100.

Tabla 3.10: Aumento de Consumo Específico de Combustible con Biodiesel con Respecto al Diesel

Biodiesel (%)	Aumento de Consumo (%)
0	0
5	0.41
20	1.65
100	8.53

Elaboración Propia

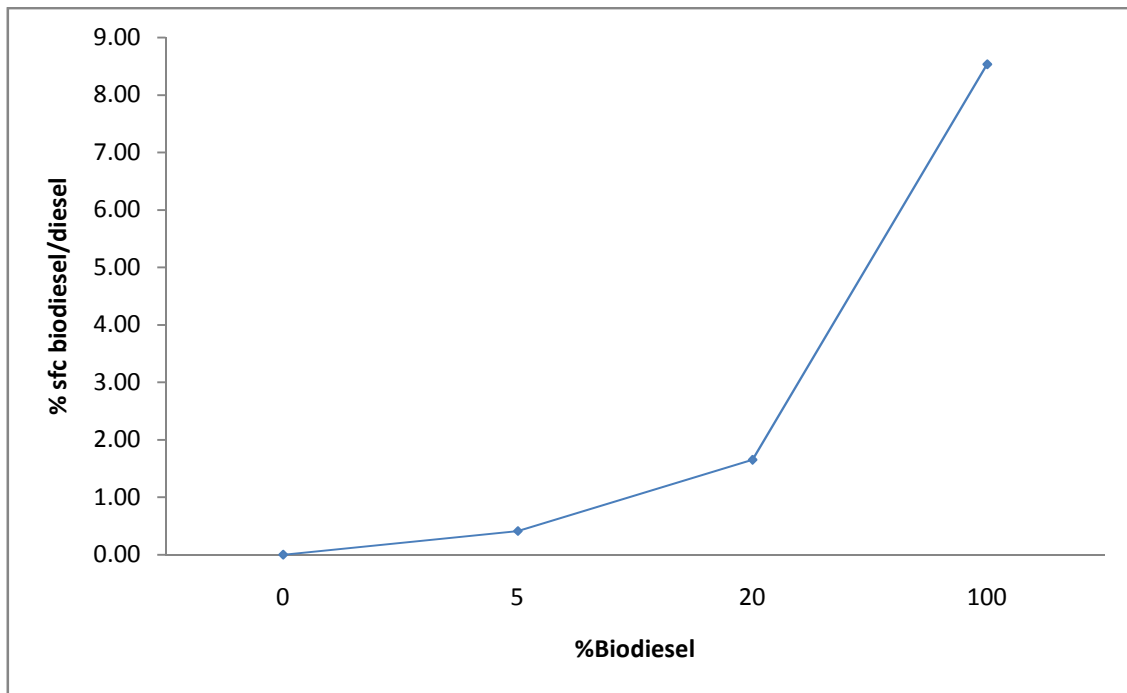


Figura 3.9: Aumento de Consumo Específico de Combustible con Biodiesel con Respecto al Diesel [ref. 3.39]

Como se dijo antes el incremento en el consumo del diesel se da por la disminución del poder calorífico, es necesario inyectar más combustible al motor para poder alcanzar los niveles de potencia que tiene el diesel. En el Perú, con la Mezcla B5, el aumento de consumo de combustible será de 0.41%.

Tabla 3.11: Porcentaje de Eficiencia de un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

Biodiesel (%)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Eficiencia (%)
0	45.273	100
5	45.001	100.19
20	44.186	100.8
100	39.837	104.71

Elaboración Propia

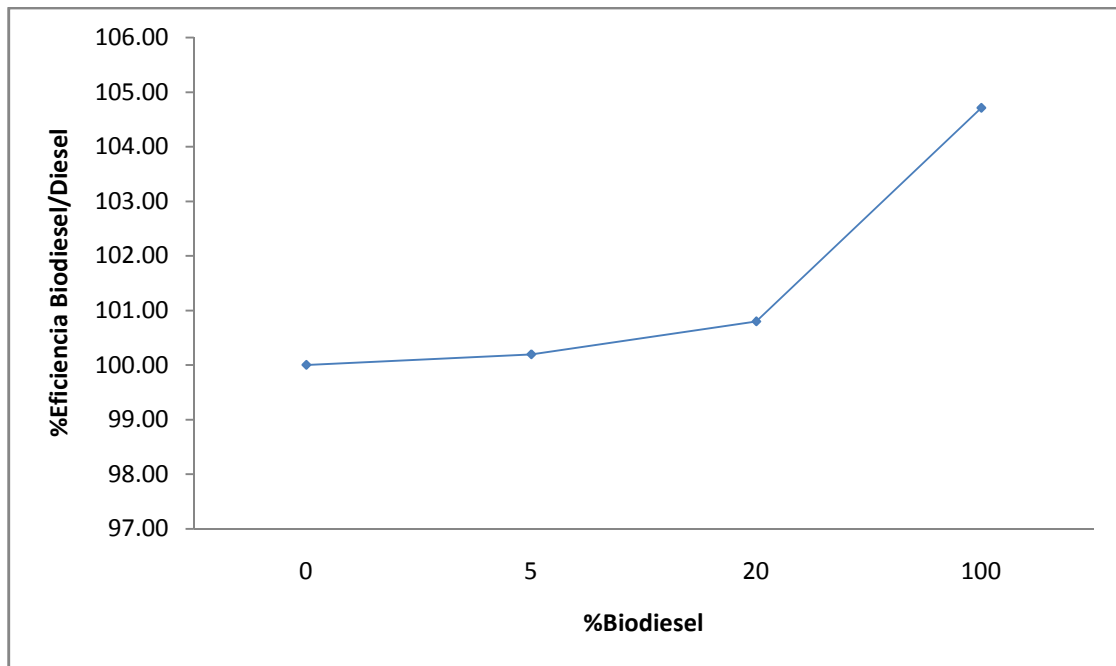


Figura 3.10: Porcentaje de Eficiencia de un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

La eficiencia de la combustión del motor se mantiene según las conclusiones realizadas por varios especialistas en el tema. Lo que en realidad aumenta es la eficiencia del ciclo ya que hay menos pérdidas durante el bombeo y contra flujo dentro de la cámara. Es por eso, que la ecuación desarrollada por la EPA considera que el aumento en el consumo específico de combustible es menor a la variación de poderes caloríficos, entonces, eso quiere decir, que existe un aumento en la eficiencia que alcanza, para el B100, un 4.71%. Para la situación peruana, que utiliza combustible B5, dicho aumento de eficiencia es aproximadamente un 0.19%.

Tabla 3.11: Porcentaje de Potencia Desarrollada por un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

Biodiesel (%)	Densidad (kg/m ³)	Potencia (%)
0	853.97	100
5	854.49	99.65
20	856.06	98.62
100	864.42	93.26

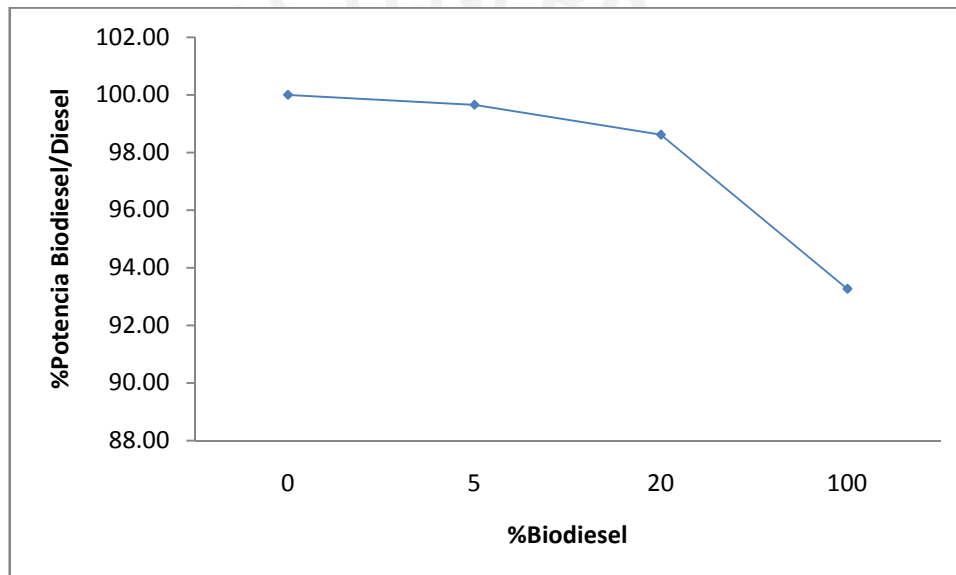


Figura 3.11: Porcentaje de Potencia Desarrollada por un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

La potencia cuando un motor funciona con B100 presenta una disminución de su valor nominal de casi 7% y para B5 de 0.45%. Para un motor que funciona en el Perú dicho cambio de potencia es casi imperceptible, es verdad que el motor no desarrolla su valor nominal, pero la pérdida es tan pequeña que no es considerable.

Tabla 3.12: Porcentaje de Consumo Volumétrico Combustible de un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

Biodiesel (%)	Densidad (kg/m ³)	% Consumo Volumétrico
0	853.97	100
5	854.49	100.35
20	856.06	101.4
100	864.42	107.22

Elaboración Propia

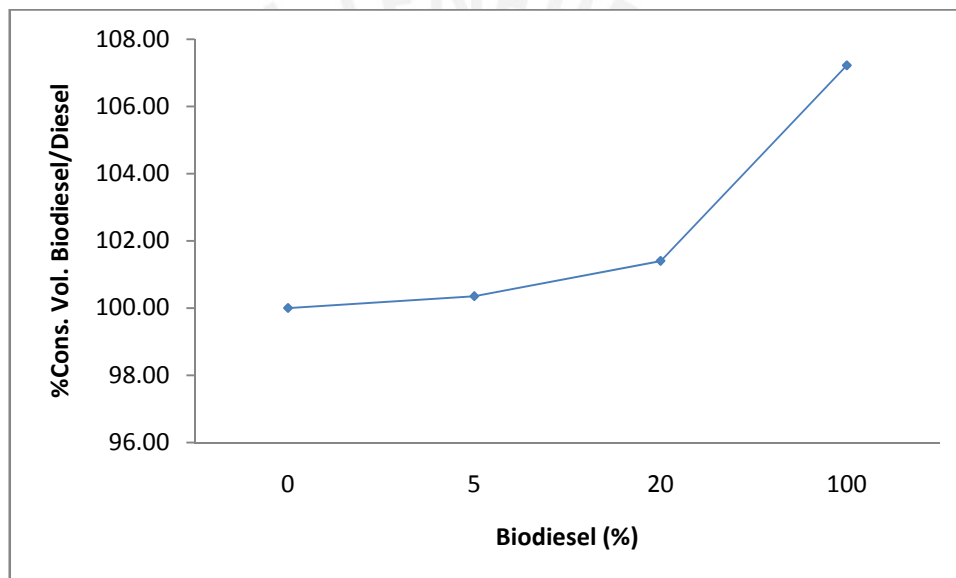


Figura 3.12: Porcentaje de Consumo Volumétrico Combustible de un Motor con Biodiesel con Respecto al Diesel

Elaboración Propia

El consumo volumétrico es el que más interesa a las personas porque los combustibles se venden por unidad volumétrica, por lo tanto, es importante saber cuántos galones consume un motor con mezclas BX de más a comparación del mismo cuando funcionaba con D2.

Si bien el consumo volumétrico es menor que el consumo específico para las distintas mezclas de BX, de todas maneras es necesario inyectar más mezcla BX al motor de lo que se haría con D2 para desarrollar una misma potencia.

En un caso ideal, si producir B5 y D2 costara lo mismo y no existiría la inflación, el costo que el usuario en el Perú tendría que pagar sería 0.35% más de lo que haría si su vehículo utilizaría D2 porque el consumo volumétrico de B5 es 0.35% más que con D2.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ref. 3.1] INDECOPI. *NTP 321.125:2008, BIOCOMBUSTIBLES Biodiesel: Especificaciones*, 2008. p. 12.
- [ref. 3.2] INDECOPI. *NTP 321.003:2005, PETROLEO Y DERIVADOS Diesel: Especificaciones*, 2005. p. 17.
- [ref. 3.3] INDECOPI. *NTP 321.125:2008, BIOCOMBUSTIBLES Biodiesel: Especificaciones*, 2008. p. 17.
- [ref. 3.4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM 7467. Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20)*, 2010. p. 3.
- [ref. 3.5] BENJUMEA, Pedro. AGUDELO, John. *Basic Properties of Palm Oil Biodiesel-Diesel Blends*, 2007. p. 2.
- [ref. 3.6] INDECOPI. *NTP 321.003:2005, PETROLEO Y DERIVADOS Diesel: Especificaciones*, 2005. p. 17
- [ref. 3.7] INDECOPI. *NTP 321.125:2008, BIOCOMBUSTIBLES Biodiesel: Especificaciones*, 2008. p. 17.
- [ref. 3.8] EUROPEAN STANDARD. *EN 14214:2003. AUTOMOTIVE FUELS - FATTY ACID METHYL ESTERS (FAME) FOR DIESEL ENGINES - REQUIREMENTS AND TEST METHODS*, 2003. p. 5.
- [ref. 3.9] *Ibidem*.
- [ref. 3.10] HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals, Edicion 2, Nueva York, McGraw-Hill Science/Engineering/Math*, 1998. p. 506.
- [ref. 3.11] INDECOPI. *NTP 321.003:2005, PETROLEO Y DERIVADOS Diesel: Especificaciones*, 2005. p. 17
- [ref. 3.12] EUROPEAN STANDARD. *EN 14214:2003. AUTOMOTIVE FUELS - FATTY ACID METHYL ESTERS (FAME) FOR DIESEL ENGINES - REQUIREMENTS AND TEST METHODS*, 2003. p. 10.
- [ref. 3.13] *Ibidem*.
- [ref. 3.14] INDECOPI. *NTP 321.125:2008. BIOCOMBUSTIBLES Biodiesel. Especificaciones*, 2008. p. 20.
- [ref. 3.15] EUROPEAN STANDARD, op.cit. p.7.
- [ref. 3.16] *Ibidem*.
- [ref. 3.17] *Idem*, p.8.

- [ref. 3.18] Ibídem.
- [ref. 3.20] BENJUMEA, op.cit. p.3.
- [ref. 3.21] Idem, p.4.
- [ref. 3.22] Ibídem.
- [ref. 3.23] Ibídem.
- [ref. 3.24] Ibídem.
- [ref. 3.25] Idem, p.5.
- [ref. 3.26] Ibídem.
- [ref. 3.27] Ibídem.
- [ref. 3.28] Ibídem.
- [ref. 3.29] BENJUMEA, op.cit. p.3.
- [ref. 3.30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, loc.cit.
- [ref. 3.31] KEGL, Breda. *Influence of Biodiesel Engine Combustion and Emission Characteristics*, 2010. p.5.
- [ref. 3.32] SIVASANKARAN. JAIN. *Performance of Diesel Engines at High Altitudes*, 1998 p.9.
- [ref. 3.33] LAPUERTA, Pedro. ARMAS, Octavio. *Effect of Biodiesel on Engine Emissions*, 2007. p. 4.
- [ref. 3.34] Ibídem.
- [ref. 3.35] Ibídem.
- [ref. 3.36] Idem, p. 6.
- [ref. 3.37] HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals, Edición 2, Nueva York, McGraw-Hill Science/Engineering/Math*, 1998. p.52.
- [ref. 3.38] Idem, p.57.
- [ref. 3.39] LAPUERTA, op.cit. p.6.

CAPÍTULO 4: EFECTO DE LA ALTITUD Y MEZCLAS BX EN EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

En los capítulos anteriores se explicó cuáles son los factores por los que un motor de combustión interna cambia su potencia, eficiencia y consumo de combustible cuando funciona a distintas altitudes sobre el nivel del mar y cuando utiliza un combustible con distintos porcentajes de biodiesel. Así mismo se realizaron cálculos, basados en factores de corrección y estudios hechos por especialistas en el tema, con los que se intentó estimar la variación de la performance del motor en base al cambio de altura y tipo de combustible.

Lo que se intenta hacer en este capítulo es unir los resultados previos y explicar lo que ocurre con el rendimiento del motor cuando se unen ambos efectos: cambio de altura y combustible (mezclas BX.) Como se explicó antes la importancia de estos resultados radica en el hecho de que el Perú como país que busca un desarrollo sostenido, intenta encontrar fuentes de energías renovables (biodiesel) que contaminen menos el medio ambiente sin encarecer el precio final. Debido a las características geográficas del Perú, un vehículo o un motor industrial pueden funcionar en zonas que se encuentran a más de 4000 metros sobre el nivel del mar. Ambas características hacen hincapié a la importancia de un estudio que permita calcular la potencia de un motor y consumo del mismo, ya que, a raíz de esto, se pueden elaborar estudios técnicos, abastecimiento y adquisiciones con un menor grado de riesgo.

En el siguiente capítulo se van a tomar los resultados obtenidos de los capítulos anteriores para elaborar una hoja de cálculo sobre la variación del rendimiento de un motor que sufre el efecto de la altitud y el uso de mezclas BX. Se explica cómo afectan el cambio de estas condiciones iniciales en conjunto al motor y, finalmente, se elabora un cálculo con los datos de placa de un motor real para ejemplificar cómo se puede utilizar los datos porcentuales obtenidos a lo largo del estudio

4.1 Cálculo de la Variación de Potencia, Eficiencia Térmica y Consumo Específico de Combustible para Diferentes Altitudes y Mezclas BX

Para realizar el ejemplo de cálculo en el que se pueda hallar el efecto de la altitud y las mezclas BX en los motores de encendidos por compresión se tomaran los resultados hallados en el ejemplo de cálculos de los capítulos 2 y 3.

Los resultados obtenidos en el capítulo 2 se dieron para una condición de 2500 metros sobre el nivel del mar, independientemente del combustible utilizado.

$$\Delta P = 71.0\% \quad (4.1)$$

$$\Delta \eta_f = 74.0\% \quad (4.2)$$

$$\Delta scf = 127.4\% \quad (4.3)$$

Los resultados obtenidos en el capítulo 3 se dieron para un combustible B100, independientemente de la altura a la que el motor es analizado.

$$\Delta P = 93.26\% \quad (4.4)$$

$$\Delta \eta_f = 104.72\% \quad (4.5)$$

$$\Delta scf = 108.53\% \quad (4.6)$$

$$\Delta C_{vol} = 107.22\% \quad (4.7)$$

Para diferentes altitudes no se halló el consumo volumétrico porque hasta momento no se había introducido el efecto del combustible en la investigación.

Lo que se necesita saber es como ambos factores influyen en el desarrollo de la potencia, eficiencia y consumo de combustible en un motor. Para esto se analiza los cálculos realizados para llegar a esos resultados.

Potencia

Los cálculos para hallar la variación de potencia en altitud y con mezclas BX fueron afrontados de manera distinta.

- En el caso de cambio de altitud se utilizó factores de corrección, ecuaciones que dependen de la presión y temperatura atmosféricas (ecuación 4.8); clasificación del motor de acuerdo al ciclo y diseño, si es ciclo Otto, ciclo Diesel y consideraciones de diseño (cámara de combustión tipo M, si tiene cámara de pre-mezcla, etc.); otro factor a tomar en cuenta es si el motor es súper-cargado, turbo-cargado o de aspiración natural [ref. 4.1].

$$\Delta P = \left(\frac{p}{p_0}\right)^1 \left(\frac{T_0}{T}\right)^{-0.7} \quad (4.8)$$

Todas estas suposiciones fueron hechas para saber cómo iba a afectar la falta de presión y densidad al ciclo termodinámico.

- Para hallar el cambio de la potencia en base al cambio de mezclas BX primero se calculó el aumento de consumo de combustible en base a la ecuación 4.9 obtenida de investigaciones empíricas realizadas por la EPA, luego, se calculó la eficiencia en el ciclo y, por último, el cambio de la potencia con la ecuación 4.10 [ref. 4.2].

$$\Delta sfc = \frac{sfc_{\%BX}}{sfc_{D2}} = e^{0.0008189\%B} \quad (4.9)$$

$$P = \frac{\eta_f \eta_{v0} X^N Q_{HV} m_c}{2} \quad (4.10)$$

En la fórmula utilizada para el cambio de potencia por cambio de combustible se consideran constantes todos los factores que dependen de las condiciones atmosféricas, como eficiencia volumétrica, densidad del aire y tasa de aire inyectado en el motor.

En base a la explicación anterior se demuestra que ambos cálculos son independientes el uno del otro, es decir, que las suposiciones que se hizo para un cálculo no afecta al otro y viceversa y, así mismo, que los factores que variaron no son los mismo para uno y para el otro. Si se evalúan como dos eventos independientes, entonces, ambos se pueden sumar para hallar el efecto total en la potencia desarrollada por el motor, por lo que el efecto total en la potencia se puede hallar de la siguiente manera.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{Altura} * \Delta P_{BX} \quad (4.11)$$

$$\Delta P_{total} = 71\% * 93.26\% \quad (4.11a)$$

$$\Delta P_{total} = 66.21\% \quad (4.11b)$$

El efecto de utilizar combustible B100 a 2500 metros sobre el nivel del mar va a limitar al motor a desarrollar el 66.21% de su potencia nominal.

Eficiencia

Para hallar la variación en la eficiencia por efecto de la altitud y cambio de combustible se afrontó de maneras distintas los cálculos.

- En el caso de la altitud, una vez ya obtenida la potencia se calcula la eficiencia con la fórmula 4.12 mencionada en el capítulo 1.

$$P = \frac{\eta_f \eta_{v0} X^N Q_{HV} m_c}{2} \quad (4.12)$$

Se asumen constantes todas las variables que no dependan de factores atmosféricos, por lo tanto, se considera en el cálculo la eficiencia volumétrica, densidad del aire y consumo de combustible.

- En el caso del cambio de combustible, se calcula la eficiencia una vez ya calculada el consumo de combustible con la ecuación 4.13 vista en el capítulo 1 [ref. 4.3].

$$\Delta \eta_f = \frac{1}{sfc * Q_{hv}} \quad (4.13)$$

Solamente se consideran en el cálculo factores que dependan del combustible. El cálculo de consumo de combustible fue hecho en laboratorios bajo las mismas condiciones atmosféricas, por lo tanto, no depende de la altitud. En la fórmula mostrada solo hay dos variables, consumo de combustible y poder calorífico, para este caso, ambas independientes completamente de condiciones atmosféricas. Por lo tanto se puede hallar la variación de la eficiencia siguiendo el mismo método que para la potencia.

$$\Delta \eta_{f_{total}} = \Delta \eta_{f_{Altura}} * \Delta \eta_{f_{BX}} \quad (4.14)$$

$$\Delta \eta_{f_{total}} = 74\% * 104.72\% \quad (4.14a)$$

$$\Delta \eta_{f_{total}} = 77.49\% \quad (4.14b)$$

Consumo Específico de Combustible

Para hallar la variación de consumo de combustible por efecto de la altitud y cambio de combustible se realizaron dos métodos de cálculo distintos.

- En el caso de la altitud, se calculó la potencia, después la eficiencia y por último el consumo de combustible con la ecuación 4.15.

$$\Delta sfc = \frac{1}{\eta_f * Q_{hv}} \quad (4.15)$$

En toda la secuencia se asumió constante todos los factores que dependen del combustible.

- Para hallar el mayor consumo de combustible con biodiesel se utilizó la ecuación 4.16 desarrollada por la EPA [ref. 4.4].

$$\Delta sfc = e^{0.0008189\%B} \quad (4.16)$$

La ecuación 4.16 fue desarrollada empíricamente con distintos tipos de biodiesel, en un laboratorio, por lo tanto el consumo no depende de las condiciones atmosféricas.

Como en ambos cálculos sus factores son independientes el uno del otro, se cuantifica el consumo específico de combustible de la siguiente manera.

$$\Delta sfc_{total} = \Delta sfc_{Altura} * \Delta sfc_{BX} \quad (4.17)$$

$$\Delta sfc_{total} = 127.4\% * 108.53\% \quad (4.17a)$$

$$\Delta sfc_{total} = 138.27\% \quad (4.17b)$$

El consumo específico de combustible para B100 a 2500 metros sobre el nivel del mar es 38.27% mayor que el de diesel 2 a nivel del mar.

Consumo Volumétrico de Combustible

El consumo volumétrico de combustible total se halla de la misma manera que el consumo específico. Sin embargo, no se realizó el cálculo para el consumo volumétrico en el caso de la altitud porque todavía no se introducía en la investigación las especificaciones de los combustibles.

El consumo volumétrico se calcula con la fórmula 4.18 presentada en el capítulo 3.

$$C_{vol} = \frac{\Delta s f c_{total}}{\rho_{B100/D2}} \quad (4.18)$$

Reemplazando con los datos ya obtenidos de consumo específico de combustible a 2500 metros y la densidad del B100.

$$C_{vol} = \frac{127.4\%}{101.22\%} \quad (4.18a)$$

$$C_{vol} = 125.86\% \quad (4.18b)$$

Para hallar el consumo volumétrico total se utiliza la fórmula 4.19.

$$\Delta C_{vol_{total}} = \Delta C_{vol_{Altura}} * \Delta C_{vol_{BX}} \quad (4.19)$$

$$\Delta C_{vol_{total}} = 107.22\% * 125.86\% \quad (4.19a)$$

$$\Delta C_{vol_{total}} = 134.95\%$$

(4.19b)

El consumo volumétrico con combustible B100 a 2500 metros de altura es de 34.95% más que con el diesel. Un poco menor comparado con el del consumo específico de combustible por la mayor densidad del biodiesel.

4.2 Resultados Obtenidos a Diferentes Altitudes y Mezclas BX

En base a los cálculos realizados, en las siguientes tablas y gráficos se muestran los resultados hallados de potencia, eficiencia, consumo específico y volumétrico de combustible para diferentes altitudes y mezclas BX.

Tabla 4.1: Potencia Desarrollada por un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX

Potencia				
Altura (m)	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	100.00%	99.65%	98.61%	93.26%
500	93.53%	93.21%	92.23%	87.23%
1000	87.45%	87.14%	86.24%	81.56%
1500	81.65%	81.36%	80.51%	76.15%
2000	76.12%	75.86%	75.07%	70.99%
2500	70.97%	70.72%	69.98%	66.18%
3000	66.15%	65.92%	65.23%	61.70%
3500	61.52%	61.31%	60.67%	57.38%
4000	57.24%	57.04%	56.45%	53.39%
4500	53.12%	52.93%	52.38%	49.54%

Elaboración Propia

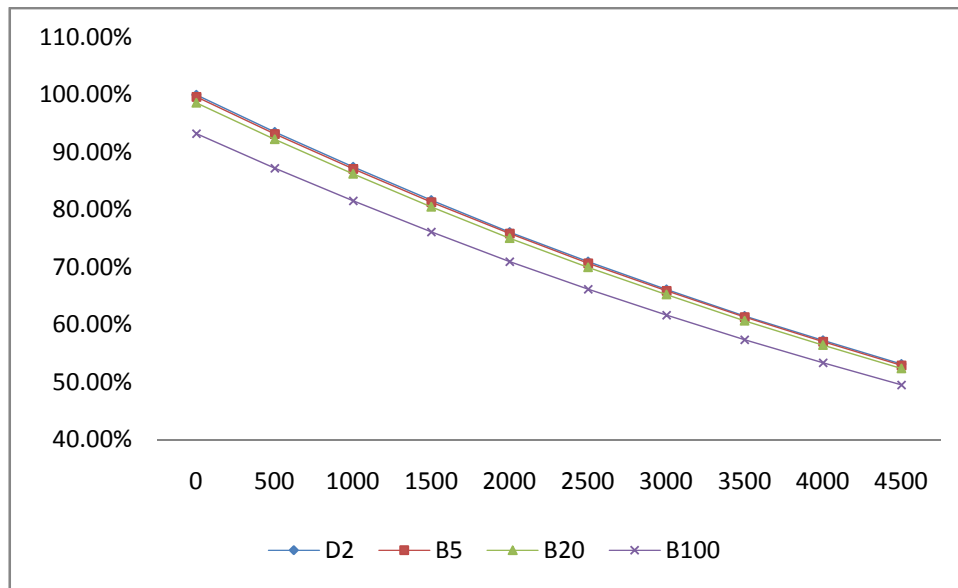


Figura 4.1: Potencia Desarrollada por un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

El aumento de la altitud y las mezclas BX contribuyen a que se desarrolle menos potencia en un MEC. Como ya se había explicado antes, en el caso de la altitud, la potencia es menor porque el proceso es menos eficiente debido a la menor presión dentro de todo el ciclo termodinámico por la menor cantidad de aire por unidad volumétrica dentro del cilindro, lo que provoca una menor concurrencia de colisiones de moléculas en el momento de la combustión. En el caso de las mezclas BX lo que disminuye notoriamente la potencia que entrega el motor es el menor poder calorífico, es decir, el combustible de por sí entrega menos energía al motor.

Si se quiere utilizar el motor en regímenes de potencias altas habrá problemas con la altitud y las mezclas con biodiesel porque no permiten que el motor llegue a su potencia nominal. En general, los factores que afectan el desarrollo de la potencia son la eficiencia de combustión por las menores: densidad del aire y presión; eficiencia volumétrica disminuida; y menor poder calorífico del combustible.

Tabla 4.2: Eficiencia Desarrollada por un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX

Altura (m)	Eficiencia			
	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	100.00%	100.19%	100.80%	104.71%
500	94.30%	94.48%	95.05%	98.74%
1000	88.90%	89.07%	89.61%	93.09%
1500	83.70%	83.86%	84.37%	87.64%
2000	78.70%	78.85%	79.33%	82.41%
2500	74.00%	74.14%	74.59%	77.49%
3000	69.60%	69.73%	70.16%	72.88%
3500	65.30%	65.42%	65.82%	68.38%
4000	61.30%	61.42%	61.79%	64.19%
4500	57.40%	57.51%	57.86%	60.10%

Elaboración Propia

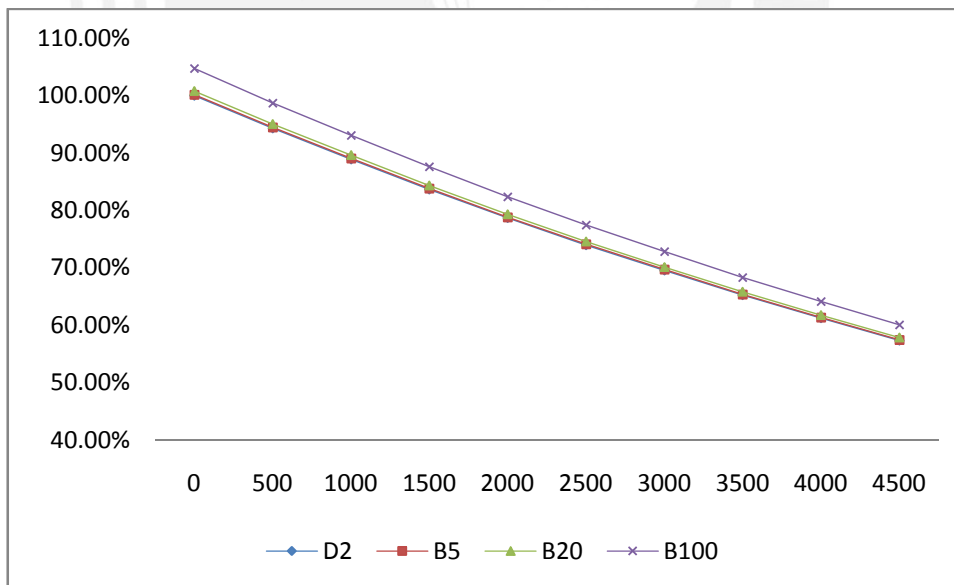


Figura 4.2: Eficiencia Desarrollada por un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Las mezclas BX no afectan negativamente la eficiencia en el motor a diferencia de la altitud, según los cálculos realizados ocurre todo lo contrario, la eficiencia se

incrementa en pequeños porcentajes a medida que se aumenta la cantidad de biodiesel en la mezcla por su mayor lubricidad y viscosidad a comparación del diesel. Si bien el biodiesel es más difícil de atomizarse, lo que disminuiría la eficiencia, este efecto se ve compensado con el alto número de cetano que facilitaría la auto-detonación dentro de la cámara. Ya se mencionó que por efecto de la altitud la potencia se ve disminuida porque la densidad y la presión del aire es menor en la altura. La pérdida de eficiencia por efecto de la altura es mayor que la ganancia que se obtiene con el biodiesel, es por eso que en el cálculo final cuando se unifican ambos efectos la eficiencia disminuye.

Tabla 4.3: Consumo Específico de Combustible de un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Consumo Específico de Combustible				
Altura (m)	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	100.00%	100.41%	101.40%	108.53%
500	106.04%	106.48%	107.53%	115.09%
1000	112.49%	112.95%	114.06%	122.08%
1500	119.47%	119.96%	121.15%	129.67%
2000	127.06%	127.59%	128.85%	137.90%
2500	135.14%	135.69%	137.03%	146.66%
3000	143.68%	144.27%	145.69%	155.93%
3500	153.14%	153.77%	155.29%	166.20%
4000	163.13%	163.80%	165.42%	177.05%
4500	174.22%	174.93%	176.66%	189.08%

Elaboración Propia

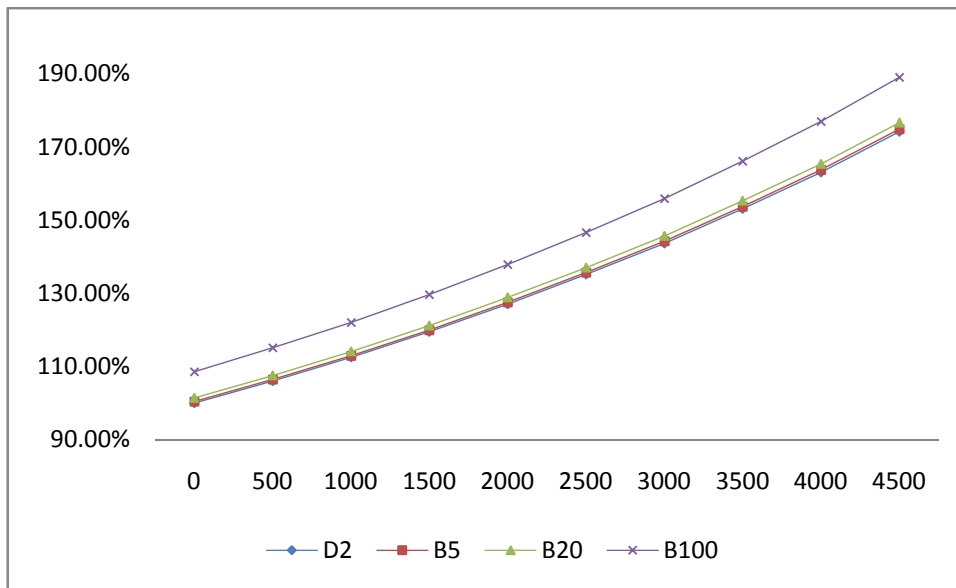


Figura 4.3: Consumo Específico de Combustible de un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

El consumo específico de combustible aumenta por efecto de la altura y las mezclas BX porque el MEC no puede llegar a niveles de potencia que desarrollaría a nivel del mar con diesel 2, es por eso que se tiene que inyectar más combustible para compensar los efectos de pérdida de potencia. En la altitud no se puede desarrollar la misma potencia porque se pierde eficiencia en la combustión a medida que se sube más, a diferencia del biodiesel que si bien tiene una mejor eficiencia el poder calorífico es mucho menor, entonces no le permite desarrollar al MEC la potencia que obtendría con diesel 2.

Tabla 4.4: Consumo Volumétrico de Combustible de un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Consumo Volumétrico de Combustible				
Altura (m)	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	100.00%	100.28%	101.15%	105.92%
500	106.04%	106.34%	107.27%	112.33%
1000	112.49%	112.80%	113.78%	119.15%
1500	119.47%	119.81%	120.85%	126.55%
2000	127.06%	127.42%	128.53%	134.59%
2500	135.14%	135.51%	136.69%	143.14%
3000	143.68%	144.08%	145.33%	152.19%
3500	153.14%	153.57%	154.90%	162.21%
4000	163.13%	163.59%	165.01%	172.80%
4500	174.22%	174.70%	176.22%	184.54%

Elaboración Propia

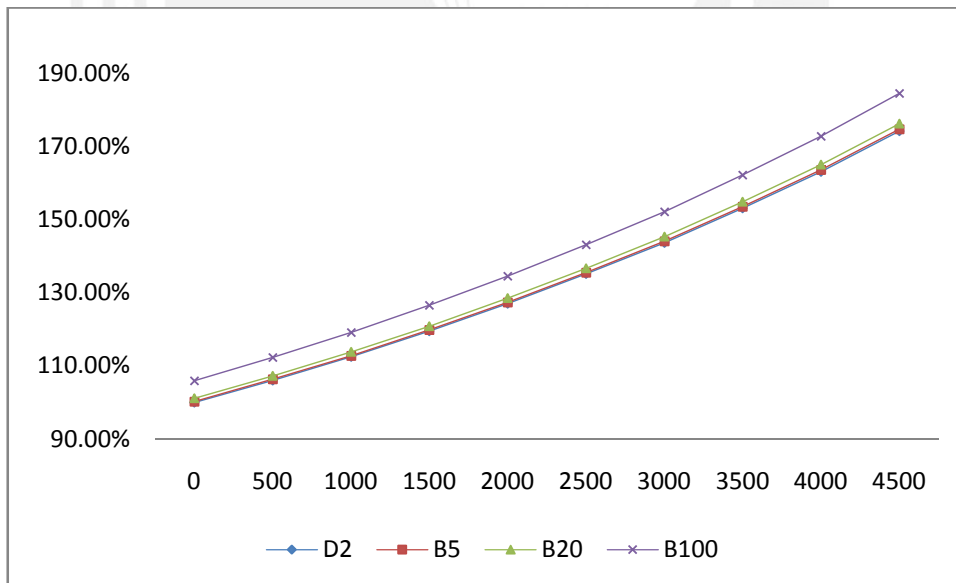


Figura 4.4: Consumo Volumétrico de Combustible de un MEC a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Se calcula el consumo volumétrico de combustible porque su abastecimiento se realiza por unidad volumétrica. El consumo volumétrico siempre es menor que el

consumo específico porque la densidad del biodiesel y sus mezclas es mayor que la del diesel 2, pero de todas maneras no es suficiente como para compensar el mayor consumo de combustible que se tiene con mezclas BX en altura.

4.3 Ejemplo con los Datos de Placa de un MEC Real

Se realiza un ejemplo de cálculo para explicar la utilidad de las tablas desarrolladas. Se tomará los datos de placa de un motor de encendido por compresión con aspiración natural de marca “Cummins”, modelo: DM6015 02.

El método de empleo de las tablas consiste en multiplicar el valor de los datos de placa del motor en cuestión por los valores calculados de las tablas dependiendo de la altura y mezcla BX que se desee hallar. De esta manera se puede obtener la potencia, eficiencia, consumo específico y volumétrico de combustible para un motor a diferentes alturas sobre el nivel del mar y con distintas mezclas BX como combustible.

Tabla 4.5: Datos de placa del motor [ref. 4.5]

Velocidad del motor (rpm)	Potencia (kW)	BSFC (g/kw-h)	Eficiencia (%)	Consumo Combustible (L/h)
1800	283.3	205.5	41.7	69.4

Elaboración Propia

Tabla 4.6: Resultados de Cálculo de Potencia para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX

Altura (m)	Potencia (kW)			
	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	283.3	282.31	279.36	264.21
500	264.98	264.05	261.29	247.12
1000	247.75	246.88	244.3	231.05
1500	231.31	230.5	228.1	215.72
2000	215.66	214.91	212.66	201.13
2500	201.05	200.35	198.26	187.5
3000	187.42	186.76	184.81	174.78
3500	174.3	173.69	171.88	162.55
4000	162.17	161.6	159.92	151.24
4500	150.49	149.96	148.4	140.35

Elaboración Propia

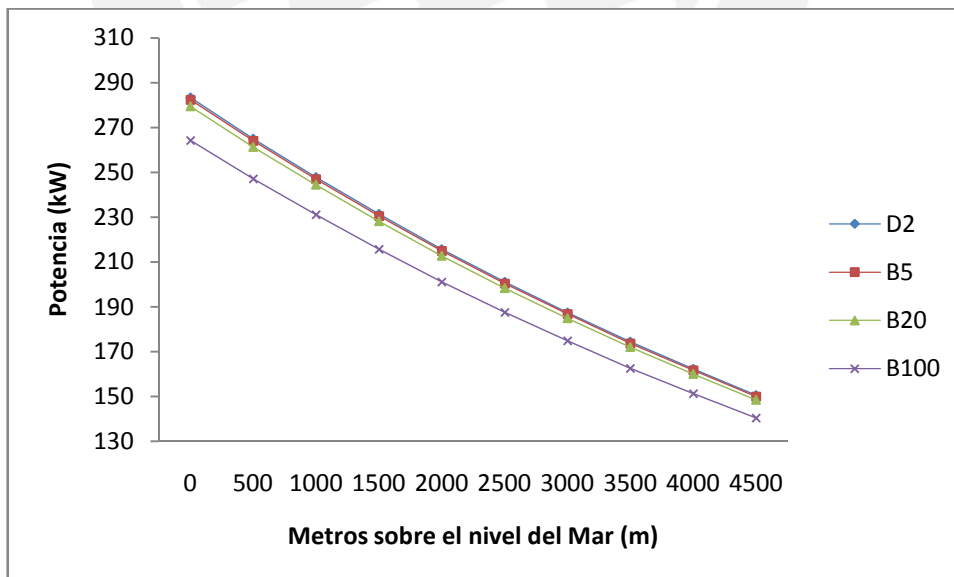


Figura 4.5: Resultados de Cálculo de Potencia para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Tabla 4.7: Resultados de Cálculo de Eficiencia para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX

Altura (m)	Eficiencia (%)			
	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	41.7	41.78	42.03	43.66
500	39.32	39.4	39.64	41.18
1000	37.07	37.14	37.37	38.82
1500	34.9	34.97	35.18	36.55
2000	32.82	32.88	33.08	34.36
2500	30.86	30.92	31.1	32.31
3000	29.02	29.08	29.26	30.39
3500	27.23	27.28	27.45	28.51
4000	25.56	25.61	25.77	26.77
4500	23.94	23.98	24.13	25.06

Elaboración Propia

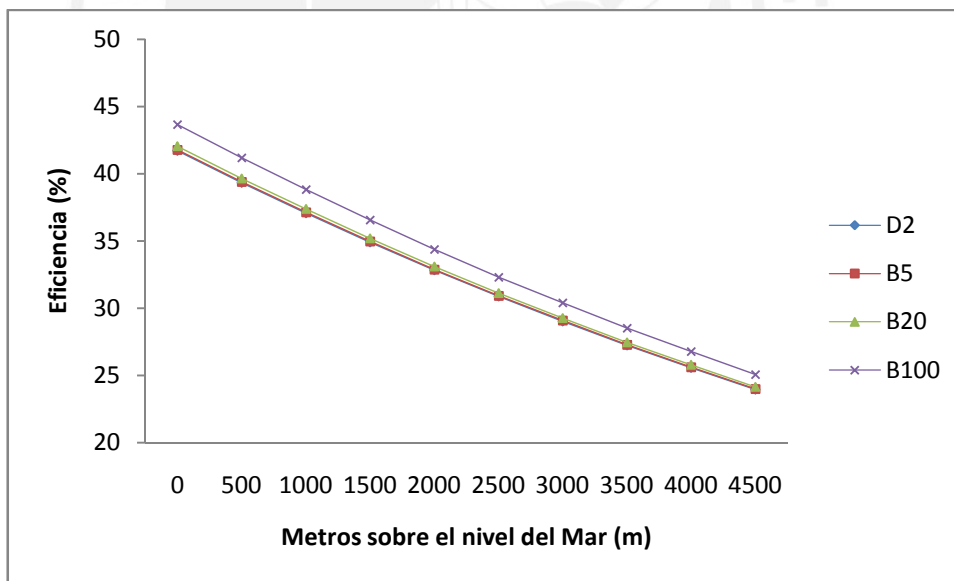


Figura 4.6: Resultados de Cálculo de Eficiencia para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Tabla 4.8: Resultados de Cálculo de Consumo Específico de Combustible para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Consumo Específico de Combustible (g/kW-hr)				
Altura (m)	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	205.5	206.34	208.38	223.03
500	217.92	218.82	220.98	236.51
1000	231.16	232.11	234.4	250.88
1500	245.52	246.53	248.96	266.46
2000	261.12	262.19	264.78	283.39
2500	277.7	278.84	281.6	301.39
3000	295.26	296.47	299.4	320.44
3500	314.7	315.99	319.11	341.55
4000	335.24	336.61	339.94	363.83
4500	358.01	359.48	363.03	388.55

Elaboración Propia

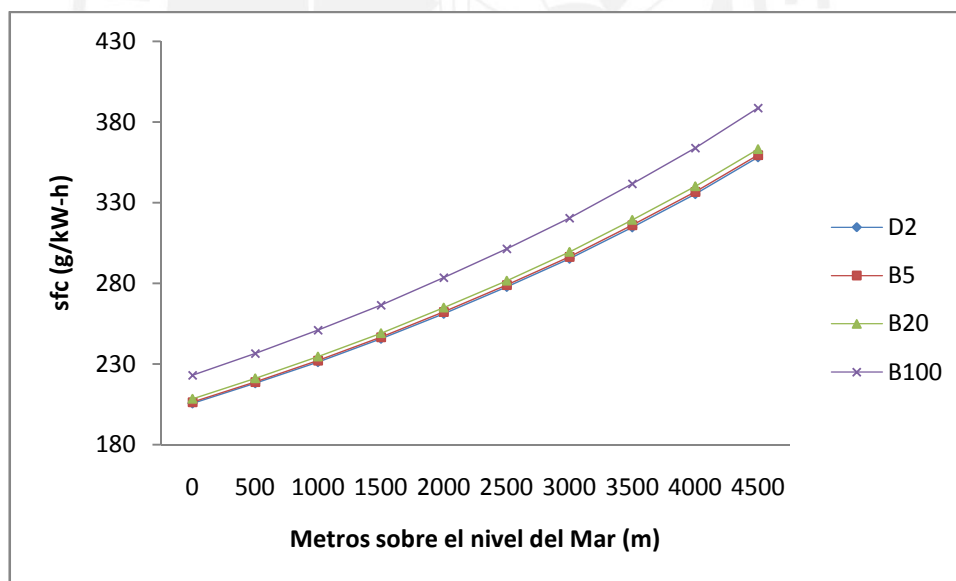


Figura 4.7: Resultados de Cálculo de Consumo Específico de Combustible para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Tabla 4.9: Resultados de Cálculo de Consumo Volumétrico de Combustible para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Consumo Volumétrico de Combustible (L/h)				
Altura (m)	Biodiesel (%)			
	0	5	20	100
0	69.4	69.59	70.2	73.51
500	73.59	73.8	74.44	77.95
1000	78.07	78.28	78.96	82.69
1500	82.92	83.15	83.87	87.83
2000	88.18	88.43	89.2	93.41
2500	93.78	94.05	94.86	99.34
3000	99.71	99.99	100.86	105.62
3500	106.28	106.57	107.5	112.57
4000	113.21	113.53	114.52	119.92
4500	120.91	121.24	122.3	128.07

Elaboración Propia

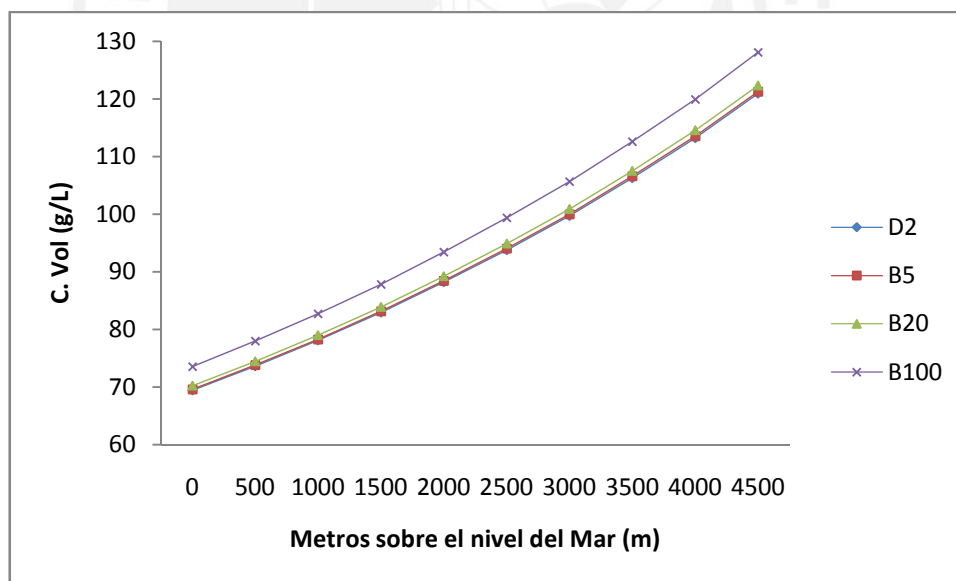


Figura 4.8: Resultados de Cálculo de Consumo Volumétrico de Combustible para el Motor Cummins a Diferentes Altitudes y Mezclas BX.

Elaboración Propia

Los resultados obtenidos reflejan de una manera más clara el cambio de funcionamiento de un motor en particular cuando se cambian la altitud y el porcentaje

de biodiesel en su composición. Para este motor en particular, en el caso del Perú que se utiliza B5, no sufriría una pérdida de potencia considerable, pero si funciona en regiones altas de la Sierra, la pérdida de potencia será un factor determinante en el momento de la selección para su funcionamiento. Para poner un ejemplo, nominalmente entrega 283 kW, mientras que a 4500 metros de altitud con B5 no llega a 150kW. Dicho motor tenderá a consumir casi el doble de litros de combustible bajo las mismas circunstancias, por lo tanto, es más importante tener en cuenta las condiciones de trabajo que va a tener un motor en la altura porque los gastos de abastecimiento de combustible y almacenamiento, en caso de que trabaje en una comunidad alejada, van a aumentar principalmente por el aumento de altitud, como lo refleja la tabla 4.9.

El ejemplo de cálculo muestra la facilidad con la que las tablas se pueden utilizar para hallar las condiciones de funcionamiento de un motor en la altitud y con mezclas BX. Se puede decir que con B5 el desempeño del motor es similar al que sería con diesel 2, pero a medida que el porcentaje de biodiesel aumente en la mezcla se vuelve más perjudicial, sobre todo para el consumo de combustible que es a lo que el usuario es más susceptible. El efecto de la altitud en un motor es negativo en su funcionamiento, mucho más de lo que son la utilización de las mezclas BX, de todas maneras la altura y las mezclas BX en conjunto afectan negativamente el funcionamiento del MEC con aspiración natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ref. 4.1] LAPUERTA, Magín, ARMAS, Octavio, AGUDELO, John R y SANCHEZ, Carlos A. *Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento*, 2006. p.4.
- [ref. 4.2] HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Edición 2, Nueva York, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1998. p.57.
- [ref. 4.3] Ibídem.
- [ref. 4.4] Idem, p.52.
- [ref. 4.5] Ibídem.
- [ref. 4.6] LAPUERTA, Pedro. ARMAS, Octavio. *Effect of Biodiesel on Engine Emissions*, 2007. p. 5.
- [ref.4.7] Cummins, 2011. Catálogo de productos. [en línea]. Disponible en:
<http://www.cummins.com/cmi/navigationAction.do?nodeId=2&siteId=1&nodeName=Engine+Business&menuId=1001>

CONCLUSIONES

Las conclusiones arribadas por el estudio son las siguientes:

1. La pérdida de potencia se origina por la disminución de la eficiencia del ciclo termodinámico en la altura. A 4500 metros la potencia baja a 53% de la potencia nominal del motor, es por eso que el motor "Cummins DM6015 02" que puede desarrollar 283kW al nivel del mar, verá limitada su potencia a 153kW.
2. La eficiencia del motor es menor porque la presión atmosférica y la densidad del aire decrecen con la altitud, por lo tanto la combustión se ve afectada porque hay menos moléculas de oxígeno en el aire para reaccionar con el combustible. La menor presión atmosférica hace que la presión en todo el ciclo termodinámico sea menor lo que afecta la auto-detonación del combustible y el empuje total que recibe el pistón por la explosión, disminuyendo la eficiencia. En el caso del estudio a 4500 metros el rendimiento es 43% menor de lo que es a nivel del mar, para el citado motor "Cummins DM6015 02", el rendimiento a nivel del mar es de 41.7%, mientras que a 4500 metros es de 23%.
3. El consumo específico de combustible aumenta porque el motor es menos eficiente, por lo tanto necesita más combustible para poder desarrollar una cierta cantidad de potencia. En los cálculos realizados, a 4500 metros se necesita 74% extra de combustible a comparación del nivel del mar, por lo tanto el motor "Cummins DM6015 02" del ejemplo que se alimenta con 205g/kW-h a nivel del mar, requiere 358g/kW-h a 4500 metros.
4. Cuando el motor utiliza biodiesel desarrolla menos potencia, principalmente por el menor valor de poder calorífico de las mezclas BX a comparación del D2. En el ejemplo, el motor "Cummins DM6015 02" desarrolla 7% menos de potencia con B100 que con D2 con lo que se obtiene 264kW con B100 en vez de 283kW con D2.
5. Cuando se utiliza mezclas BX la eficiencia térmica aumenta en pequeña proporción, hasta 4.5% con B100. Esto se debe a que la mayor lubricidad y viscosidad del biodiesel disminuyen las pérdidas por rozamiento, además el mayor número de cetano del biodiesel atenúa su dificultad para atomizarse y favorece la combustión dentro de la cámara. Adicionalmente, otras

características del biodiesel que favorecen su auto-detonación son la viscosidad y módulo de elasticidad, ya que permiten que el combustible sea inyectado más rápido dentro de la cámara y de esa manera la eficiencia aumente. En el ejemplo del motor “Cummins DM6015 02” la eficiencia crece de 41.7% con D2 a 43.6% con B100.

6. Por más que la eficiencia aumente, los consumos específicos y volumétricos de combustible son mayores con las mezclas BX porque se necesita inyectar más combustible dentro de la cámara para poder atenuar el efecto del menor poder calorífico del biodiesel. El consumo específico aumenta hasta 8.53% con B100, de 205g/kW-h con D2 a 223g/kW-h con B100, para el motor “Cummins DM6015 02”.
7. Al utilizar mezclas BX a mayor altitud sobre el nivel del mar, la potencia se ve afectada por la suma de ambos efectos: la disminución de eficiencia térmica por la altitud y el menor poder calorífico del biodiesel. El motor “Cummins DM6015 02” desarrolla 51% menos de potencia a 4500 metros con B100 que a nivel del mar con D2.
8. La eficiencia del motor disminuye por la altitud, pero aumenta al utilizar mezclas BX, ambos efectos se suman y el rendimiento mejora un poco debido a la utilización de las mezclas BX, sin embargo a medida que se incrementa la altitud la eficiencia va a ser menor que la nominal. El motor “Cummins DM6015 02” pierde alrededor de 40% de su eficiencia cuando se utiliza B100 a 4500 metros.
9. Los consumos específicos y volumétricos de combustible aumentan por efecto de la pérdida de eficiencia por la altura y el menor poder calorífico del biodiesel. A 4500 metros con B100 se consume 89% más de combustible en masa y 84% en volumen.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Las siguientes observaciones y recomendaciones deberán ser tomadas en consideración en estudios similares donde se analice el funcionamiento del motor de encendido por compresión con mezclas diesel biodiesel y en altitud.

Sobre los alcances del trabajo:

El estudio se centra en obtener una herramienta de ingeniería mecánica que permita realizar cálculos con facilidad de variación de potencia, eficiencia y consumo de combustible de un motor de encendido por compresión de aspiración natural que se adapten a la realidad geográfica y política del Perú, por lo que las recomendaciones sobre el alcance del trabajo son:

- Utilizar el presente documento como una herramienta que puede servir para la toma de decisiones técnicas adecuadas a la realidad geográfica peruana respecto a la fuente de combustible a utilizar en un motor, capacidad de combustible que se necesita en zonas alejadas de abastecimiento, logística del combustible, selección de la capacidad de un motor a utilizar, efectos en el medio ambiente con respecto a la cantidad de combustible a utilizar, costo del combustible, etc.
- Se recomienda no utilizar los resultados obtenidos en este estudio a motores de ciclo "Otto" ni a motores supercargados o turbocargados.
- Tomar en consideración el alto valor del punto de nube del biodiesel de palma aceitera, según la referencia del estudio "Basic Properties of Palm Biodiesel-Biodiesel Blends" elaborado por los científicos Pedro Benjumea y John Agudelo de 16°C, ya que al momento de utilizarlo en un motor podría afectar su funcionamiento. Se recomienda calentarlo.
- Las conclusiones a las que arriba el presente trabajo pueden servir como hipótesis para futuros estudios teóricos, de laboratorio o de campo.
- El estudio puede ser útil como fuente bibliográfica para futuras investigaciones que pretenden profundizar en el uso del biodiesel o el efecto de la altitud en el motor.

Sobre el desarrollo del trabajo:

- Es importante señalar que los cálculos realizados para hallar la disminución de potencia en altitud fueron elaborados en base a la norma “SAE J1349”. La norma fue elaborada bajo ciertos parámetros de laboratorio y, por más que sea una fuente de información confiable, los resultados obtenidos podrían diferir si se toman datos para experimentos de campo.
- Los cálculos realizados para hallar el aumento de consumo de combustible con distintas mezclas BX fueron elaborados en base al documento “EPA420-P-02-001” (Energy Protection Agency of United States). Dicho documento es una recopilación de treinta y nueve estudios científicos de institutos, sociedades y universidades reconocidas, sin embargo por más que sea una fuente de información confiable, los resultados obtenidos en los cálculos podrían diferir si se toman datos para experimentos de campo.
- Para la elaboración del trabajo, se asume que la temperatura decrece linealmente de 20°C a nivel del mar hasta -55°C a 1 1000 metros de altura (aceptado en estudios de aerodinámica). Como se conoce la temperatura puede variar en distintos lugares por las condiciones geográficas, horas del día y estación climática de la zona, lo que puede constituirse en fuente de error para algunos cálculos. De todas maneras, estudios de especialistas reconocidos en el tema como Magín Lapuerta, John Agudelo y otros de las Universidad de Castilla-La Mancha y de Antioquia, aceptan esta de disminución de temperatura como correcta para cálculos de disminución de potencia en motores.
- Para la elaboración del trabajo, se asume las propiedades del biodiesel de palma aceitera del estudio “Basic Properties of Palm Biodiesel-Biodiesel Blends” elaborado por los científicos Pedro Benjumea y John Agudelo. Por más que sea una fuente confiable de información, las características del biodiesel de palma aceitera que se produce en el Perú pueden diferir de la presentada en el documento bibliográfico.

BIBLIOGRAFÍA

1. HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Edición 2. Nueva York. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1998.
2. FERGUSON, Colin. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. John Wiley & Sons, 2001.
3. LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio; AGUDELO, John R y SANCHEZ, Carlos A. *Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento*, 2006.
4. SAE INTERNATIONAL. *Engine Power Test Code – Spark Ignition and Compression Ignition – Gross Power Rating*, 1995.
5. SODRÉ. J. SOARES. S. *Comparison of Engine Power Correction Factors for Varying Atmospheric Conditions*, 2003.
6. SODRÉ. J. SOARES. S. *Effects of Atmospheric Temperature and Pressure on the Performance of a Vehicle*, 2003.
7. SAE INTERNATIONAL. *Combustion Process of Diesel Engines at Regions with Different Altitude*, 1995.
8. SIVASANKARAN. JAIN. *Performance of Diesel Engines at High Altitudes*, 1988.
9. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Alternatives to Traditional Transportation Fuels: An Overview*, 2006.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM 6751. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*, 2006.
11. MITTELBACH, Martin. *Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: Specifications and quality control of biodiesel, Bioresource Technology*, Volume 56, Issue 1, 1996.
12. CONGRESO DE LA REPUBLICA PERUANO. *Ley 28694. LEY QUE REGULA EL CONTENIDO DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE DIESEL*, 2006.
13. INDECOPI. *NTP 321.003:2005. PETROLEO Y DERIVADOS. Diesel. Especificaciones*, 2005.
14. ASTM, 2012. Normas. Consulta: 02 de febrero del 2012.
<http://www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=1538>

15. EUROPEAN STANDARD . *EN 14214:2003. AUTOMOTIVE FUELS - FATTY ACID METHYL ESTERS (FAME) FOR DIESEL ENGINES - REQUIREMENTS AND TEST METHOD*, 2003.
16. AGUDELO SANTAMARÍA,, John Ramiro. BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro Nel. *Biodiesel: Producción, Calidad y Caracterización. Edición 1*. Universidad de Antioquia, 2009.
17. LIN, C. CHIU, C. *Burning characteristics of palm-oil biodiesel under long-term storage conditions*. Energy Conversion & Management, 2010.
18. AZAL, M. A. HASEEB, A. A. MASJUKI, H. H. *Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011.
19. FAZAL, M. A. HASEEB, A. A. MASJUKI, H. H. *Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials*. Fuel Processing Technology, 2010.
20. BENJUMEA, P., AGUDELO, J. AGUDELO, A. *Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends*, 2008.
21. LAPUERTA, Magín. *Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions*, 2007.
22. Cummins, 2011. Catálogo de motores. Consulta: 10 de agosto del 2011.
<http://www.cummins.com/cmi/navigationAction.do?nodeId=2&siteId=1&nodeName=Engine+Business&menuId=1001>
23. BALAT, Mustafa, BALAT, Havva. *A Critical Review of Biodiesel as a Vehicular Fuel*, 2008.
24. AGARWAL, Avinash. *Biofiels (alcohols and biodiesel) Applications as Fuels for Combustion Internal Engines*, 2006.
25. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Ingeniería Mecánica. Consulta: 01 de setiembre de 2012.
www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/diesel/motor.htm