

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL CONSUMO DE
COMBUSTIBLE Y LAS EMISIONES GASEOSAS DE UN MOTOR
DIESEL UTILIZANDO 3 MEZCLAS DE DIESEL Y BIODIESEL:
DB5, DB7,5 Y DB10**

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

LUIS MAURICIO SANTIVAÑEZ ARENAS

ASESOR: DR. JULIO CÉSAR CUISANO EGÚSQUIZA

Lima, Abril del 2016

RESUMEN

En la actualidad, el biodiesel constituye una alternativa y un complemento al diesel para reducir la contaminación ambiental y la escasez de combustibles fósiles, siendo un medio de energía renovable menos contaminante que el diesel convencional. Las características de este combustible lo hacen apropiado para funcionar en motores de encendido por compresión, sin tener que realizar cambios importantes al diseño del motor.

En el presente trabajo se realizó una evaluación experimental del efecto de la utilización de 3 mezclas de diesel y biodiesel en porcentajes volumétricos de 5%, 7,5% y 10% (DB5, DB7,5 y DB10) sobre los parámetros relacionados al consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Las pruebas experimentales se realizaron en un motor Cummins de encendido por compresión, 6 cilindros, 6.7 litros, turbo cargado; instalado en un banco de pruebas dinamométrico en el Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Las pruebas experimentales consideraron 4 regímenes de giro (1000, 1300, 1600 y 2000 rpm) y 4 niveles de carga: 9.4, 18.8, 28.2 y 37.5 kPa, en términos de presión media efectiva. Ambas variables fueron establecidas como datos de entrada para cada ensayo y a partir de estas se midieron y calcularon los parámetros requeridos.

En términos de desempeño del motor, se calculó la potencia efectiva, el consumo específico de combustible y el rendimiento efectivo para las 3 mezclas de diesel y biodiesel utilizadas. Los resultados indicaron que la potencia efectiva aumentó conforme se incrementó la velocidad de giro y carga del motor, pero se mantuvo constante para las tres mezclas. El consumo específico de combustible aumentó conforme se incrementó el porcentaje de biodiesel en la mezcla. El rendimiento efectivo presentó un aumento conforme se incrementó la carga en los ensayos, pero disminuyó al utilizarse más biodiesel en la mezcla.

Respecto a los contaminantes gaseosos, se midieron el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). A partir de los valores registrados, se obtuvieron las variaciones porcentuales más significativas entre las emisiones encontradas para las 3 mezclas empleadas. Las emisiones de CO y CO₂ disminuyeron a medida que se aumentó el contenido de biodiesel en las mezclas, presentando el CO las variaciones más significativas. Por otro lado, las emisiones de NO_x aumentaron conforme se incrementó el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Los aumentos porcentuales más altos se encontraron a mayores cargas y velocidades más altas.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : Evaluación experimental del consumo de combustible y las emisiones gaseosas de un motor Diesel utilizando 3 mezclas de diesel y biodiesel: DB5, DB7,5 y DB10
 ÁREA : Energía # 389
 PROPUESTO POR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza
 ASESOR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza
 TESISTA : Luis Mauricio Santivañez Arenas
 CÓDIGO : 20077138
 FECHA : 07 de Octubre del 2015


DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El biodiesel ha surgido como una alternativa y complemento al diesel para reducir la contaminación ambiental y la escasez de los combustibles fósiles en la actualidad. Su principal importancia radica en que son una fuente de energía renovable, ayuda a disminuir las emisiones globales de CO₂ a la atmosfera y no contiene azufre. Los motores de maquinaria pesada emplean, en la mayoría de casos, motores de encendido por compresión (motores Diesel), debido a su elevado rendimiento efectivo. Sin embargo, estos motores son responsables de un porcentaje considerable del total de emisiones contaminantes producidas por las fuentes móviles en nuestro país. Por otra parte, el creciente aumento en el interés por la utilización del biodiesel ha llevado a la necesidad de estudiar los efectos que el uso de este biocombustible tiene sobre las emisiones, economía en el consumo de combustible, estabilidad a la oxidación y propiedades en frío. Estas dos últimas se han logrado reducir, en parte, mediante el uso de aditivos.

Con base en lo antes expuesto, el objetivo del presente trabajo de tesis es realizar una evaluación experimental, sobre condiciones controladas, del efecto de la utilización de mezclas diesel y biodiesel en porcentajes (contenido volumétrico de biodiesel) de 5%, 7,5% y 10% sobre de las emisiones gaseosas y los parámetros ligados al consumo de combustible de un motor Diesel de maquinaria pesada instalado en un banco de pruebas.





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

“Evaluación experimental del consumo de combustible y las emisiones gaseosas de un motor Diesel utilizando 3 mezclas de diesel y biodiesel: DB5, DB7,5 y DB10”

Introducción

CAPÍTULO 1 Revisión bibliográfica

CAPÍTULO 2 Metodología de ensayo

CAPÍTULO 3 Resultados

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza

Asesor



DEDICATORIA



A mi madre, como retribución
a todo su esfuerzo y apoyo incondicional.
A mi hermano por su enorme cariño y confianza
y a mi padre, que desde el cielo ha sido
mi compañía en todo momento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
APROBACIÓN DEL TEMARIO DE TESIS POR EL DECANO	ii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
CAPITULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
1.1. Propiedades del biodiesel en el Perú	6
1.1.1. Viscosidad Cinemática.....	7
1.1.2. Número de Cetano.....	9
1.1.3. Azufre	10
1.1.4. Punto de Nube	10
1.1.5. Punto de inflamación.....	11
1.1.6. Cenizas.....	12
1.1.7. Contenido de Glicerina.....	12
1.2. Emisiones contaminantes en motores de combustión interna	12
1.3. Formación de los contaminantes en motores Diesel	13
1.3.1. Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	13
1.3.2. Monóxido de carbono (CO)	16
1.3.3. Hidrocarburos no quemados (HC).....	17
1.3.4. Material Particulado	18
1.4. Emisiones esperadas debido a la utilización de mezclas diesel y biodiesel en motores diesel	19
1.4.1. Óxidos de nitrógeno	19
1.4.2. Hidrocarburos no quemados	21
1.4.3. Monóxido de carbono.....	22
1.4.4. Otras investigaciones.....	23
1.5. Consumo específico de combustible	25
CAPITULO 2 METODOLOGÍA DEL ENSAYO	27
2.1. Matriz de Ensayos Experimentales.....	28

2.2. Datos registrados	28
2.4. Preparación de las mezclas.....	29
2.4. Parámetros de desempeño e incertidumbres calculados.....	30
2.4.1. Potencia efectiva	30
2.4.2. Presión media efectiva	31
2.4.3. Consumo específico de combustible	31
2.4.4. Rendimiento efectivo	32
2.4.5. Consumo de aire húmedo y aire seco	32
2.4.6. Manejo de incertidumbres	34
2.5. Datos técnicos de los equipos e instrumentos de medición	36
2.5.1. Motor diesel.....	36
2.5.2. Dinamómetro.....	37
2.5.3. Módulo de control del banco de pruebas	39
2.5.4. Analizador de emisiones portátil	39
2.5.5. Medidor de flujo másico de combustible	42
2.5.6. Placa orificio.....	43
2.5.7. Higrómetro	45
2.5.8. Programa Insite del motor Cummins	45
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	47
3.1. Potencia efectiva observada.....	47
3.2. Consumo específico de combustible	49
3.3. Rendimiento efectivo	53
3.4. Temperatura de gases de escape	56
3.5. Monóxido de carbono	58
3.6. Dióxido de Carbono.....	64
3.6. Óxidos de Nitrógeno.....	67
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 1 - Variaciones porcentuales esperadas respecto al porcentaje de biodiesel [11].....	23
Figura 2.1 - Configuración experimental del motor Cummins instalado en el banco de pruebas.....	27
Figura 2.2 - Instrumentos de medición.....	29
Figura 2.3 - Rotulado combustible DB5, DB7,5 y DB10.....	30
Figura 2.4 - Instalación de motor Cummins QSB 6.7.....	37
Figura 2.5 - Instalación del dinamómetro Zöllner A-350.....	38
Figura 2.6 - Módulo de control del banco de pruebas.....	39
Figura 2.7 - Analizador de gases portátil Testo 350 XL.....	41
Figura 2.8 - Instalación del Testo 350 XL en el tubo de escape.....	41
Figura 2.9 - Medidor de flujo tipo coriolis.....	42
Figura 2.10 - Instalación del medir de flujo.....	43
Figura 2.11 - Instalación del cilindro amortiguador.....	44
Figura 2.12 - Placa orificio.....	44
Figura 2.13 - Micromanómetro diferencial.....	45
Figura 2.14 - Higrómetro.....	45
Figura 2.15 - Programa Insite Cummins.....	46
Figura 3.1 - Potencia efectiva observada vs Presión media efectiva @ 1000 rpm y 1300 rpm.....	48
Figura 3.2 - Potencia efectiva observada vs Presión media efectiva @ 1600 rpm y 2000 rpm.....	49
Figura 3.3 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1000 rpm.....	51
Figura 3.4 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1300 rpm.....	51
Figura 3.5 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1600 rpm.....	52
Figura 3.6 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 2000 rpm.....	52
Figura 3.7 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1000 rpm.....	54
Figura 3.8 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1300 rpm.....	54
Figura 3.9 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1600 rpm.....	55

Figura 3.10 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 2000 rpm	55
Figura 3.11 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1000 rpm	56
Figura 3.12 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1300 rpm	57
Figura 3.13 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1600 rpm	57
Figura 3.14 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 2000 rpm	58
Figura 3.15 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1000 rpm	60
Figura 3.16 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1300 rpm	60
Figura 3.17 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1600 rpm	61
Figura 3.18 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 2000 rpm	61
Figura 3.19 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1000 rpm	62
Figura 3.20 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1300rpm	63
Figura 3.21 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1600rpm	63
Figura 3.22 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 2000rpm	64
Figura 3.23 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1000rpm.....	65
Figura 3.24 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1300rpm.....	66
Figura 3.25 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1600rpm.....	66
Figura 3.26 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 2000rpm.....	67
Figura 3.27 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1000rpm	69
Figura 3.28 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1300rpm	69
Figura 3.29 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1600rpm	70
Figura 3.30 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 2000rpm	70
Figura 3.31 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1000rpm	71
Figura 3. 32 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1300rpm	72

Figura 3. 33 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1600rpm72

Figura 3. 34 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 2000rpm73



LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM	Association for Testing Materials
B100	Biodiesel Puro
CEC	Consumo específico de combustible
CME	Ester Metílico de Canola
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
cSt	Centistokes
DB10	Combustible Diesel con 10% de Biodiesel
DB5	Combustible Diesel con 5% de Biodiesel
DB7,5	Combustible Diesel con 7,5% de Biodiesel
DS	Decreto Supremo
ECE R49	Ciclo de Pruebas Estacionario de 13 Modos
EGR	Sistema de Recirculación de Gases de Escape
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
ETME	Ester Metílico de Grasa Comestible
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico
HC	Hidrocarburos no quemados
HEUI	Inyector de Unidad Hidráulica/Electrónica
HNO ₃	Ácido Nítrico
INDECOPI	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Propiedad Intelectual
ISO	International Organization for Standardization
ITME	Ester Metílico de Grasa No Comestible
LME	Ester Metílico de Manteca
MINAM	Ministerio del Ambiente
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
N	Nitrógeno
NO	Óxido Nítrico
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
NO _x	Óxidos de Nitrógeno.
NTP	Norma Técnica Peruana
O	Oxígeno
PM	Material Particulado
ppm	Partes por millón.
RM	Resolución Ministerial
S50	Contenido de 50ppm de Azufre
SME	Ester Metílico de Soya

SO_2	Dióxido de azufre
n	Régimen de giro
T	Torque [N.m]
P_e	Potencia efectiva en [kW]
pme	Presión media efectiva [bar]
W_e	Trabajo efectivo del motor [kJ]
V_t	Volumen desplazado o la cilindrada del motor [m ³]
i	Numero de ciclos por vuelta
ρ_{air}	Densidad del aire ambiente [kg/m ³],
$\rho_{air,ref}$	Densidad del aire de referencia en el múltiple de admisión.
P_{atm}	Presión atmosférica en [kPa]
R_{air}	Constante del aire ambiente [kJ/kg.K]
T_{amb}	Temperatura del ambiente de trabajo [°C]
$R_{air,s}$	Constante del aire seco [kJ/kg.K]
R_{vapor}	Constante del vapor de agua [kJ/kg.K]
w	Humedad absoluta [kg/kg]
φ_r	Humedad relativa [%]
P_{sat}	Presión del agua a temperatura ambiente [kPa]
$\dot{m}_{air,hum}$	Consumo de aire húmedo [kg/h]
$\dot{m}_{air,s}$	Consumo de aire seco [kg/h]
V_{air}	Velocidad del aire en la placa orificio [m/s]
ΔP_{air}	Presión diferencial del aire entre la placa orificio [Pa]
Cd	Coefficiente de descarga en la placa orificio
cec_d	Consumo específico de combustible diesel [g/kW.h]
\dot{m}_d	Consumo de combustible diesel [g/h]
PCI	Poder calorífico inferior [MJ/kg]
η_e	Rendimiento efectivo [%]
σ_L	Incertidumbre de lectura
div_{me}	División menor de la escala del instrumento
σ_x	Incertidumbre estándar
σ_{n-1}	Desviación estándar de una muestra
n	Número de mediciones
σ_{n-1}	Desviación estándar de una muestra
x_i	Dato i
\bar{x}	Media
$\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)$	Derivada parcial de f respecto de x

INTRODUCCIÓN

En general, los vehículos propulsados por motores de combustión interna producen tres tipos de emisiones contaminantes: emisiones evaporativas, emisiones por el tubo de escape y emisiones de partículas por el desgaste tanto de los frenos como de las llantas [1].

Las emisiones evaporativas son causadas por la evaporación del combustible y ocurren cuando el vehículo se encuentra tanto estacionado como en circulación. Tanto las emisiones evaporativas como las producidas por el desgaste de frenos y llantas, no serán cubiertas por el alcance del presente trabajo y solo se evaluará las emisiones gaseosas emitidas por el tubo de escape.

Las emisiones emitidas por el tubo de escape son producto del proceso de combustión y comprenden una serie de contaminantes tales como: CO, CO₂, HC, NO_x, SO₂, y PM. Además, ciertos contaminantes presentes en el combustible tales como el azufre se liberan al ambiente también como producto del proceso de combustión. Los vehículos con motores más potentes tienden a generar mayores emisiones contaminantes y no solo dependen de las características constructivas de los motores y su sistema de control de emisiones, sino también del estado de mantenimiento del vehículo y los factores de operación tales como régimen de giro, carga y la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y desaceleraciones.

El inadecuado mantenimiento de los vehículos automotores debido a la falta de control y el crecimiento del parque automotor, en los últimos años, ha generado un incremento considerable en los niveles de contaminación ambiental produciendo efectos nocivos para la salud de las personas y causando daños irreparables al medio ambiente [2].

Las emisiones contaminantes emitidas por los vehículos, debido a la utilización de combustibles fósiles, son causantes de efectos nocivos para el medio ambiente y los seres humanos. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas causante del efecto invernadero; el monóxido de carbono (CO) reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, siendo letal en altas dosis; los óxidos de nitrógeno (NO_x) e

hidrocarburos (HC) son los principales formadores de smog fotoquímico y los óxidos de sulfuro (SO_x), causantes de la lluvia ácida. Además, se emite material particulado (PM) causante de enfermedades respiratorias y cáncer.

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) los motores de vehículos para uso fuera de carreteras son responsables del 25% de las emisiones de NO_x de todas las fuentes móviles de los Estados Unidos. La EPA ha puesto en vigencia las normas TIER 4 para vehículos de uso fuera de carretera en dos fases: TIER 4 interino a partir del 2011 y TIER 4 final para fines del 2014. Con estas nuevas normas la EPA calcula que para el año 2030 el control de estas emisiones evitaría anualmente 12.000 muertes prematuras, 8.900 hospitalizaciones y 1 millón de días laborales perdidos.

En el año 2001 mediante el Decreto Supremo DS N° 047-2001-MTC [2], modificado por el Decreto Supremo DS N° 026-2006-MTC [3], se aprueba por primera vez en nuestro país los “Límites Máximos Permisibles vehiculares” estableciendo normas Euro II para la importación de vehículos nuevos a partir del 2003 y la norma Euro III para vehículos nuevos importados de pasajeros o de carga a partir del 2007. Después de varias modificaciones menores en el año 2012, mediante el DS N° 009-2012 MINAM [4] se modifica el DS N° 047-2001-MTC corrigiendo los anexos del 1 al 4 e incorporando EURO IV a partir del año 2016, para vehículos convencionales a diesel de pasajeros o de carga mayores a 3.5 toneladas, con sistemas de tratamientos de gases de escape.

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), “una sola excavadora puede emitir tanto material particulado (PM) y NO_x al medio ambiente como 25 autos nuevos” [5]. Por otra parte, en lo que respecta a vehículos de maquinaria pesada en el Perú, el artículo 13 del Decreto Supremo DS N° 009-2012-MINAM decreta que: “Los vehículos que son destinados, exclusivamente, al uso fuera del Sistema Nacional de Transporte Terrestre y los de competencia están exonerados del cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles correspondientes”. Por lo tanto, la normativa peruana excluye a los vehículos de maquinaria pesada del control de límites máximos permisibles de emisiones. Por lo que, estos vehículos tienen total

libertad de circular por nuestro país sin ser regulados por ninguna autoridad, en cuanto a emisiones se refiere.

En la actualidad el biodiesel se plantea, en nuestro país, como una alternativa y un complemento al diesel para combatir la contaminación ambiental y la escasez de combustibles fósiles, siendo un medio de energía renovable menos contaminante que el diesel normal. El biodiesel es un combustible que se obtiene principalmente en base a aceites vegetales de la palma aceitera, soya, canola y girasol convirtiendo a los triglicéridos en ésteres de metilo o etilo a través de un proceso denominado transesterificación¹ [6]. Las características de este combustible lo hacen apropiado para funcionar en motores de encendido por compresión sin tener que realizar cambios importantes al diseño del motor.

En el Perú mediante la Resolución Ministerial RM N° 139-2012-MEM/DM [7] se establece la obligatoriedad de utilizar y comercializar combustible diesel B5 S50 (diesel + 5% biodiesel, con un máximo de 50 ppm de azufre) en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la provincia constitucional del Callao mediante la ley N° 28694 que regula el contenido de azufre en el combustible con el objetivo de salvaguardar la calidad del aire y la salud pública.

En la actualidad existen tres empresas con plantas de producción de biodiesel en nuestro país: Heaven Petroleum Operators, Pure Biofuels Perú y Palmas del Espino, siendo esta última, la única que cuenta con una plantación de palma aceitera en la región de San Martín, pero que resulta muy pequeña para poder competir con la producción de las grandes empresas extranjeras productoras de biodiesel, especialmente las argentinas. Este combustible, subsidiado por el gobierno argentino, ha invadido el mercado nacional logrando abarcar casi el 98.8% del mercado local frente al 1.2% correspondiente a la producción nacional [8]. Industrias del Espino ha presentado tres denuncias a la Comisión de Fiscalización de Dumping y Subsidios de Indecopi, demostrando el evidente daño al sector y a toda la cadena productiva.

¹Transesterificación: Proceso químico a través del cual los aceites vegetales se combinan con alcohol (etanol o metanol) para generar una reacción que produce ésteres grasos como el etil o metilo éster. Estos pueden ser mezclados con diesel o usados directamente como combustibles en motores comunes.

Este aumento en el interés por la utilización del biodiesel ha llevado a la necesidad de estudiar los efectos que el uso de este biocombustible puede tener sobre las prestaciones mecánicas y las emisiones contaminantes en los motores Diesel.

En el presente trabajo se pretende realizar una evaluación experimental del efecto de la utilización de mezclas diesel y biodiesel en porcentajes (contenido volumétrico de biodiesel) de 5%, 7,5% y 10% sobre las emisiones gaseosas y parámetros relacionados al consumo de combustible de un motor Diesel de maquinaria pesada instalado en un banco de pruebas estacionario del laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar experimentalmente el efecto de la utilización de mezclas de diesel y biodiesel, en porcentajes de 5%, 7,5%, y 10%, sobre el consumo de combustible y las emisiones gaseosas en un motor Diesel.

Objetivos Específicos

- Sobre condiciones estacionarias, cuantificar el consumo específico de combustible y las emisiones gaseosas de CO, CO₂ y NO_x emitidas por un motor Diesel.
- Evaluar la variación de las emisiones gaseosas producidas por 3 mezclas de diesel y biodiesel (DB5, DB7.5 y DB10) utilizando un analizador portátil de emisiones.
- Establecer, para cada porcentaje de mezclas de diesel y biodiesel, las variaciones más significativas sobre los parámetros relacionados al desempeño mecánico y emisiones contaminantes.
- Desarrollar un protocolo de ensayo experimental sobre un motor Diesel, el cual permita evaluar los efectos provocados por el aumento del biodiesel sobre el diesel convencional disponible en el Perú.

CAPITULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Propiedades del biodiesel en el Perú

El biodiesel producido a partir de aceites vegetales se obtiene de la mezcla de alcohol y aceite vegetal a través de un proceso llamado trans-esterificación. El producto final de este proceso es biodiesel puro y glicerol como subproducto [6].

El proceso de trans-esterificación consiste en mezclar el aceite con un alcohol simple como el metanol, de forma que se produzcan ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos. Este proceso permite disminuir la viscosidad del aceite, la cual es principalmente ocasionada por la presencia de glicerina en la molécula. En su forma natural, la alta viscosidad del aceite vegetal impide su uso directo en motores Diesel, desventaja que se resuelve mediante este proceso [6].

Las propiedades del combustible biodiesel comercial dependen del proceso de refinación que se utilice y de la naturaleza de los lípidos renovables a partir de los cuales se fabrica.

El biodiesel puede producirse, por ejemplo, a partir de una gran variedad de aceites vegetales o grasas animales los cuales producen características de volatilidad y emisiones similares pero con propiedades diferentes de flujo en frío. Las propiedades químicas que presenta el biodiesel influyen directamente en los efectos que puede tener en el motor y sus emisiones.

En el Perú, las especificaciones técnicas de los combustibles son reguladas mediante normas técnicas propuestas por el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) y modificadas, en algunos casos, mediante Decretos Supremos como es el caso del porcentaje de contenido de biodiesel para el diesel B5 S50 mediante el D.S. 092 2009 EM.

La norma técnica peruana que estandariza las especificaciones requeridas del biodiesel puro (B100) es la NTP 321.125:2008 [9].

La norma peruana que estandariza las especificaciones técnicas requeridas del diesel hasta con un contenido de 5% de biodiesel y 50 ppm de azufre (DB5 S50) es la NTP 321.003:2005 [10]. Cabe mencionar que esta norma fue modificada por el Decreto Supremo D.S. 092 2009 EM para poder agregarle, a partir del 01 de enero del 2011, el contenido de 5% de B100 en su composición.

En las Tablas 1.1 y 1.2 se presentan las principales especificaciones técnicas del biodiesel (B100) y el diesel DB5 S50 (5% de biodiesel y 50 ppm de azufre). Los valores se obtuvieron de las normas NTP 321.125:2008 y NTP 321.003:2005 respectivamente.

1.1.1. Viscosidad Cinemática

La viscosidad es una propiedad importante que impacta en el desempeño de los sistemas de inyección. La especificación de un mínimo en la viscosidad puede ser ventajosa para motores que requieren menor potencia en la bomba de inyección y en la salida de los inyectores [11].

Si la viscosidad es muy baja algunas bombas de inyección pueden experimentar excesivo desgaste y pérdida de potencia. Si la viscosidad es muy alta, puede causar mucha resistencia al bombeo dañando filtros e inyectores. Además, una viscosidad alta puede causar una combustión pobre que conduce a la formación de depósitos [11].

Tabla 1.1 - Especificaciones del Biodiesel (B100) en el Perú [9]

Propiedad	Unidades	Biodiesel B100	Metodo de ensayo
Punto de inflamación (copa cerrada)	°C	93 mín.	ASTM D 93
Control de alcohol (uno de los siguientes debe ser cumplido)			
1. Contenido de metanol	% volumen	0,2 máx.	EN 14110
2. Punto de inflamación	°C	130,0 mín.	ASTM D 93
Agua y sedimento	% volumen	0,050 máx.	ASTM D 2709
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0(a)	ASTM D 445
Cenizas sulfatada	% masa	0,020 máx.	ASTM D 874
Azufre	ppm	15 máx.	ASTM D 5453
Número de cetano		47 mín.	ASTM D 613
Número de acidez	mg KOH / g	0,50 máx.	ASTM D 664
Glicerina libre	% masa	0,020 máx.	ASTM D 6584
Glicerina total	% masa	0,240 máx.	ASTM D 6584
Contenido de fósforo	% masa	0,001 máx.	ASTM D 4951
Temperatura de destilación. Temperatura del 90% de recuperado equivalente a presión atmosférica	°C	360 máx	ASTM D 1160
Contenido de sodio y potasio combinado	ppm	5 máx.	EN 14538
Estabilidad a la oxidación	horas	3 mín.	EN 14112

(a) El límite de viscosidad de 6.0 mm²/s es mayor que el del combustible diesel derivado del petróleo lo que debe tomarse en cuenta cuando se mezclan, o cuando se use como B100 puro.

Tabla 1.2 - Especificaciones técnicas del diesel B5 S50 modificada por D.S. 092 2009 EM [10]

Propiedad	Unidades	Diesel B5 S50	Metodo de ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	845 máx.	ASTM D 4052
Punto de inflamación (Pensky Martens)	°C	52	ASTM D 93
Agua y sedimento	% volumen	0,05 máx.	ASTM D 2709, ASTM D 1796
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm/s	1,9-4,1	ASTM D 445
Cenizas	% masa	0,01 máx.	ASTM D 482
Azufre	ppm	50 máx.	ASTM D 5453, ASTM D 2622
Número de cetano		45	ASTM D 613
Aromáticos	% volumen	35	ASTM D 1319
Residuos de carbón Ramsbottom.	% masa	0,35	ASTM D 524, ASTM D 189
Punto de escurrimiento	°C	4	ASTM D 97
Punto de obstrucción del filtro, flujo en frio (CFPP) o (POFF)	°C	-8	ASTM D 6371
Contenido de B100	% volumen	5	ASTM D 7371

La viscosidad máxima permitida, está limitada por las consideraciones del tamaño y diseño del motor y por las características del sistema de inyección. El límite superior de viscosidad del biodiesel B100 ($6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$) es más alto que la viscosidad máxima permitida para el diesel B5 ($4,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$) [12]. El rango de viscosidad del biodiesel aceptable en la norma ASTM D 445 es lo suficientemente amplio para permitir el uso de la mayoría de las materias primas para producción de biodiesel [13]. Las mezclas de biodiesel con diesel cercanas a la especificación superior ($6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$), pueden dar como resultado una mezcla con una viscosidad superior a la especificación de la NTP 321.003 [10]. En la Tabla 1.3 se puede observar los valores de viscosidad cinemática para distintos combustibles.

Tabla 1.3 - Viscosidades para distintos combustibles [14]

Combustible	Viscosidad cinemática (cSt @ $40 \text{ }^\circ\text{C}$)
Diesel D1	1,3 - 2,4
Diesel D2	2,0 - 4,5
Biodiesel de Colza	6,7
Biodiesel de soya	4,08
Biodiesel de palma	4,5

1.1.2. Número de Cetano

El número de cetano es un descriptor adimensional de la calidad de ignición del combustible al momento de inyectarlo a la cámara de combustión de un motor diesel. Se relaciona con el tiempo de retardo en la ignición que experimenta un combustible al momento de la inyección. Por lo general, un número alto de cetano significa mejor calidad de ignición y menos tiempo de retardo de la ignición y viceversa [13].

El requerimiento del número de cetano depende del diseño del motor, de su tamaño, de las variaciones de velocidad y carga, de las condiciones atmosféricas y de su arranque. Un número de cetano alto permite mejorar las condiciones del motor de encendido en frío [9].

El número de cetano varía de acuerdo al origen del combustible. En el biodiesel esta propiedad varía directamente con aceite vegetal y es independiente del proceso de

producción. Mientras sea mayor la cantidad de parafinas en su estructura, el número de cetano aumentará. En los combustibles fósiles ocurre lo opuesto con el número de cetano [15]. En la siguiente tabla se muestra el número de cetano para combustibles diesel convencionales y biocombustibles.

Tabla 1.4 - Número de cetano para distintos combustibles [14]

Combustible	Número de cetano
Diesel D1	40
Diesel D2	51
Biodiesel de Colza	54.4
Biodiesel de soya	46.2
Biodiesel de palma	56.2

1.1.3. Azufre

El contenido de azufre afecta en el desgaste y la generación de depósitos en el motor. También es la principal causa de las emisiones de material particulado (PM) y óxido de azufre (SO_x) y tiene un impacto negativo en el comportamiento de los sistemas de control de emisiones, por lo que se han impuesto varios límites máximos permisibles de azufre en nuestro país, siendo el límite máximo permisible actual el de 50 ppm en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la provincia constitucional del Callao mediante la ley N° 28694. El B100 es un combustible esencialmente libre de azufre [10].

1.1.4. Punto de Nube

El punto de nube define la temperatura a la cual una nube o niebla de cristales aparecen en el combustible. Esta temperatura se relaciona con la temperatura a la cual empiezan a precipitarse cristales en el combustible.

El punto de nube en el biodiesel es mayor que en el combustible diesel convencional y es la principal causa de la obstrucción de los filtros y sistemas de inyección en los motores utilizados en climas fríos. El biodiesel producido de palma aceitera tiene un punto nube muy alto, siendo esto la principal dificultad técnica que tiene la producción de biodiesel de palma aceitera en el Perú [16].

En climas fríos debe haber mayor cuidado con su utilización y almacenamiento. No obstante, este problema puede ser solucionado si se modifican las características del biodiesel B100 con un proceso adicional en la refinación, como se realiza en otros países utilizando la misma materia prima [10].

El punto nube en el biodiesel es una propiedad que varía con respecto a la procedencia del aceite y al porcentaje de concentración en la mezcla. En la Tabla 1.5 se puede apreciar los valores de punto nube para biodiesel producido de distintos aceites y en distintas concentraciones de mezclas BX.

Tabla 1.5 – Punto de nube para distintos combustibles [14]

Concentración de biodiesel (%)	SME (°C)	CME (°C)	LME (°C)	ETME (°C)	ITME (°C)
0	-18	-18	-18	-18	-18
0,25	-20	-18	-18	-16	-16
0,50	-17	-18	-17	-16	-17
1	-16	-18	-17	-15	-17
3	-16	-17	-16	-13	-14
5	-16	-17	-15	-12	-13
10	-15	-17	-14	-9	-10
20	-14	-15	-3	-2	-6
35	-9	-12	-3	0	0
50	-9	-10	-2	3	4
100	2	-3	14	20	23

donde:

SME: éster metílico de soya;

CME: éster metílico de canola;

LME: éster metílico de manteca;

ETME: éster metílico de grasa comestible;

ITME: éster metílico de grasa no comestible;

1.1.5. Punto de inflamación

El punto de inflamación, como está especificado, no está directamente relacionado al desempeño del motor y se utiliza como mecanismo para limitar el nivel del alcohol sin

reaccionar, que permanece en el biodiesel terminado. Sin embargo, es de importancia su conexión con los requerimientos legales y precauciones de seguridad envueltos en la manipulación y el almacenamiento del combustible, siendo su valor más del doble que el valor del diesel B5 [16].

1.1.6. Cenizas

Los materiales que forman cenizas pueden estar presentes en el biodiesel en tres formas: sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y catalizadores no removidos. Los sólidos abrasivos y los catalizadores no removidos pueden afectar a los inyectores, filtros y bomba de inyección, generar desgaste en los pistones y anillos, y depósitos en el motor. Los jabones metálicos solubles tienen poco efecto en el desgaste pero pueden afectar los empaques, contribuir al taponamiento de filtros y generar depósitos en el motor [12].

1.1.7. Contenido de Glicerina

El contenido de glicerina libre se utiliza para determinar el nivel de glicerina en el combustible. Altos niveles de glicerina pueden causar depósitos en los inyectores, así como taponeos en el sistema de combustible.

El contenido de glicerina total se utiliza, también, para determinar el nivel de glicerina en el combustible e incluye la glicerina libre y la porción de glicerina de cualquier aceite o grasa no reaccionada o parcialmente reaccionada. Bajos niveles de glicerina total aseguran que se han logrado altos niveles de conversión de aceites o grasas a sus ésteres mono-alquílicos evitando el taponeo del sistema de combustible y contribuyendo positivamente la operación del motor en climas fríos [16].

1.2. Emisiones contaminantes en motores de combustión interna

Los vehículos producen tres tipos de emisiones de gases contaminantes: emisiones evaporativas, emisiones por el tubo de escape y emisiones de partículas por el desgaste, tanto de los frenos como de las llantas.

En un motor de combustión interna se generan una serie de contaminantes que son emitidos por el tubo de escape, independientemente de si son de encendido por compresión o encendido por chispa, debido a que el proceso de combustión no se realiza de manera completa en ninguna de las condiciones de funcionamiento del motor.

Las emisiones emitidas por el tubo de escape de los vehículos son producto del proceso de combustión que ocurre dentro motor y comprenden una serie de contaminantes tales como: CO, CO₂, HC, NO_x, SO₂, y PM. Además, ciertos contaminantes presentes en el combustible, tal como el azufre, se liberan al ambiente también como producto del proceso de combustión.

Los vehículos con motores más potentes tienden a generar mayores emisiones contaminantes y estas emisiones emitidas por el tubo de escape no solo dependen de la temperatura a la que se realiza la combustión, la presión, la homogeneidad de la mezcla, las características constructivas de los motores y su sistema de control de emisiones, sino también del estado de mantenimiento del vehículo y los factores de operación tales como la velocidad, carga y la frecuencia e intensidad de las aceleraciones y desaceleraciones [1].

1.3. Formación de los contaminantes en motores Diesel

1.3.1. Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

En 1946, Zeldovich asentó y describió las bases del mecanismo de formación de las moléculas de NO al que hoy se conoce como mecanismo de Zeldovich y que en la actualidad se utiliza como un modelo válido para explicar la formación de óxidos de nitrógeno en los motores Diesel [17]. Estos estudios dieron a conocer las dependencias de las emisiones NO_x con la temperatura de combustión y la relación de aire – combustible. A través de este mecanismo se comprendió la relación que existe entre las emisiones de NO_x y la formación de smog fotoquímico en la atmosfera siendo los vehículos la fuente más grande que contribuye a las emisiones de NO_x a la atmósfera [18].

El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son usualmente agrupados juntos como NO_x. Los NO, que constituyen la mayor parte de los NO_x, se forman a partir de nitrógeno atmosférico mediante 3 reacciones que, agrupadas, conforman el mecanismo llamado Zeldovich [19]:



La reacción en cadena representada por las tres reacciones anteriores (1.1, 1.2 y 1.3) se inicia con la presencia de átomos de oxígeno, formados por la disociación de moléculas de oxígeno, provocada por las elevadas temperaturas que se alcanzan en los procesos de combustión [20].

Zeldovich comprobó que las velocidades de formación de NO térmico eran mucho menores que las del proceso de combustión y que, por lo tanto, la mayor parte del NO emitido se formaba una vez finalizado dicho proceso, es decir, en los gases de postcombustión y no en el frente de llama [20].

La dependencia de la formación de NO con la temperatura resulta de razones físicas del proceso de combustión. Una vez formado el NO tras la explosión, la alta temperatura de los gases quemados no permite que reacciones químicas que involucren átomos de N y O alcancen equilibrio químico; luego, mientras los gases quemados se enfrían durante la expansión, las reacciones que involucran al NO se detienen, evitando de esta forma su destrucción, la que si hubiese ocurrido en condiciones de equilibrio [15].

En motores Diesel el NO₂ representa entre el 10 y el 30 por ciento de las emisiones de NO_x, teniendo, además, un mayor potencial que el NO para contribuir a la formación de lluvia ácida y smog fotoquímico. Esto se debe a que el NO formado puede ser rápidamente convertido en NO₂ por medio de las siguientes reacciones:



Este NO_2 puede volver a convertirse en NO si se mezclan los gases con un fluido más frío, es por esto que se produce en motores Diesel a baja carga, cuando existen zonas frías que inhiben la reconversión [21].



En un motor de encendido por compresión la mayor parte del NO se forma dentro de los primeros 20° del ángulo seguidos al inicio de la combustión. Además, al retrasar la inyección también se retrasa la combustión causando que la formación de NO ocurra más tarde lo que genera que las concentraciones de NO sean menores debido a que los picos de temperaturas alcanzados son más bajos. De la misma manera, al aumentar los picos de presión y temperatura, la formación de NO aumenta [15].

El NO_2 es el principal contaminante de los óxidos de nitrógeno, siendo el más nocivo para el ser humano como para el medio ambiente. La exposición aguda al NO_2 puede provocar lesiones en las vías respiratorias y en los pulmones, ocasionando una reducción de la capacidad pulmonar y una mayor sensibilidad a los alérgenos. En el caso de exposiciones prolongadas se observan cambios irreversibles en la estructura y función de los pulmones, especialmente en los niños y en las personas que padecen alguna patología respiratoria. Además de sus efectos en la salud, los óxidos de nitrógeno causan importantes afecciones al medio ambiente. Así, el dióxido de nitrógeno se oxida fácilmente en el vapor de agua existente en la atmósfera para formar ácido nítrico (HNO_3), uno de los principales constituyentes de la lluvia ácida [22].

En cuanto al NO , una vez liberado a la atmósfera es oxidado rápidamente por el ozono para generar NO_2 , que a su vez interviene en el ciclo de formación del ozono troposférico, constituyente esencial del "smog" fotoquímico [20].

Finalmente, el óxido nitroso (N_2O), además de su contribución como especie intermedia en la formación de NO , es un gas con un potente efecto invernadero (responsable del 5,9% de todos los gases de efecto invernadero en el año 2004, según la Global Warming Potencial) [20].

1.3.2. Monóxido de carbono (CO)

El mecanismo de formación del CO es un paso intermedio fundamental en la oxidación de un hidrocarburo y esta íntimamente ligado con el dosado. El monóxido de carbono se genera a partir de la combustión incompleta del diesel, es decir, es un producto intermedio del proceso de combustión. Es por esto que sus emisiones dependen considerablemente de la relación aire/combustible al interior de la cámara de combustión [15].

La combustión de un hidrocarburo puede descomponerse en dos etapas: la primera supone la ruptura de las moléculas de combustible para formar CO (reacción rápida) mientras que la segunda es la oxidación del CO a CO_2 [20].

En motores Diesel, en los cuales el proceso de combustión es heterogéneo, además del mencionado proceso de disociación, existen dos fuentes principales de CO . La primera de ellas la constituyen las zonas excesivamente pobres que no son capaces de soportar una rápida combustión, pues la llama no puede propagarse a través de ellas y se forman productos procedentes de la pirolisis y oxidación parcial del combustible (importante a bajas cargas cuando el exceso de aire es elevado). La segunda fuentes la constituyen las zonas excesivamente ricas en combustible las cuales no permiten la oxidación completa del combustible [20].

El monóxido de carbono es incoloro e inodoro, letal a bajas dosis debido a que se combina con la hemoglobina de la sangre doscientas veces más rápido que el oxígeno y reduce la capacidad de la misma para transportar oxígeno. La excesiva concentración de carboxihemoglobina en la sangre como resultado a altos tiempos de exposición al CO puede tener efectos fatales en los seres humanos [21].

1.3.3. Hidrocarburos no quemados (HC)

Según la referencia [15] los hidrocarburos no quemados (HC), o más apropiadamente llamados, emisiones orgánicas, son consecuencia de la combustión incompleta del combustible. La composición del combustible afecta significativamente a la composición y magnitud de las emisiones orgánicas. Los combustibles que contienen altas proporciones de compuestos aromáticos y olefinas producen concentraciones relativamente altas de hidrocarburos reactivos. Sin embargo, muchos de los compuestos orgánicos que se encuentran en los gases de escape no están presentes en el combustible, lo que indica que la pirolisis y la síntesis significativas se producen durante el proceso de combustión.

El combustible diesel contiene compuestos de hidrocarburos con puntos de ebullición más altos, y por lo tanto mayores pesos moleculares, que la gasolina. Por lo tanto, la composición de los hidrocarburos no quemados en los gases de escape de motores diesel es mucho más compleja que la de motores de encendido por chispa.

Los niveles de emisiones de HC en los motores Diesel varían ampliamente con las condiciones de operación y los mecanismos de formación del HC en los distintos modos de operación. En condiciones de ralentí y baja carga se producen emisiones de HC significativamente más altas que en condiciones de máxima carga. Los mecanismos de formación del HC en motores Diesel ocurren principalmente con mezclas excesivamente pobres como en mezclas excesivamente ricas.

En las mezclas muy pobres se tiene que el combustible sobrepasa los límites inferiores de inflamabilidad y no puede mantener el frente de llama. La cantidad de HC originado dependerá de la cantidad de combustible inyectado durante el retraso en la combustión, la tasa de mezcla con el aire y las condiciones de auto inflamación, por lo cual existe una correlación entre el número de cetano y las emisiones de HC. En las mezclas muy ricas, la formación de HC puede deberse, en parte, a una mezcla deficiente con el aire como consecuencia de una lenta entrada del combustible [15].

1.3.4. Material Particulado

Según la referencia [20] se considera partícula a cualquiera materia, en estado líquido o sólido, presente en los gases de escape que se encuentre en condiciones aproximadamente ambientales. Las partículas Diesel están compuestas por dos fracciones fácilmente separables mediante un proceso de extracción química: una fracción insoluble y otra fracción soluble

La fracción insoluble puede tener compuestos orgánicos e inorgánicos denominada comúnmente ISF, en la que prevalece principalmente el carbono (hollín), acompañado por otros compuestos tales como sulfatos, sales, agua y materiales inorgánicos.

La fracción orgánica soluble (SOF), denominada así por su solubilidad en el disolvente orgánico empleado en la extracción está compuesta por hidrocarburos y otros compuestos orgánicos procedentes directamente del combustible, y del aceite lubricante, o bien de reacciones en el interior de la cámara de combustión en el caso del combustible inyectado.

Aunque la separación de las partículas diesel en ISF y SOF es la más ampliamente extendida en bibliografía, no es la única. Algunos trabajos utilizan métodos térmicos para separar las partículas en dos fracciones, una volátil denominada VOF y compuesta por hidrocarburos y otros compuestos orgánicos y agua, y otra fracción no volátil, principalmente formada por hollín [20].

En todo caso, e independientemente del método utilizado para determinar la composición de las partículas, los dos principales componentes de éstas son el hollín, presente en la ISF si se emplea extracción química o en la fracción no volátil si se emplean métodos térmicos, y los hidrocarburos y demás compuestos orgánicos, que forman parte de la SOF en el caso de la extracción química o de la VOF en el caso de los métodos térmicos [20].

En general, hay acuerdo en la literatura en que el hollín es un aglomerado de pequeños núcleos carbonosos formado a partir de hidrocarburos policíclicos en fase condensada o por la deshidrogenación de moléculas de combustible sometidas a

temperaturas locales muy elevadas. La formación de hollín en motores Diesel por esta última ruta no es predominante debido a las temperaturas características del proceso de combustión en estos motores [20].

1.4. Emisiones esperadas debido a la utilización de mezclas diesel y biodiesel en motores diesel

1.4.1. Óxidos de nitrógeno

En la mayoría de la literatura consultada, los autores concluyen un ligero incremento en las emisiones de NO_x al usar biodiesel. También se encontró investigaciones en donde la tendencia de las emisiones de NO_x depende de los modos de ensayo, investigaciones en donde el NO_x no varía significativamente al operar mezclas diesel y biodiesel o incluso investigaciones en donde se registraron descensos de NO_x al operar con biodiesel. A continuación se comentarán algunos trabajos en donde el NO_x aumenta según las condiciones de operación de motor, o disminuye al utilizar mezclas de diesel y biodiesel.

FEV Engine Technology [23] realizó un trabajo experimental utilizando diesel convencional con varios porcentajes de biodiesel de soya en un motor Navistar 7,3L V8 HEUI, operando en el ciclo de 13 modos. Obtuvo incrementos de NO_x de hasta un 28,2% para el biodiesel puro como se muestra en la tabla 1.6.

Tabla 1.6 - Porcentaje de cambio en las emisiones en un motor Navistar HEUI. Ciclo de pruebas de 13 modos en estado estacionario [23]

% Biodiesel	10	20	30	50	100
Nox	3.5	5.3	6.9	15.8	28.2
HC	-28	-32	-53	-50.7	-75.5
CO	-10.6	-8.1	-18.1	-6.9	-13.8
PM	-33.9	-24.1	-37.5	-26.8	-36.9
BSFC	1.9	2.2	3.2	8.5	12.4

Schumacher *et al.* [24] (reportado en [25]) ensayaron un motor diesel de 6 cilindros y 200 kW, a 1200 y 2100 rpm, 50 y 100% de carga. Ensayaron mezclas con 10, 20, 30 y 40% de biodiesel y obtuvieron siempre incrementos de NO_x hasta en un 15% para la mezcla del 40% biodiesel.

Marshall *et al.* [26] ensayaron un motor Cummins L10E (10 litros) de 6 cilindros en condiciones estacionarias con diesel convencional y con mezclas de 20 y 30% de biodiesel de soya. La mezcla con 20% de biodiesel incrementó las emisiones de NO_x en un 3,7%, mientras que la mezcla con 30% de biodiesel aumento sólo en un 1,2%.

Graboski *et al.* [27] recogieron otras investigaciones en donde se observa un aumento de NO_x al utilizar biodiesel. Schumacher *et al.* (reportado en [27]) ensayaron, bajo el ciclo estacionario de pruebas ISO 8178-4 C1 de 8 modos, 5 tractores con mezclas diesel y biodiesel de soya encontrando un incremento de NO_x del 3 - 35% con biodiesel puro de soya. Análogamente, Goyal [28] (reportado en [27]) ensayó un motor diesel Deere 4045T de maquinaria pesada utilizando el ciclo de prueba estacionario de la norma ISO 8178-4 (8 modos) utilizando mezclas diesel y biodiesel de soya recogiendo un incremento medio del 10% de NO_x .

Rantanen *et al.* [28] presentaron resultados de un estudio cuatro motores Diesel europeos, de 147 - 206 kW, empleando el ciclo de pruebas estacionario ECE R49. Utilizando mezclas diesel y biodiesel de colza observaron incrementos de NO_x entre 4% y 10%.

Otros autores concluyeron que los efectos del biodiesel en las emisiones de NO_x dependían del tipo de motor o de las condiciones de operación del mismo. Serdari *et al.* [29] ensayaron tres vehículos diesel en carretera de 1700, 2400 y 2500 cc y un motor en estado estacionario con combustibles diesel y mezclas con biodiesel de girasol al 10%. En unos casos encontraron ligeros descensos, y en otros ligeros incrementos de NO_x . Atribuyeron estos resultados a la tecnología del motor y sus condiciones de mantenimiento.

Tat [30] (reportado en [25]) revisó en su trabajo varios artículos relacionados con biodiesel y NO_x , y concluyó que las emisiones de NO_x con biodiesel son mayores en ensayos definidos mediante modos estacionarios y transitorios. Sin embargo, el biodiesel emitía menos NO_x que el diesel convencional en ensayos de chasis dinamométrico. Tat recogió otra posible causa, este autor observó que la bomba de inyección adelantaba de forma notable el inicio de la misma. El grado de carga límite, por debajo del cual se producía dicho adelanto, fue mayor para el diesel que para el

biodiesel, por lo cual existían modos a baja carga en los que la inyección con diesel estaba más adelantada que con biodiesel. Las emisiones de NO_x en tales modos fue mayor con diesel que con biodiesel.

Li *et al.* [31] (reportado en [25]) estudiaron los efectos de las propiedades físico - químicas (número de cetano, densidad y contenido en aromáticos) del diesel sobre las emisiones de NO_x . En relación al número de cetano, estos autores encontraron que a media y alta carga el número de cetano no influye en los NO_x . A baja carga los NO_x se reducían al aumentar el número de cetano.

Aunque no es lo habitual, también es posible encontrar investigaciones en las que se obtuvo descensos de NO_x al sustituir diesel por biodiesel. Peterson *et al.* [32] ensayaron mezclas de diesel con biodiesel de colza en dos motores de camionetas diesel de 5.9 litros de inyección directa, en condiciones transitorias. En ambas camionetas se registraron descensos de los NO_x en de 3,4% y 10%.

1.4.2. Hidrocarburos no quemados

La mayoría de los autores reportan en sus trabajos grandes descensos en las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) cuando se utiliza biodiesel como combustible.

Krahl *et al.* [33] recopilaron varios artículos en donde se ensayaban distintos motores de encendido por compresión con biodiesel de colza en ensayos estacionarios o transitorios. Concluyeron que el efecto del biodiesel en las emisiones de hidrocarburos no quemados no dependía del tipo de inyección del motor (directa o indirecta) ni del tipo de ensayo (FTP – 75, ensayo transitorio; ECE R49, ensayo estacionario). En los gráficos presentados se observaron descensos entre 20% y 40% al utilizar biodiesel.

Shi *et al.* [34] realizaron ensayos a plena carga variando el régimen de velocidad (1100 a 3600 rpm) y a régimen constante (1900 rpm) variando la carga, con diesel y biodiesel de soya al 20%. En ambos casos encontraron descensos de hidrocarburos no quemados con la mezcla de biodiesel comprendidos entre el 21% y 23% respecto al diesel convencional, que atribuyeron al mayor número de cetano de la mezcla de biodiesel.

Last *et al.* [35] (reportado en [25]) encontraron que bajos porcentajes de biodiesel disminuían considerablemente las emisiones, mientras que mayores porcentajes no disminuían en la misma proporción los hidrocarburos. Utilizaron un combustible diesel convencional y mezclas de éste con 10%, 20%, 30%, 50% y 100% de biodiesel de soya. Las emisiones de hidrocarburos con biodiesel puro fueron de 75% menor que con diesel convencional. Con 10% y 20% de biodiesel, los hidrocarburos se reducían en 28% y 32% respectivamente.

1.4.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un producto intermedio del proceso de combustión que se genera a partir de la combustión incompleta del diesel. En su mayoría, las investigaciones consultadas recogen descensos significativos de CO cuando se sustituye el combustible diesel convencional por biodiesel.

Krahl *et al.* [33] encontraron descensos aproximados de 50% en las emisiones de CO al emplear biodiesel de colza puro (B100) en un motor Daimler Chrysler turbo cargado de 4.3L empleando el ciclo de pruebas estacionario ECE R49 de 13 modos.

Peterson *et al.* [32] ensayaron mezclas de diesel convencional con biodiesel de colza en dos motores turbo alimentado con intercooler de 5.9L en un ciclo de pruebas transitorio. Las emisiones de CO descendieron hasta algo menos del 50% para biodiesel puro, pero este descenso no fue lineal. El 90% de la disminución de este gas se produjo en el rango de 0% y 50% de biodiesel en el combustible.

Last *et al.* [35] emplearon el ciclo de 13 modos en sus ensayos en un motor Navistar T44E HEUI de 7.3L turboalimentado de inyección directa. Utilizaron un combustible diesel convencional y mezclas con biodiesel de soya de 10%, 20%, 30%, 50% y 100%. Con todas las mezclas se obtuvo menos CO que con diesel, pero el descenso no parecía depender de la proporción de biodiesel. Para 10%, 20%, 30%, 50% y 100% biodiesel se midieron descensos de CO del 10%, 8%, 18%, 6% y 14%, respectivamente.

1.4.4. Otras investigaciones

La investigación más significativa la llevó a cabo la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) [36]. En los siguientes párrafos se presentará un resumen de esta investigación que recolectó 39 artículos hasta el año 2001 que reportaban ensayos realizados a motores diesel de maquinaria pesada utilizando mezclas diésel y biodiesel

La EPA llevó a cabo un análisis exhaustivo de los impactos de las emisiones del biodiesel utilizando datos de dominio público. Esta investigación hizo uso de un análisis de regresión estadística para correlacionar la concentración de biodiesel en el combustible diesel convencional con cambios en los contaminantes regulados y no regulados para vehículos y motores que no han sido modificados específicamente para utilizar biodiesel. Este estudio fue restringido a vehículos pesados sin sistema de recirculación de gases EGR y sin tratamientos posteriores a los gases de escape. Se logró caracterizar el comportamiento de las emisiones de los principales contaminantes con un nivel de confianza de 95%. Esta información ha sido ampliamente utilizada para otros estudios de emisiones en vehículos pesados utilizando biodiesel.

En la Figura 1.1 se presentan los resultados porcentuales de cambio de las emisiones esperadas respecto al porcentaje de biodiesel de la mezcla con diesel.

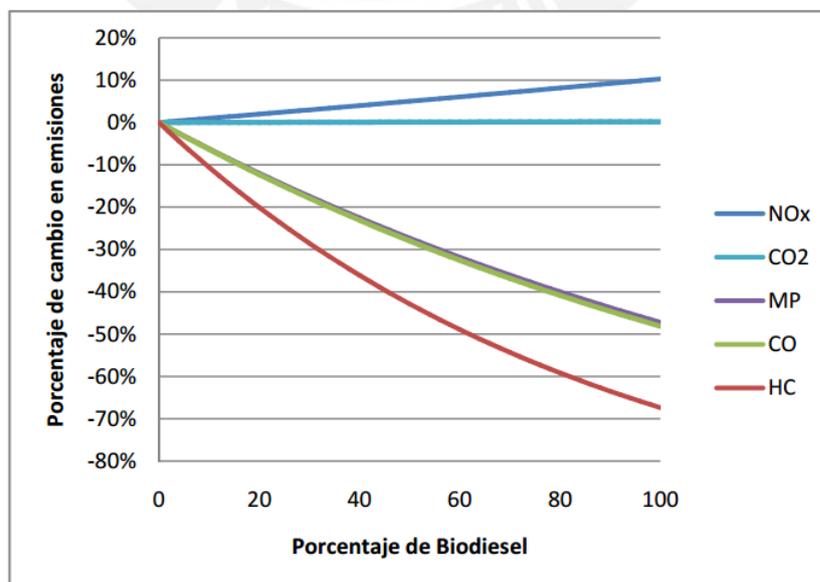


Figura 1 1 - Variaciones porcentuales esperadas respecto al porcentaje de biodiesel [11]

La reducción más importante corresponde a los hidrocarburos no quemados. Se registró una disminución de alrededor de 65% para biodiesel puro (B100). Las emisiones de monóxido de carbono (CO) también se redujeron notablemente, alcanzado a reducirse casi un 50% para B100. Las emisiones de CO₂ se mantuvieron constantes para todas las mezclas.

El NO_x es el único contaminante que presenta un aumento claro en sus emisiones. Al igual que en otros casos, las emisiones son mayores en el caso del biodiesel procedente de soya y menores en el caso del biodiesel de procedencia animal. Para biodiesel puro se registraron incrementos de NO_x alrededor de 10%.

La investigación también descubrió que los impactos de biodiesel en las emisiones variaban dependiendo del tipo de biodiesel (soya, colza, o grasas animales) y del tipo de diesel convencional a la que se añadió el biodiesel. Con una pequeña excepción, los impactos de las emisiones de biodiesel no parecen diferir con respecto al año del modelo del motor en prueba.

En la Tabla 1.7 se presenta el porcentaje de variación de contaminantes para una mezcla de 20% de biodiesel con 80% de diesel convencional:

Tabla 1.7 - Porcentaje de cambio de emisiones con biodiesel 20% [36]

Contaminante	Porcentaje de cambio en emisiones
Nox	2.00%
PM	-10.10%
HC	-21.10%
CO	-11.00%

Otro estudio importante lo realizó Rodríguez [37]. En su investigación se evaluó dos motores de encendido por compresión, utilizando biodiesel, variando la carga y velocidad. En el caso del motor "A" se realizaron pruebas con biodiesel obtenido a partir de aceite de soya y diesel. En el caso de las pruebas con el motor "B" fueron utilizados dos tipos de combustibles biodiesel, uno de ellos a partir de aceite de palma y otro a partir de aceite de colza. En uno de los motores ensayados fue determinada la

presión en el interior de la cámara de combustión con el objetivo de evaluar el retardo de ignición. Además, se observó que los motores trabajando con combustible biodiesel presentaban una disminución de la potencia efectiva y un aumento del consumo específico de combustible. Se observó también una disminución del retardo de ignición cuando fue empleado el combustible biodiesel. En los resultados, se pudo apreciar que los gases contaminantes, excepto las emisiones de NO_x y CO , disminuyen o permanecen constantes con el uso del biocombustible.

Agudelo [38] presentó una investigación con resultados de las prestaciones mecánicas y ambientales de un motor de encendido por compresión sobrealimentado montado en un banco de pruebas. Utilizó biodiesel proveniente del aceite de la palma mezclado en proporciones de 5%, 10% y 20% con diesel convencional. Los resultados mostraron un incremento en el consumo específico de combustible de 0.5, 1, y 1.7% al usar B5, B10, B20 respectivamente. Las emisiones específicas disminuyeron aproximadamente en la misma proporción que el contenido de biodiesel en la mezcla (5, 10 y 20%, para B5, B10 y B20 respectivamente). Las emisiones específicas de NO_x incrementaron ligeramente, y alcanzaron un máximo para la mezcla B20 en torno al 3% respecto al diesel convencional. Los resultados permiten concluir que el uso del biodiesel de aceite de palma mezclado en concentraciones inferiores al 20% con diesel convencional tiene ventajas ambientales significativas.

1.5. Consumo específico de combustible

En un motor de combustión interna el consumo específico de combustible (g/kW.h) se define como la relación entre la masa de combustible y la potencia efectiva y es inversamente proporcional al rendimiento efectivo por el poder calorífico del combustible. Siendo el poder calorífico de biodiesel (mj/kg) menor que el del diesel convencional, entonces el consumo específico aumentaría en la misma proporción. En otras palabras, la disminución del contenido energético del biodiesel debe ser compensado por un mayor consumo de este combustible [39].

Turrio-Baldassarri *et al.* [40] ensayaron un motor de diesel de maquinaria pesada turbo cargado de 6 cilindros y 7.8 litros en estado estacionario mediante el ciclo de trece modos Europeo (ECE R49). Utilizaron diesel convencional y una mezcla de este con

20% de biodiesel de colza y observaron que el consumo específico de la mezcla fue 3% superior.

Canakci *et al.* [41] ensayaron un motor Diesel John Deere, cuatro cilindros, turbo cargado, 57 kW, en modo estacionario utilizando diesel convencional D2 y mezclas con biodiesel de soya. Los autores midieron aumentos del consumo específico de 2.5% para mezclas al 20% y 14% para B100. Justificaron estos resultados al menor poder calorífico del biodiesel alrededor de 12% menor que el del diesel convencional.

Monyen *et al.* [42] también ensayaron un motor Diesel John Deere de cuatro cilindros en modo estacionario con diesel convencional y dos mezclas con biodiesel (uno de ellos oxidado) al 20%. Los autores ensayaron el motor al 100% y 20% de carga a una velocidad constante de 1400rpm y obtuvieron un incremento del consumo específico de 15% para biodiesel puro oxidado y 13.8% para el biodiesel puro sin oxidar respecto al diesel convencional. Los autores también atribuyeron estos resultados al menor poder calorífico del biodiesel.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA DEL ENSAYO

En este capítulo se presenta la matriz de ensayos experimentales empleada para la realización de los ensayos de esta tesis y los parámetros calculados a partir de los datos registrados en estos mismos. Además se describen los equipos e instrumentos utilizados, así como la instalación experimental implementada.

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) empleando un motor de la marca Cummins de encendido por compresión, proveniente de un tracto camión, instalado en un banco de pruebas dinamométrico como se muestra en el esquema de la Figura 2.1.

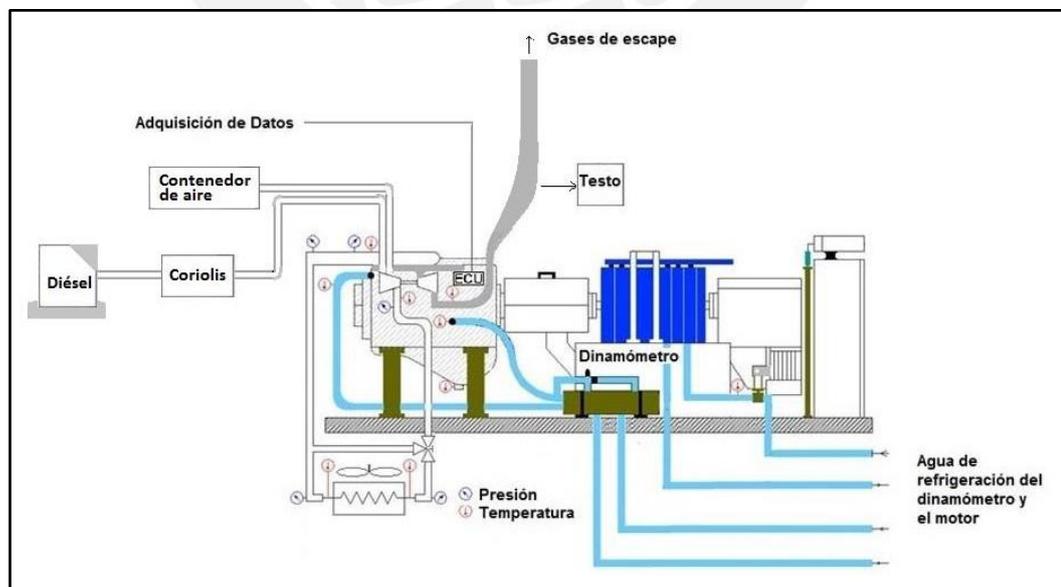


Figura 2.1 - Configuración experimental del motor Cummins instalado en el banco de pruebas

2.1. Matriz de Ensayos Experimentales

Para la realización de la matriz del ensayo se trató de abarcar la mayor cantidad de puntos posibles en los cuales se podía ensayar el motor y así recopilar la mayor cantidad de datos para realizar un análisis más amplio.

Se ensayaron 3 mezclas de diesel con biodiesel variando el porcentaje de este último en relación al diesel convencional en cada ensayo. Las 3 mezclas analizadas fueron de biodiesel con diesel al 5% (DB5), 7.5% (DB7,5) y 10% (DB10).

Se definieron 44 puntos de ensayo comprendidos por 11 velocidades de giro y 4 niveles de carga (9,4, 18,8, 28,2 y 37,5 kPa en términos de presión media efectiva). Las 11 velocidades giro fueron: 2000, 1900, 1800, 1700, 1600, 1500, 1400, 1300, 1200, 1100, y 1000 rpm. Ambas variables fueron establecidas como datos de entrada para cada ensayo y a partir de estas se midieron y calcularon las variables obtenidas en los resultados.

2.2. Datos registrados

Para cada punto de la matriz experimental se midieron los siguientes datos:

- Régimen de giro del motor [rpm]
- Torque [Nm]
- Consumo de combustible diesel [kg/h]
- Presión de admisión de aire [bar]
- Temperatura de admisión del aire [°C]
- Temperatura de los gases de escape [°C]
- Humedad relativa [%]
- Presión diferencial en la placa orificio del medidor de aire [Pa]
- Concentraciones de monóxido de carbono :CO [ppm]
- Concentraciones de óxidos de nitrógeno :NOx [ppm]
- Porcentaje de dióxidos de carbonos CO₂ [%]
- Porcentaje de Oxígeno O₂ [%]

2.4. Preparación de las mezclas

La preparación de las mezclas diesel y biodiesel utilizadas en los ensayos del presente trabajo se realizaron en el Laboratorio de Energía de la PUCP. Para ello se utilizaron diferentes instrumentos de medición con el fin de conseguir la mayor precisión posible (Figura 2.2).

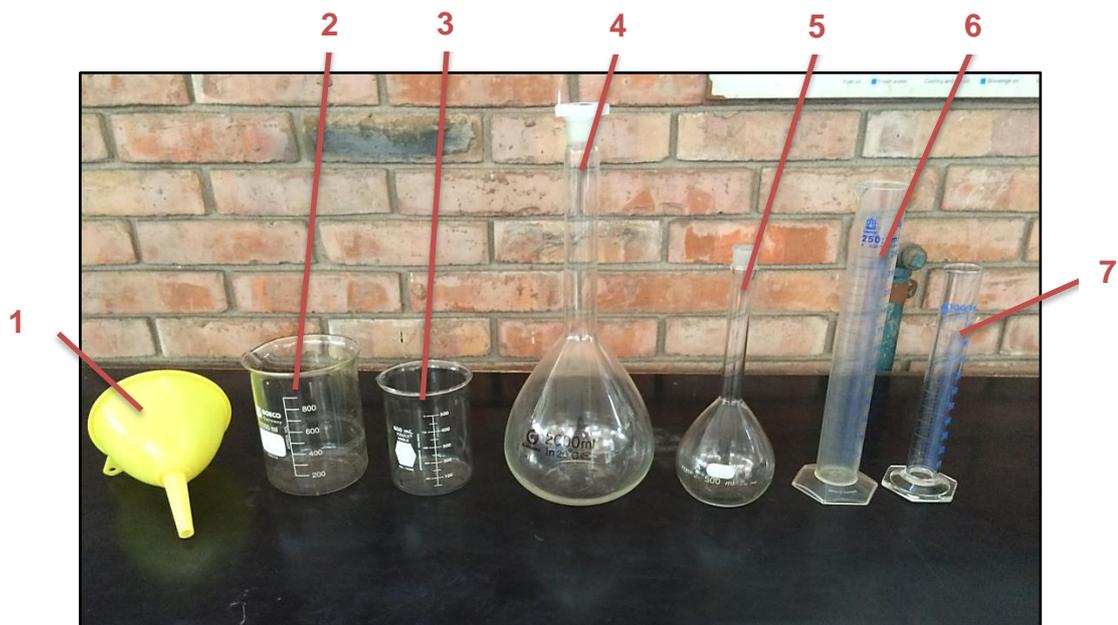


Figura 2.2 - Instrumentos de medición

1 - Embudo pequeño; 2 - Vaso precipitado de vidrio de 800ml, 3 - Vaso precipitado de vidrio de 500ml; 4 - Balón de fondo redondo de 2000ml; 5 - Balón de fondo redondo de 500ml; 6 - Probeta graduada de vidrio de 250ml; 7 - Probeta graduada de vidrio de 100ml

Las 3 mezclas empleadas en los ensayos del presente trabajo fueron de diesel con biodiesel al 5% (DB5), 7,5% (DB7,5) y 10% (DB10). Las mezclas se realizaron utilizando como base el diesel (DB5) que comúnmente se expende en todos los grifos de Lima – Perú. El DB5 cuenta con 5% de biodiesel y tomando como base este combustible se agregó biodiesel (B100) para alcanzar los porcentajes propuestos en la presente tesis.

El Biodiesel (B100) empleado fue de origen vegetal y suministrado por la empresa ALDECO SAC. En el anexo 1 se puede apreciar la ficha técnica proporcionada por el proveedor con las principales características de este biocombustible.

En la Tabla 2.1 se puede apreciar las composiciones volumétricas de las 3 mezclas para 20 litros de combustible, así como, la cantidad de biodiesel (B100) que necesitó agregarse para alcanzar las mezclas DB7,5 y DB10.

Tabla 2.1 – Volúmenes empleados en cada mezcla

Mezcla	DB5	DB7,5	DB10
% B100	5	7,5	10
% Diesel	95	92,5	90
Volumen Diesel DB5 (L)	20	20	20
Volumen B100 (L)	1	1,54	2,11
Volumen total (L)	20	20,54	21,11

Las mezclas se almacenaron en galoneras de 5 galones y se rotularon de la siguiente manera:



Figura 2.3 - Rotulado combustible DB5, DB7,5 y DB10

2.4. Parámetros de desempeño e incertidumbres calculados

2.4.1. Potencia efectiva

La potencia efectiva observada que entrega el motor es también conocida como potencia al freno. Se midió en la salida del eje y fue absorbida por el dinamómetro. Esta depende del torque y el régimen de giro:

$$P_e = T * 2\pi * \frac{n}{60} \quad (2.1)$$

- P_e : Potencia efectiva [kW]
 T : Torque al freno [N.m]
 n : Régimen de giro [rpm]

2.4.2. Presión media efectiva

Es una medida importante para comparar las capacidades de trabajo de los motores, según las diferentes cilindradas. Se define como la presión constante que durante una carrera del pistón, produce un trabajo igual al trabajo efectivo:

$$pme = \frac{W_e}{V_t} = \frac{60 * P_e}{n * V_t * i} \quad (2.2)$$

- pme : Presión media efectiva [bar]
 W_e : Trabajo efectivo del motor [kJ]
 V_t : Volumen desplazado o la cilindrada del motor [m³]
 i : Número de ciclos por vuelta (en un motor de 4 tiempos es $i = 0,5$)

2.4.3. Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible se define como relación entre la masa de combustible por unidad de tiempo y la potencia efectiva del motor.

$$cec_d = \frac{\dot{m}_d}{P_e} \quad (2.4)$$

- cec_d : Consumo específico de combustible [g/kW.h]
 \dot{m}_d : Consumo de combustible diesel [g/h]

2.4.4. Rendimiento efectivo

Es la relación entre la potencia efectiva desarrollada y la energía suministrada por el combustible.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_d * PCI_d} \quad (2.5)$$

η_e : Rendimiento efectivo [%]

\dot{m}_d : Consumo de combustible Diesel [kg/s]

2.4.5. Consumo de aire húmedo y aire seco

Para el cálculo del consumo de la masa de aire húmedo se utilizó un medidor de flujo tipo placa orificio. Pero para ello debemos conocer la densidad del aire en el ambiente, la humedad absoluta del aire y la velocidad del aire a través de la placa. Por lo tanto, primero se definirá la densidad del aire como:

$$\rho_{air} = \frac{P_{atm}}{R_{air} * (273,15 + T_{amb})} \quad (2.6)$$

ρ_{air} : Densidad del aire ambiente [kg/m³]

P_{atm} : Presión atmosférica en [kPa]

R_{air} : Constante del aire ambiente [kJ/kg.K]

T_{amb} : Temperatura del ambiente de trabajo [°C].

Para corregir la constante del aire, se trabaja con la humedad absoluta (w) y la constante del aire ambiente quedaría de la siguiente forma:

$$R_{air} = \frac{R_{air,s} + R_{vapor} * w}{1 + w} \quad (2.7)$$

$R_{air,s}$: Constante del aire seco (0,287 kJ/kg.K)

R_{vapor} : Constante del vapor de agua (0,46152 kJ/kg.K).

Para calcular la humedad absoluta (w) se utilizó la siguiente ecuación de psicrométrica:

$$w = \frac{0,622 * \frac{\varphi_r}{100} * P_{sat}}{P_{atm} - (\frac{\varphi_r}{100} * P_{sat})} \quad (2.8)$$

w : Humedad absoluta [kg/kg]

φ_r : Humedad relativa [%]

P_{sat} : Presión del agua a temperatura ambiente [kPa].

Según Cuisano [14.10] la P_{sat} se define como:

$$P_{sat} = 10^{(30,59051 - 8,2 * \log T_{amb} + 0,0024804 * T_{amb} - 3142,31 / T_{amb})} \quad (2.9)$$

T_{amb} : Temperatura del ambiente de trabajo [K]

Con las fórmulas mencionadas anteriormente se puede calcular el consumo del aire húmedo y aire seco de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{air,hum} = \frac{3600 * \rho_{air} * V_{air} * \pi * d_m^2}{4} \quad (2.10)$$

$$\dot{m}_{air,s} = \frac{\dot{m}_{air,hum}}{1 + w} \quad (2.11)$$

$\dot{m}_{air,hum}$: Consumo de aire húmedo [kg/h]

$\dot{m}_{air,s}$: Consumo de aire seco [kg/h]

ρ_{air} : Densidad del aire ambiente [kg/m³]

d_m^2 : Diámetro utilizado para medir el flujo de aire húmedo [m]

w : Humedad absoluta [kg/kg]

V_{air} : Velocidad del aire en el diámetro medido [m/s]

La velocidad del aire húmedo dentro de la placa orificio se calculará según la ecuación de Bernoulli introduciendo el coeficiente de descarga C_d de la siguiente manera:

$$V_{air} = Cd \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{air}}{\rho_{air}}} \quad (2.12)$$

ΔP_{air} : Presión diferencial del aire entre la placa orificio [Pa]

Cd : Coeficiente de descarga en la placa orificio ($Cd = 0.6$)

2.4.6. Manejo de incertidumbres

El manejo de las incertidumbres en los trabajos experimentales tiene una importancia fundamental al momento de presentar los resultados. El error siempre está presente al momento de tomar medidas experimentales. Presentar un trabajo sin describir las incertidumbres involucradas resta veracidad de los resultados obtenidos [43].

A continuación se presentarán las formulas estadísticas utilizadas para hallar las incertidumbres de medición en los equipos e instrumentos involucrados en la realización de los ensayos de laboratorio del presente trabajo.

- **Incertidumbre de lectura**

Para instrumentos de medición digital, se tomará la resolución dada por el fabricante. Para los instrumentos de medida analógica, la incertidumbre de lectura se calculará como la mitad de la división de la mínima escala mediante la siguiente ecuación [44]:

$$\sigma_L = \frac{div_{me}}{2} \quad (2.13)$$

donde:

σ_L : Incertidumbre de lectura

div_{me} : División menor de la escala del instrumento

- **Incertidumbre estándar**

Es un indicador que mide el promedio de los errores respecto a la media de la muestra. Podemos esperar que al tomar más medidas la media de estas sea más precisa [44]:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (2.14)$$

donde:

- σ_x : Incertidumbre estándar
- σ_{n-1} : Desviación estándar de una muestra
- n : Número de mediciones

- **Desviación estándar de una muestra**

La desviación estándar de una medición es la incertidumbre debido a las fluctuaciones. Es una medida del grado de dispersión de los datos que indica que tan alejados se encuentran estos de la media aritmética [44]:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.15)$$

donde:

- σ_{n-1} : Desviación estándar de una muestra
- x_i : Dato i
- \bar{x} : Media
- n : Número de mediciones

- **Incertidumbre total**

Para calcular la incertidumbre total en una medición, σ_T , se sumarán en cuadratura la incertidumbre de lectura la incertidumbre estándar [44].

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_x^2} \quad (2.16)$$

donde:

- σ_T : Incertidumbre total
 σ_L : Incertidumbre de lectura
 σ_x : Incertidumbre estándar

Para hallar las incertidumbres totales de los valores calculados que dependan de expresiones matemáticas tales como adición y sustracción se utilizará, de manera general, las siguientes expresiones:

Si el valor de "y" depende de N variables x_1, x_2, \dots, x_N , con incertidumbres $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ de la forma:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.17)$$

Entonces la incertidumbre en y es determinada por [44]:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2 \sigma_N^2} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2 \quad (2.18)$$

donde:

- $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)$: Derivada parcial de f respecto de x
 N : Número de variables

2.5. Datos técnicos de los equipos e instrumentos de medición

2.5.1. Motor diesel

Se empleó un motor diesel de la marca CUMMINS proveniente de un tracto camion. El motor es turbo alimentado con intercooler. En la Tabla 2.2 y en la Figura 2.4 se presentan las principales características técnicas del motor y la disposición de este sobre el banco de pruebas.

Tabla 2.2 - Datos técnicos del motor Diesel del Laboratorio de Energía de la PUCP

Marca / Modelo	Cummins / QSB6.7
Aplicación	Vehicular
Sistema de Inyección	Common rail
Volumen barrido	6,7 l
Velocidad nominal	2200 rpm
Potencia nominal	119 kW (160 HP)

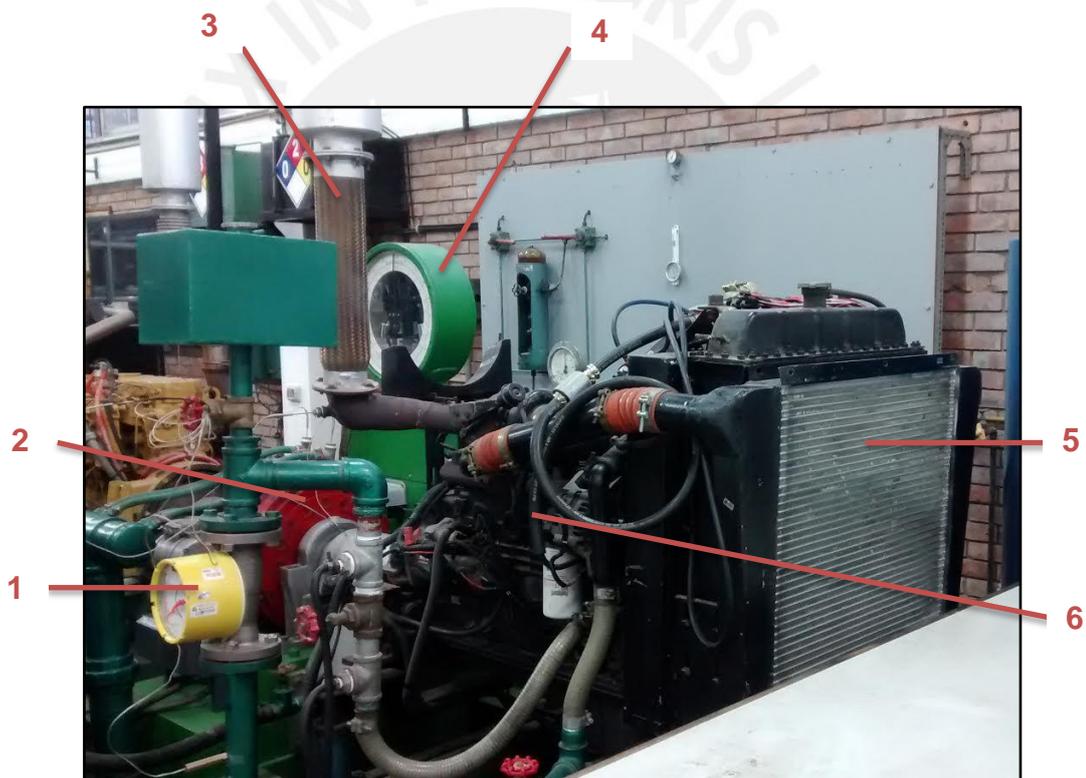


Figura 2.4 - Instalación de motor Cummins QSB 6.7

1 – Rotámetro; 2 – Freno del dinamómetro; 3 – Tubo de escape; 4 – Medidor analógico de torque; 5 Intercooler; 6 Motor Cummins QSB6.7

2.5.2. Dinamómetro

El dinamómetro utilizado es de la marca Zöllner y modelo A-350 instalado en el Laboratorio de Energía. El dinamómetro cuenta con dos posiciones para ser utilizado tanto en el motor Cummins como para el motor Caterpillar. Se encuentra conectado a

un módulo de control donde se puede regular el freno. En la Tabla 2.3 y Figura 2.5 se presentan las principales características técnicas del dinamómetro y la instalación de este mismo.

Tabla 2.3 - Datos técnicos del dinamómetro del Laboratorio de Energía de la PUCP

Marca / Modelo	Zöllner / A-350
Tipo de frenado	campo electromagnético refrigerado por agua
Rangos de torque	0 a 500 Nm y 0 a 1000 Nm
Velocidad máxima	6500 rpm

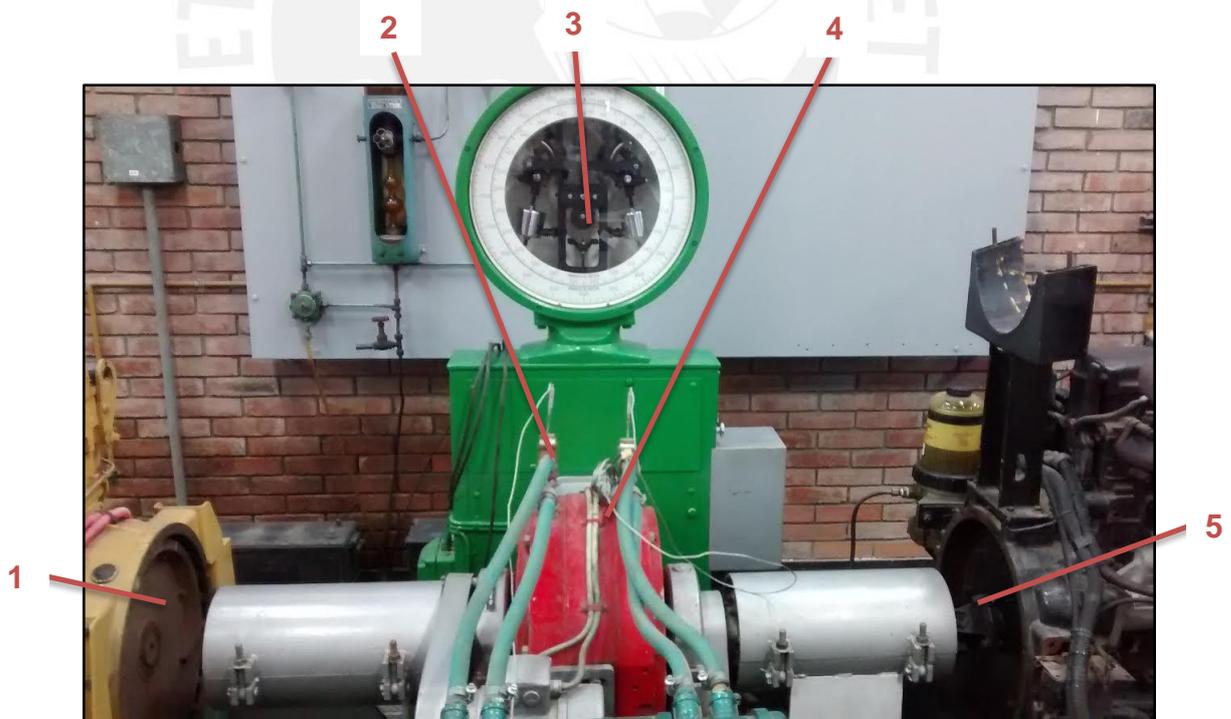


Figura 2.5 - Instalación del dinamómetro Zöllner A-350

1 – Conexión a motor Caterpillar; 2 – Termocuplas de agua de refrigeración; 3 – Medidor analógico de torque; 4 – Freno; 5 - Intercooler; 6 - Conexión a motor Cummins

2.5.3. Módulo de control del banco de pruebas

En el módulo de control del banco de pruebas se encuentran los interruptores de encendido del motor y dinamómetro, medidor digital de rpm, regulador de torque y niveles de presión de aceite y temperatura. Por otro lado, también permite regular el flujo de agua de enfriamiento para el dinamómetro y el motor.

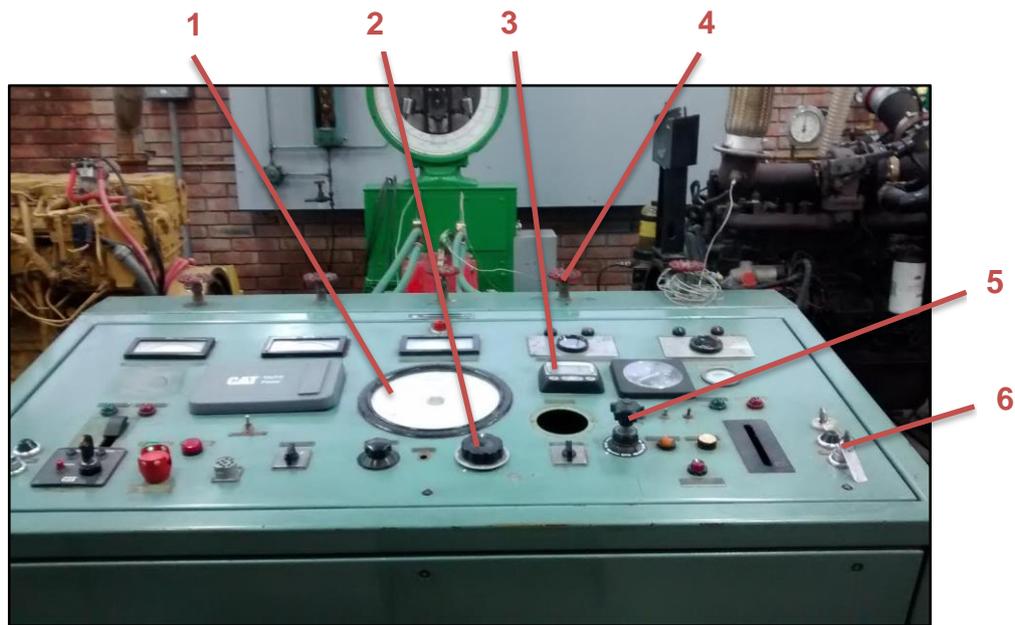


Figura 2.6 - Módulo de control del banco de pruebas

1 – Tacómetro analógico; 2 – Perilla para regular el torque; 3 – Tacómetro digital; 4 – Llave para regular el flujo de agua de refrigeración; 5 - Acelerador; 6 – interruptores del dinamómetro y motor Cummins

2.5.4. Analizador de emisiones portátil

El analizador de emisiones que se empleó para medir los gases expulsados del motor por el tubo de escape es un equipo portátil de la marca Testo, modelo 350 XL. Este equipo está conformado en una unidad de control, una caja analizadora y una sonda de muestreo. El Testo 350 XL está equipado con sensores de O_2 , NO_2 , SO_2 , CO , CO_2 , NO_x y HC.

A través de la sonda de gas, instalada en el tubo de escape del motor, la bomba de transporte obtiene la muestra de los gases para análisis. A continuación, la muestra

del gas se lleva a una unidad condensadora, donde el gas es enfriado, causando una precipitación del condensado con baja absorción de NO_2 , SO_2 . Posteriormente, el condensado es transportado por una bomba peristáltica, a intervalos programados, al tanque de condensado situado en la parte inferior de la caja analizadora. El gas seco pasa a través de un filtro de partículas, donde se retiene el MP. El gas filtrado es luego dirigido hacia los sensores de medición. Aquí, una pequeña porción se difunde a través de los diafragmas de los sensores, que envían una señal (la cual es proporcional a la concentración del contaminante) hacia la unidad de control. Por último, la parte insignificante de gas que no fue utilizado en la medición es liberado [45].

En la Tabla 2.4 y Figura 2.7 a 2.8 se presentan las principales características técnicas del analizador de gases portátil y la instalación de este equipo en el tubo de escape del motor.

Tabla 2.4 - Especificaciones técnicas del equipo analizador de emisiones portátil

Marca / Modelo	Testo / 350 XL
Sensor de CO	Rango de medición: 0-10.000 ppm
	Resolución mínima: 1 ppm
	Incertidumbre: ± 10 ppm (0-99 ppm); $\pm 5\%$ 100-2.000 ppm); $\pm 10\%$ (2001-10.000 ppm)
Sensor de HC	Rango de medición: 100-40.000 ppm
	Resolución mínima: 10 ppm
	Incertidumbre: < 400 ppm (100-4.000 ppm); $\pm 10\%$ (> 4.000 ppm).
Sensor de NO_x	Rango de medición: 0-3.000 ppm
	Resolución mínima: 1 ppm
	Incertidumbre: ± 5 ppm (0-99 ppm); $\pm 5\%$ (100-2.000 ppm); $\pm 10\%$ (2001-3.000 ppm).

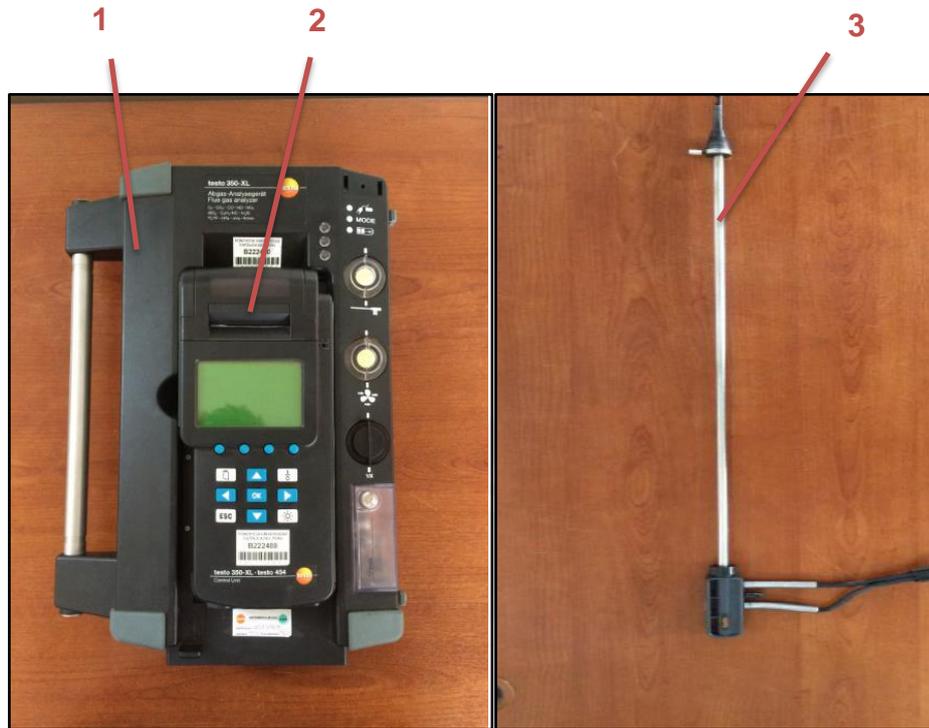


Figura 2.7 - Analizador de gases portátil Testo 350 XL

1 – Analizador; 2 – Unidad portátil; 3 – Sonda



Figura 2.8 - Instalación del Testo 350 XL en el tubo de escape

1 – Sonda; 2 – Tubo de escape

2.5.5. Medidor de flujo másico de combustible

Para medir el flujo de combustible que ingreso al se utilizó un medidor de flujo tipo coriolis de la marca Emerson. El medidor de flujo opera basado en el principio de las fuerzas inerciales que se generan cuando una partícula en un cuerpo rotatorio se mueve con respecto al cuerpo acercándose o alejándose del centro de rotación. En las Figura 2.9 a 2.10 se muestran el medidor de flujo empleado y la instalación del mismo.

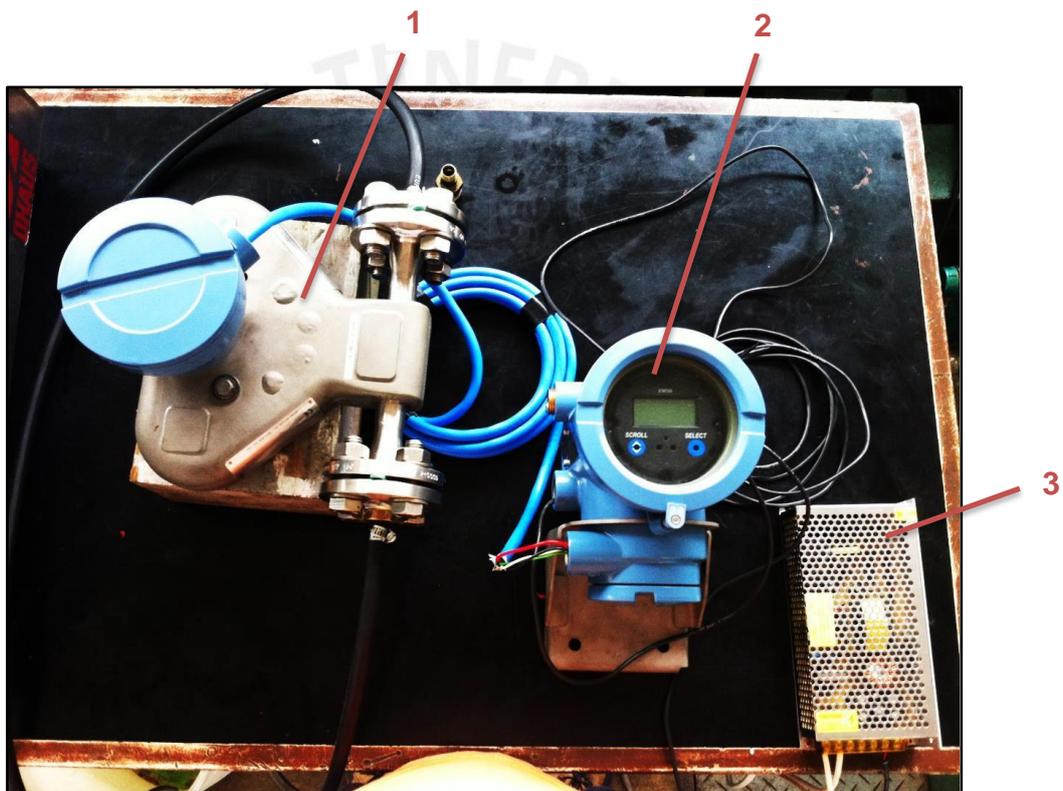


Figura 2.9 - Medidor de flujo tipo coriolis

1 – Medido de flujo Micro Motion Emerson; 2 – Display digital; 3 – Circuito con transductores integrados

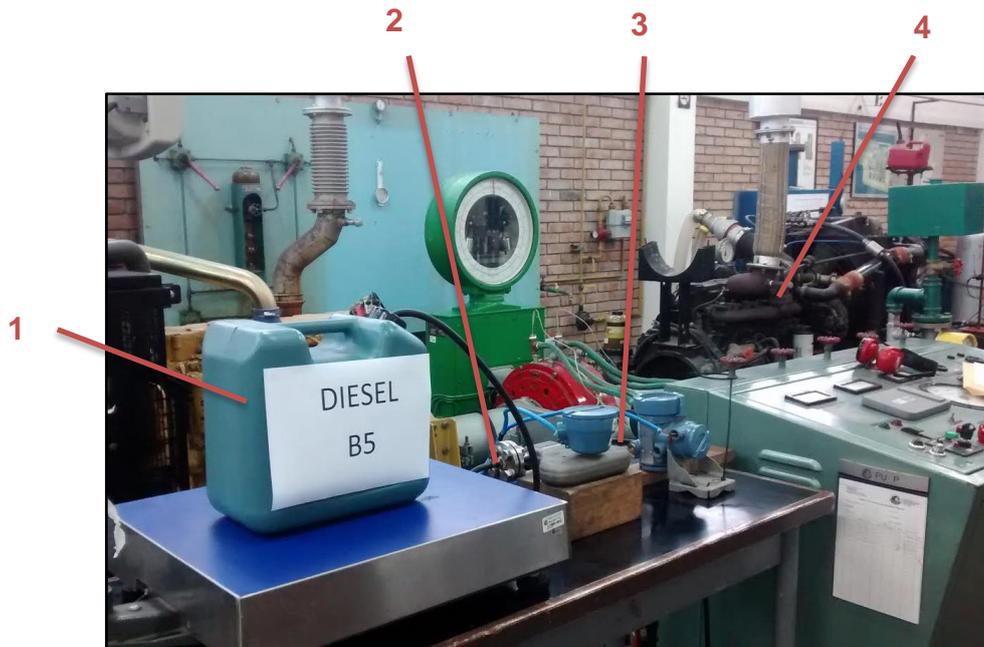


Figura 2.10 - Instalación del medir de flujo

1 – Combustible; 2 – Entrada de combustible al medidor; 3 Salida de combustible hacia el motor; 4 – Motor Cummins

2.5.6. Placa orificio

Para medir el consumo de aire del motor Diesel se utilizó un medidor del tipo placa de orificio (Figura 2.11), instalado en la entrada de un cilindro amortiguador de las pulsaciones del aire admitido. La placa orificio de 73 mm (Figura 2.12) de diámetro se encuentra en la parte superior del cilindro, y posee un coeficiente de pérdida de carga igual a 0,6.

Una placa de orificio es una placa delgada con un agujero en el centro. Normalmente se coloca en un tubo en el que fluye el fluido. Cuando el fluido llega a la placa de orificio, el fluido es forzado a converger para ir a través del pequeño agujero; el punto de máxima convergencia en realidad se produce poco después del orificio en el llamado punto de la vena contracta. Más allá de la vena contracta, el fluido se expande y el cambio de velocidad y presión ocurre una vez más. La medición del consumo de aire fue obtenido a través del registro de la diferencia de presión (antes y después de la placa de orificio) mediante un micromanómetro diferencial digital de marca Dywer cuyo rango es de 0-40 pulgadas de agua (Figura 2.13).



Figura 2.11 - Instalación del cilindro amortiguador

1 – Manguera de conexión hacia el motor; 2 – Cilindro amortiguador; 3 Placa orificio



Figura 2.12 - Placa orificio



Figura 2.13 - Micromanómetro diferencial

2.5.7. Higrómetro

Para la medición de las condiciones ambientales durante los ensayos se utilizó un higrómetro el cual registró la humedad y temperatura del aire de la sala de ensayo.



Figura 2.14 - Higrómetro

2.5.8. Programa Insite del motor Cummins

Este programa proporciona información de los valores de medida y calculados por el módulo de control del motor Cummins QSB 6.7 tales como presión en el múltiple de admisión, temperatura de admisión, presión de inyección de diesel, presión en la

cámara de combustión, consumo ordenado de combustible, carga del motor, velocidad del motor etc. Sin embargo, de acuerdo al alcance de este trabajo solo se registró las siguientes variables:

1. Carga porcentual (%)
2. Gasto ordenado de combustibles (gph)
3. Porcentaje de palanca del acelerador (%)
4. Velocidad del motor (rpm)

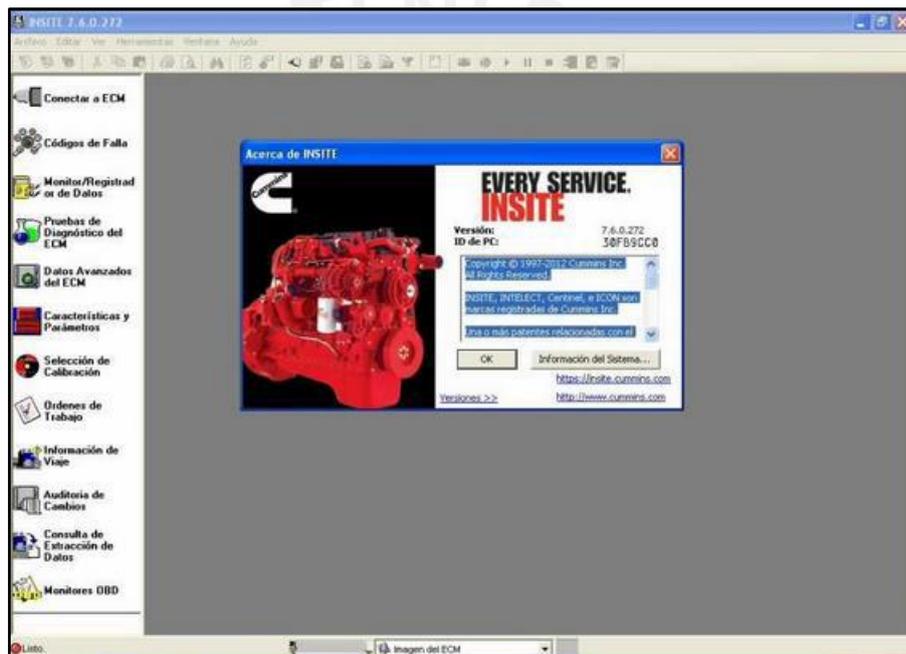


Figura 2.15 - Programa Insite Cummins

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán y analizarán los resultados para las variables obtenidas y calculadas en los ensayos realizados al motor Cummins. Se mostrarán gráficos para 4 velocidades (1000 rpm, 1300 rpm, 1600 rpm y 2000 rpm) considerando 4 niveles de carga en términos de presión media efectiva (9,4 kPa, 18,8 kPa, 28,2 kPa y 37,5 kPa)

3.1. Potencia efectiva observada

En las Figuras 3.1 a 3.2 presentadas a continuación se puede observar que, de modo general, la potencia efectiva aumenta conforme aumenta la velocidad del motor. Esto se debe a que la potencia efectiva depende de la velocidad de giro y la carga del motor. En los ensayos realizados, ambos valores fueron establecidos como datos de entrada por lo que los valores de potencia efectiva, para las 3 mezclas de combustibles (DB5, DB7.5, DB10), resultaron bastante similares a una velocidad y carga constante.

En la Figura 3.2 se observa que el valor más alto calculado para la potencia efectiva es de 41,5 kW a 2000 rpm y 37.5 kPa mientras que el valor más bajo llegó a 5,30 kW y se obtuvo para 1000 rpm a 9,4 kPa (Figura 3.1). Para las velocidades intermedias de 1300 rpm y 1600 rpm los valores máximos obtenidos fueron 27,3 kW y 33,7 kW; mientras que los valores mínimos obtenidos fueron 6,8 kW y 8,3 kW respectivamente.

La potencia efectiva está directamente relacionada con los parámetros efectivos del motor por lo que la presentación de estos resultados es de vital importancia para

comprender, por ejemplo, las tendencias de consumo específico de combustible (Figuras 3.6 a 3.9) y el rendimiento efectivo (Figuras 3.7 a 3.10).

En el anexo A2.1 se puede constatar que las incertidumbres asociadas a las mediciones de potencia y presión media efectiva siempre fueron inferiores a 0,5 kW y 0,8 kPa respectivamente.

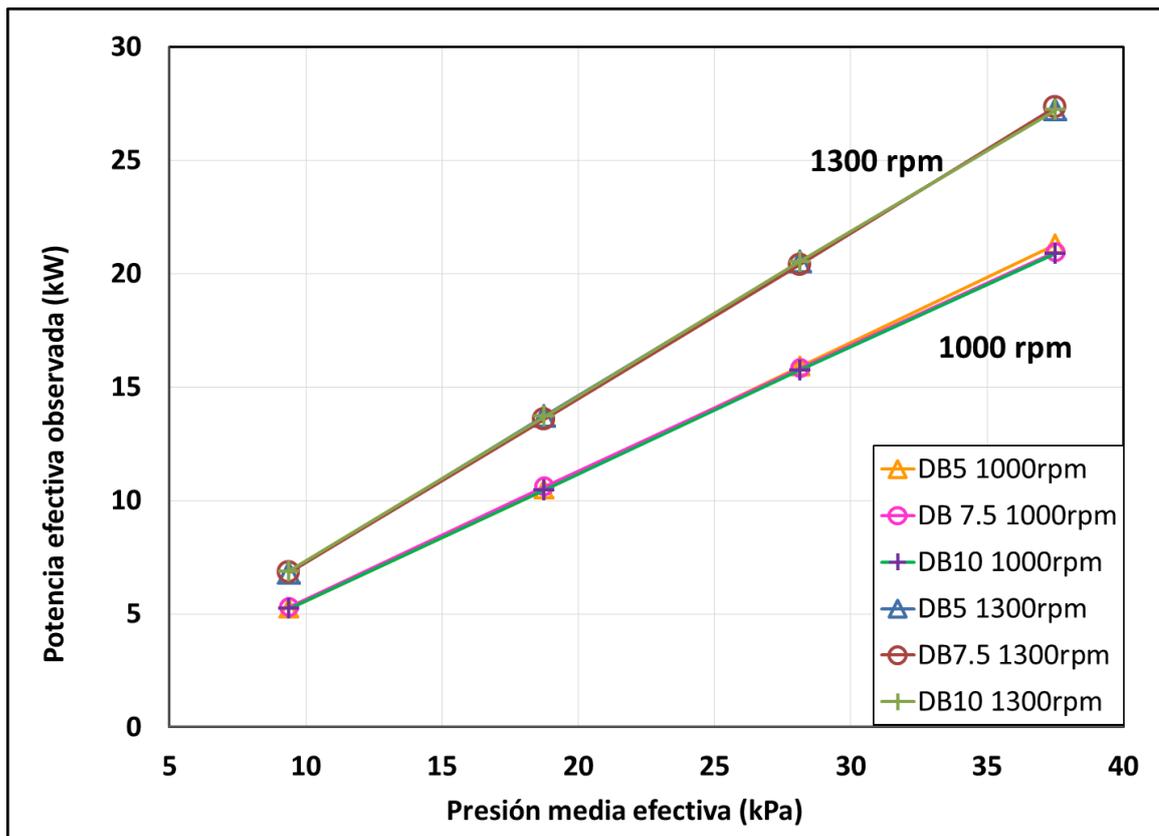


Figura 3.1 - Potencia efectiva observada vs Presión media efectiva @ 1000 rpm y 1300 rpm

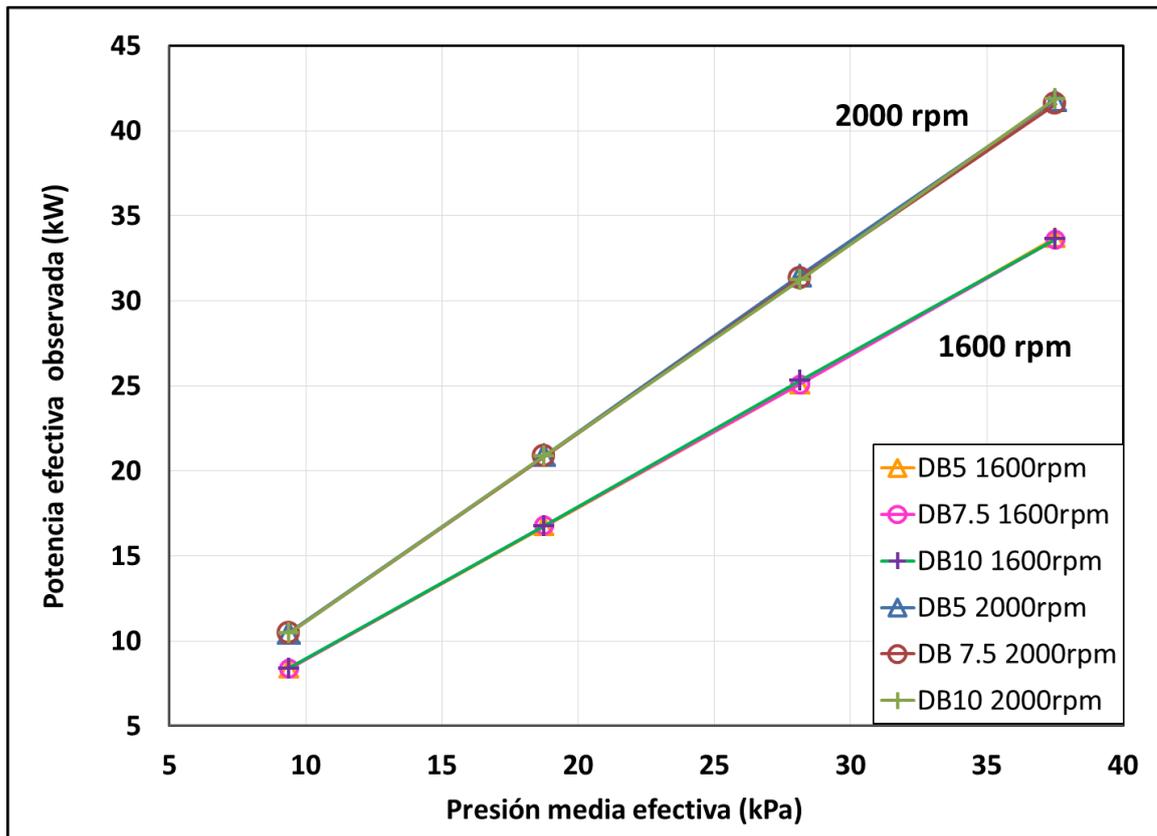


Figura 3.2 - Potencia efectiva observada vs Presión media efectiva @ 1600 rpm y 2000 rpm

3.2. Consumo específico de combustible

Como se puede apreciar en las Figuras 3.3 a 3.6, consumo específico de combustible disminuye a medida que aumenta la presión media efectiva. Esta tendencia es independiente de la velocidad del motor y de la mezcla utilizada, ya que la potencia efectiva es un variable calculada para una velocidad y carga preestablecida como datos de entrada del ensayo.

Los valores más altos se registraron para una velocidad de 2000 rpm, alrededor de 740 g/kw.h (Figura 3.6), mientras que los menores valores para una velocidad 1000 rpm (247 g/kw.h) ambos a 37,5 kPa (Figura 3.3) donde la potencia efectiva alcanza sus valores más altos en este protocolo de pruebas.

El menor consumo específico de combustible demuestra el mejor aprovechamiento del motor para producir un trabajo útil y está relacionado directamente con la eficiencia efectiva del motor. En los ensayos realizados, esta condición se encontró a la menor velocidad de giro y mayor presión media efectiva (Figura 3.3).

Por otro lado, para una velocidad y carga constante el consumo específico de combustible aumenta conforme se incrementa el porcentaje de biodiesel en la mezcla con diesel. La explicación a este aumento se puede atribuir al menor contenido energético del biodiesel por unidad de masa (12% menor aproximadamente) respecto al diesel puro. En otras palabras, para obtener la misma potencia en el motor, el menor contenido energético del biodiesel debería ser compensado con un mayor consumo de combustible. Se encontró aumentos de hasta 4 % para una velocidad de 1000 rpm (Figura 3.3) y 4.5% para 2000 rpm (Figura 3.6), ambas para la mezcla DB10 y a la presión media efectiva máxima ensayada de 37,5 kPa. Estos resultados se justifican debido al menor poder calorífico inferior de la mezcla DB10 y que a 37,5 kPa la potencia alcanza sus mayores valores.

Para las velocidades intermedias de 1300 rpm (Figura 3.4) y 1600 rpm (Figura 3.5) también se aprecia un incremento porcentual en el consumo específico de combustible de las mezclas y sus valores están entre 1.5% y 3.5%. Estos resultados son bastante similares a los encontrados en la literatura consultada del presente trabajo. Por ejemplo Turrio-Baldassarri *et al.* (2004) y Canakci *et al.* (2001) encontraron incrementos de 3% y 2,5% respectivamente sobre los consumos específicos originales con diesel convencional al usar mezclas con 20% de biodiesel en motores de similares prestaciones.

En el Anexo A2.2 se puede constatar que las incertidumbres asociadas a las mediciones de consumo específico de combustible y presión media efectiva siempre fueron inferiores a 9.5 g/kW.h y 0,8 Kpa respectivamente.

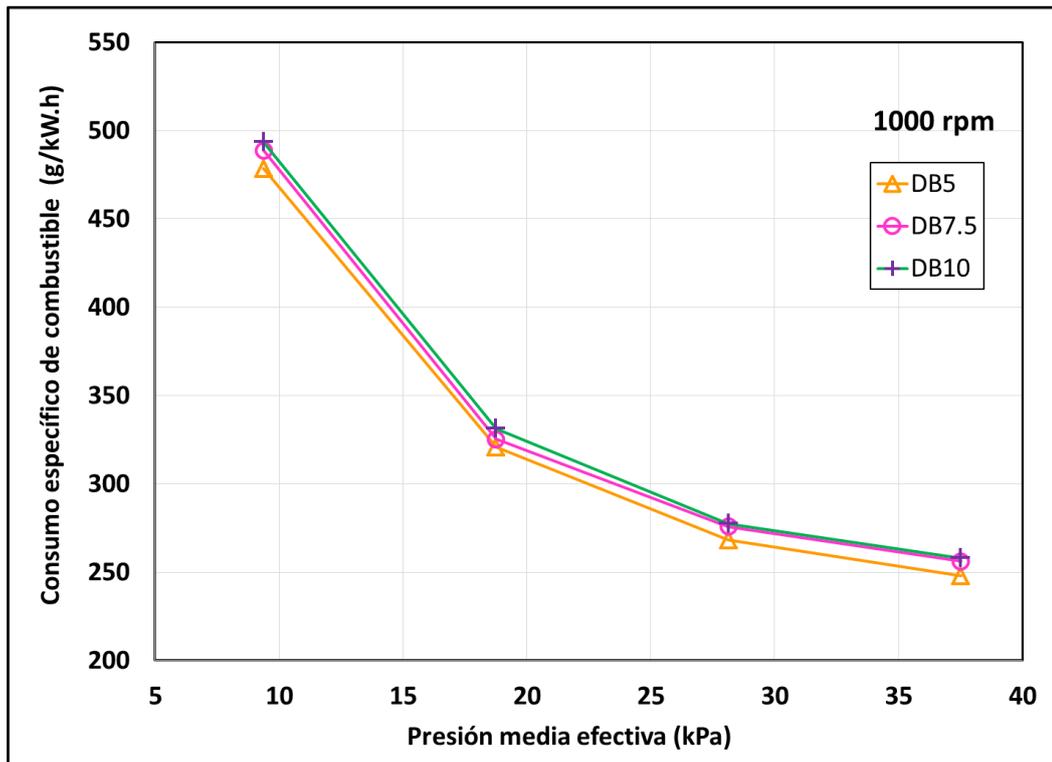


Figura 3.3 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1000 rpm

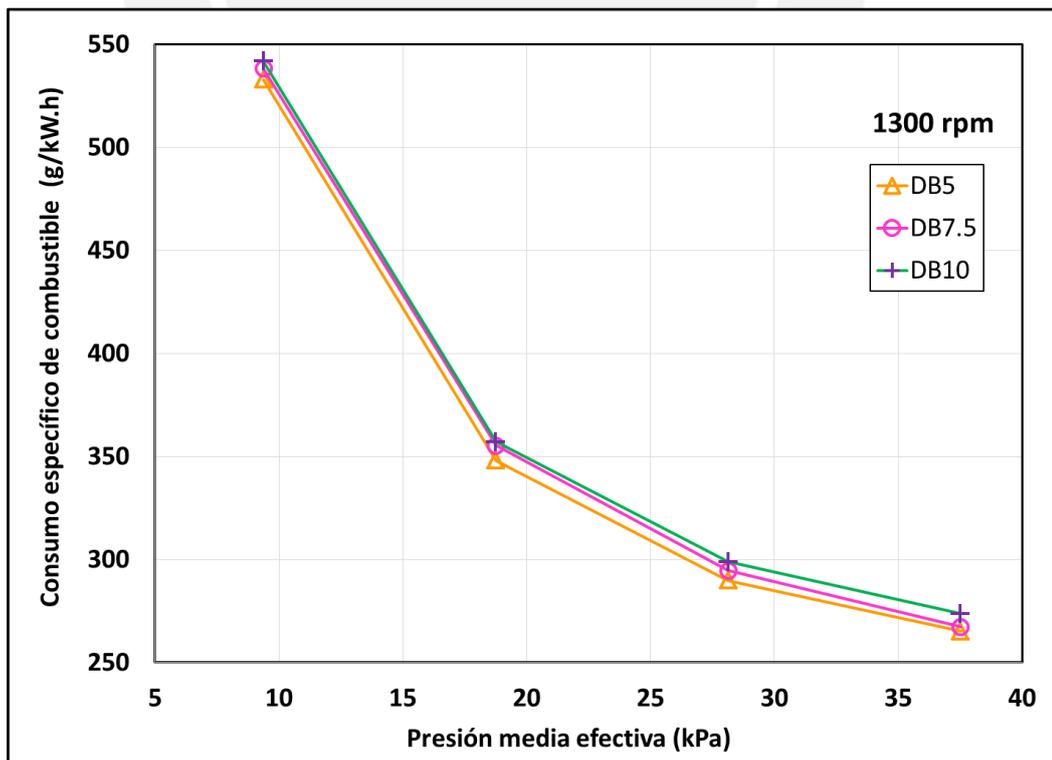


Figura 3.4 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1300 rpm

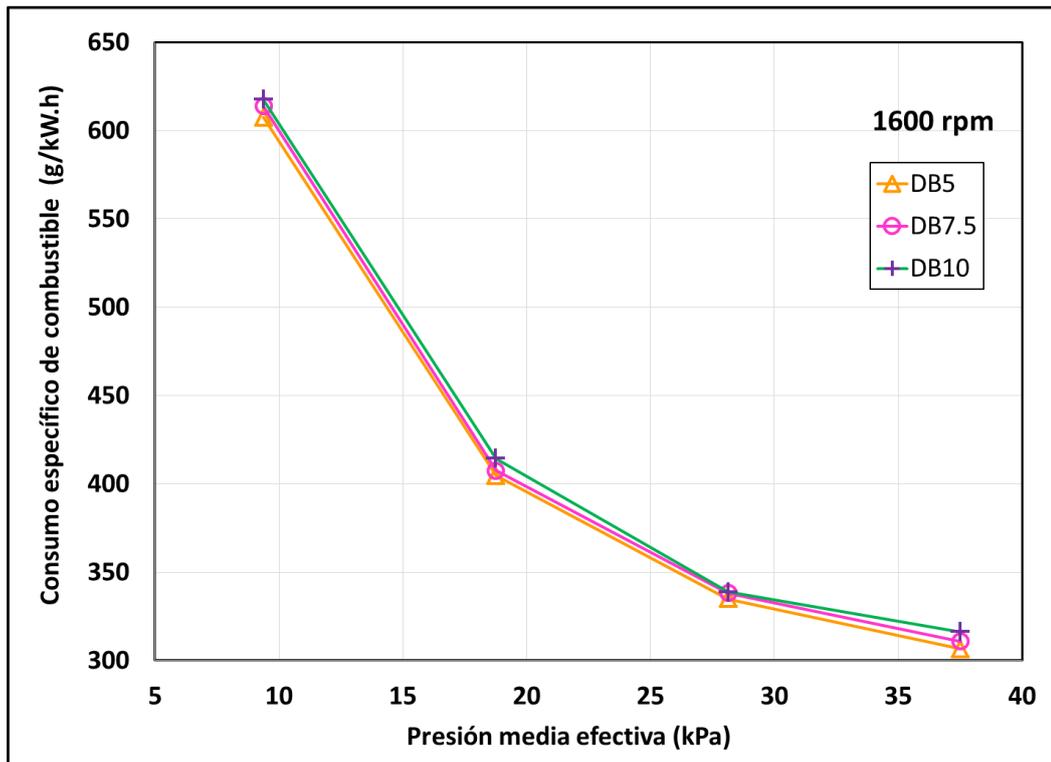


Figura 3.5 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 1600 rpm

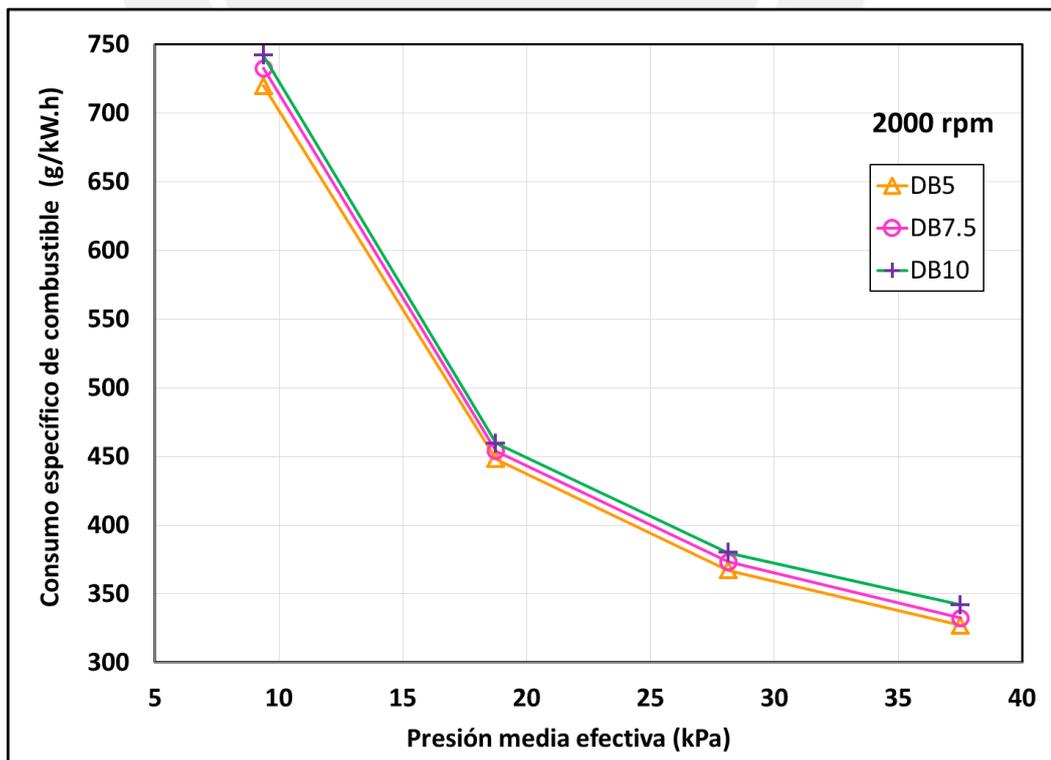


Figura 3.6 - Consumo específico de combustible vs Presión media efectiva @ 2000 rpm

3.3. Rendimiento efectivo

En las Figuras 3.7 a 3.10 se presenta los resultados del rendimiento efectivo versus la presión media efectiva. Se puede apreciar que el rendimiento aumenta conforme incrementa se la carga en el motor. El rendimiento efectivo es un parámetro que indica la eficiencia que tiene el motor para transformar la energía obtenida del combustible en energía mecánica y alcanza su pico más alto cuando el consumo específico alcanza su valor más bajo. Por lo tanto, conforme aumenta la carga en el motor, este tiende a aprovechar mejor la energía suministrada por el combustible.

El rendimiento efectivo más alto se encontró a la menor velocidad ensayada 34% (Figura 3.7) y su valor más bajo a la velocidad más alta, 26% (Figura 3.10), ambas para la mezcla DB5 y a la presión media más alta.

Para obtener un valor del rendimiento efectivo mucho más preciso, se requirió realizar un balance con los poderes caloríficos inferiores de cada combustible (diesel y biodiesel) y el consumo másico de los mismos (ecuación 2.5), ya que conforme se incrementaba el porcentaje de biodiesel en la mezcla el contenido energético de esta misma disminuía. Es por esta razón que, al realizar los ensayos a una misma carga y velocidad, el rendimiento efectivo para las mezclas más altas (DB7,5 y DB10) tiende a ser menor que el de la mezcla con 5% de biodiesel (DB5). Si bien es cierto que las tendencias de las mezclas son bastante similares, se puede apreciar que el rendimiento efectivo es ligeramente mayor cuando el porcentaje de biodiesel en la mezcla es menor. El incremento más resaltante se presentó a 1000 rpm entre DB5 y DB10 (Figura 3.7) alcanzando una diferencia porcentual de 4% para la máxima carga.

En el Anexo A2.3 se puede constatar que las incertidumbres asociadas a las mediciones de rendimiento efectivo y presión media efectiva siempre fueron inferiores a 0,81 % y 0,8 kPa respectivamente.

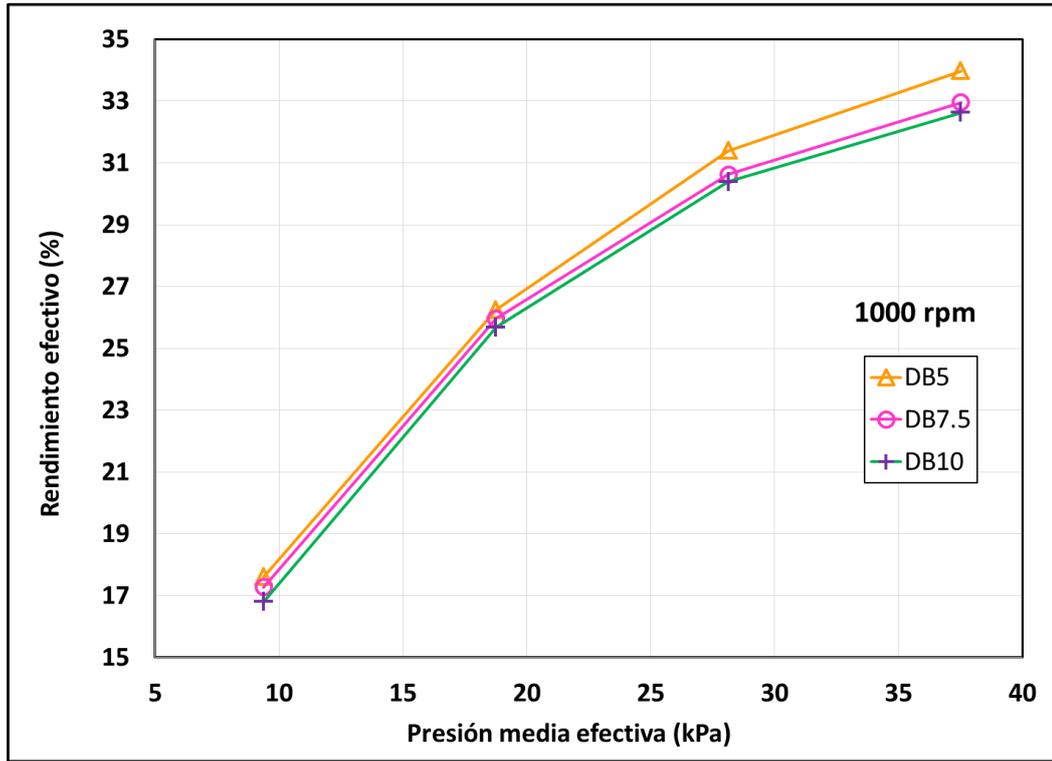


Figura 3.7 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1000 rpm

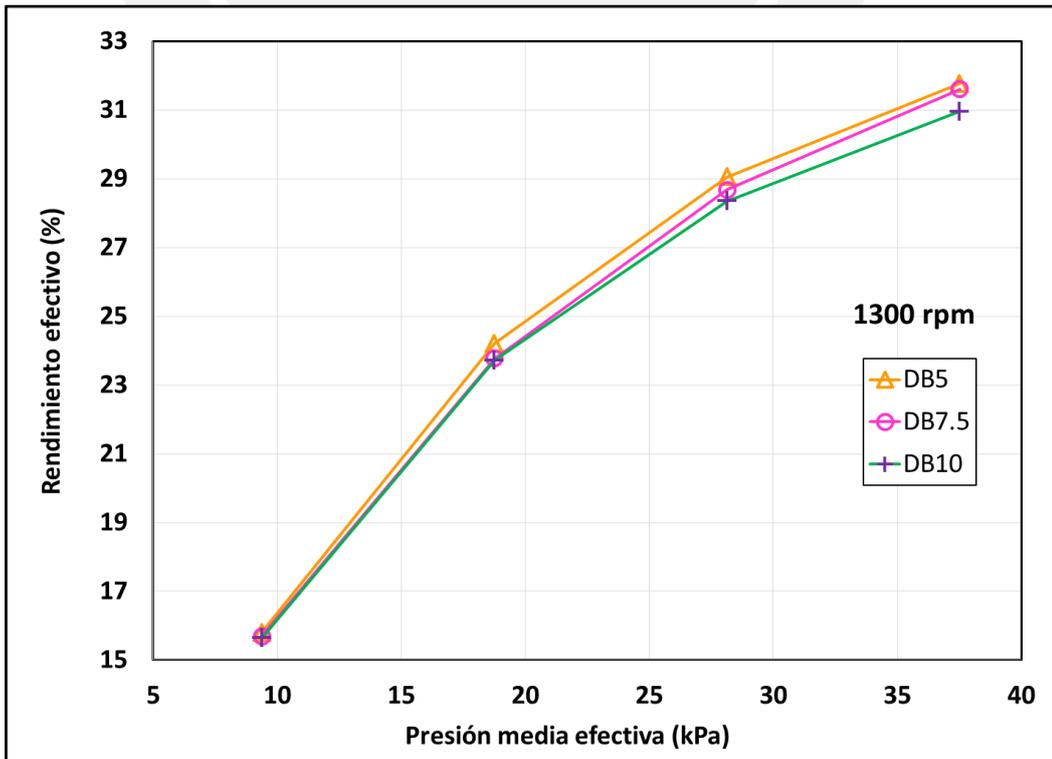


Figura 3.8 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1300 rpm

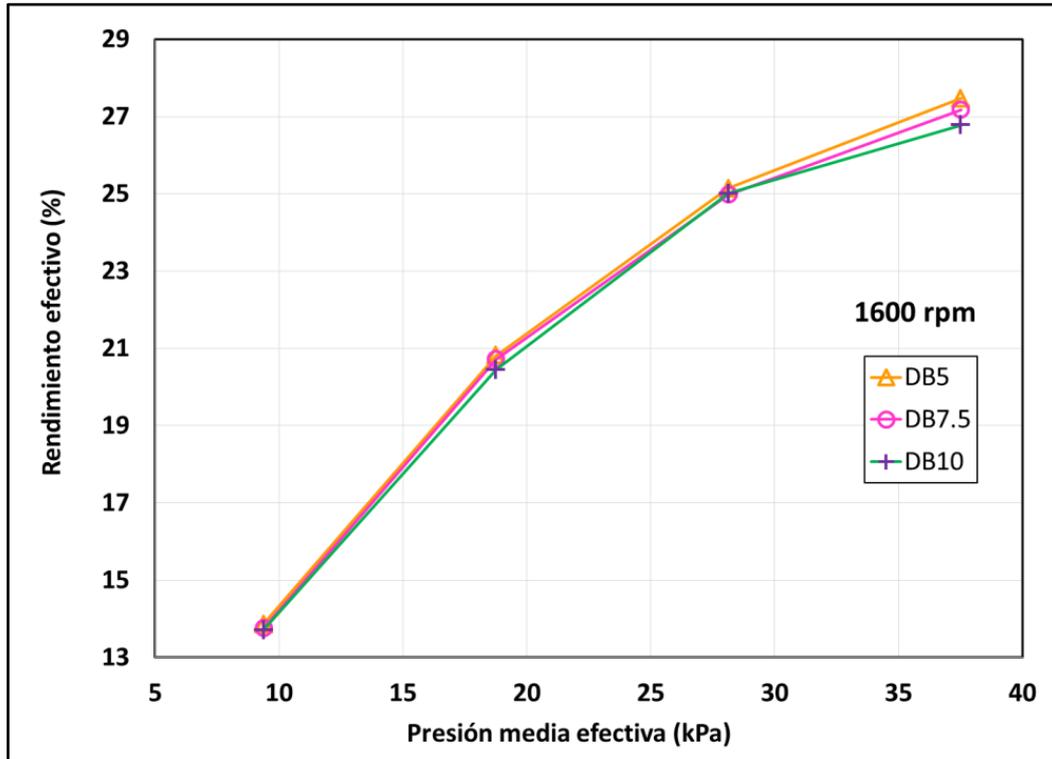


Figura 3.9 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 1600 rpm

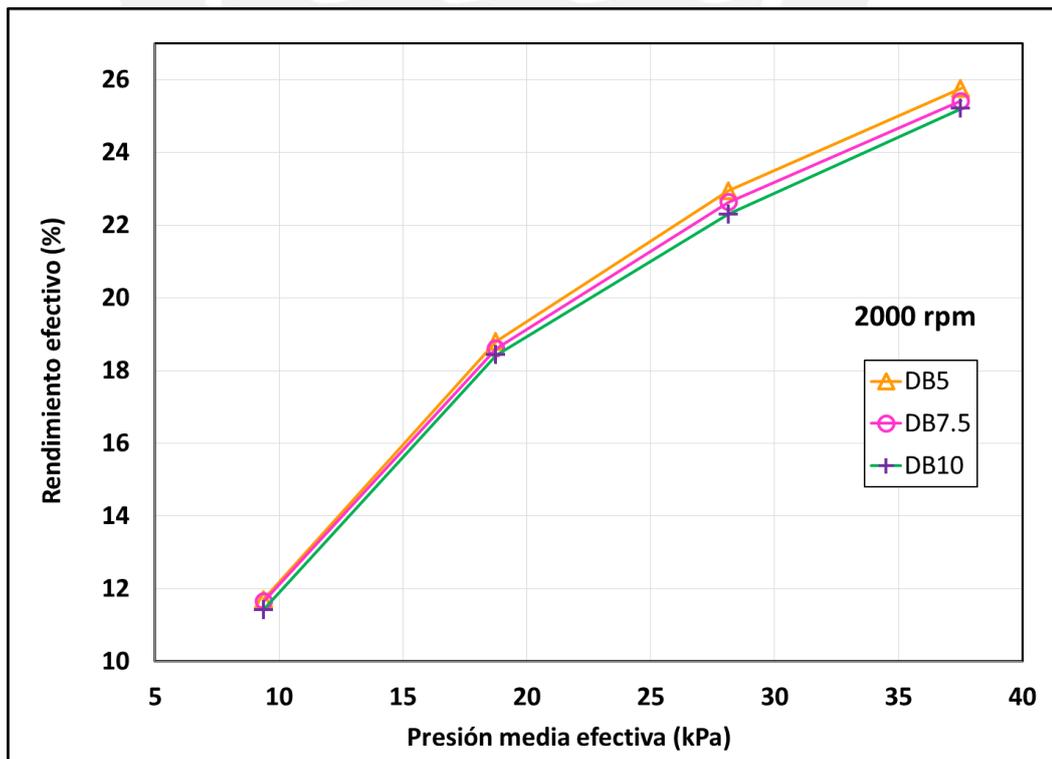


Figura 3.10 - Rendimiento efectivo vs Presión media efectiva @ 2000 rpm

3.4. Temperatura de gases de escape

En las figuras 3.11 a 3.14 se observan los gráficos de la temperatura de gases de escape versus presión media efectiva. Claramente se observa una tendencia creciente de la temperatura de los gases de escape conforme se aumenta la carga. De la misma manera, al aumentar la velocidad de giro también aumenta esta temperatura. A la velocidad de 1000 rpm se registraron los valores de temperatura más bajos (Figura 3.11) mientras que los valores más altos se registraron para 2000 rpm (Figura 3.14).

En las 4 figuras se puede apreciar que la temperatura de los gases de escape de la mezcla más baja (DB5) es ligeramente más alta que la de las otras mezclas (DB7,5 y DB10) y esta tendencia se hace más marcada a mayores cargas. En la Figura 3.14 se puede apreciar la diferencia más alta registrada en los ensayos. Su valor es de 8°C y se encuentra entre las mezcla DB5 y DB10 a 28,1 Kpa. Es importante resaltar que incertidumbre de la termocupla tipo K está alrededor de $\pm 4^\circ\text{C}$.

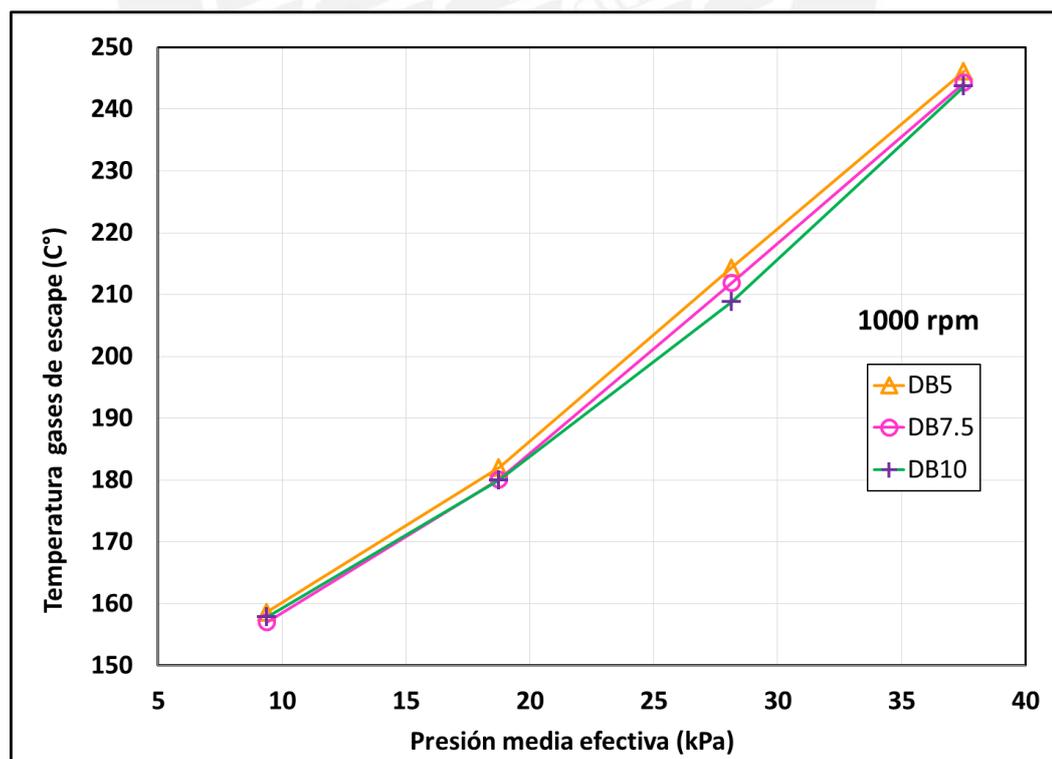


Figura 3.11 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1000 rpm

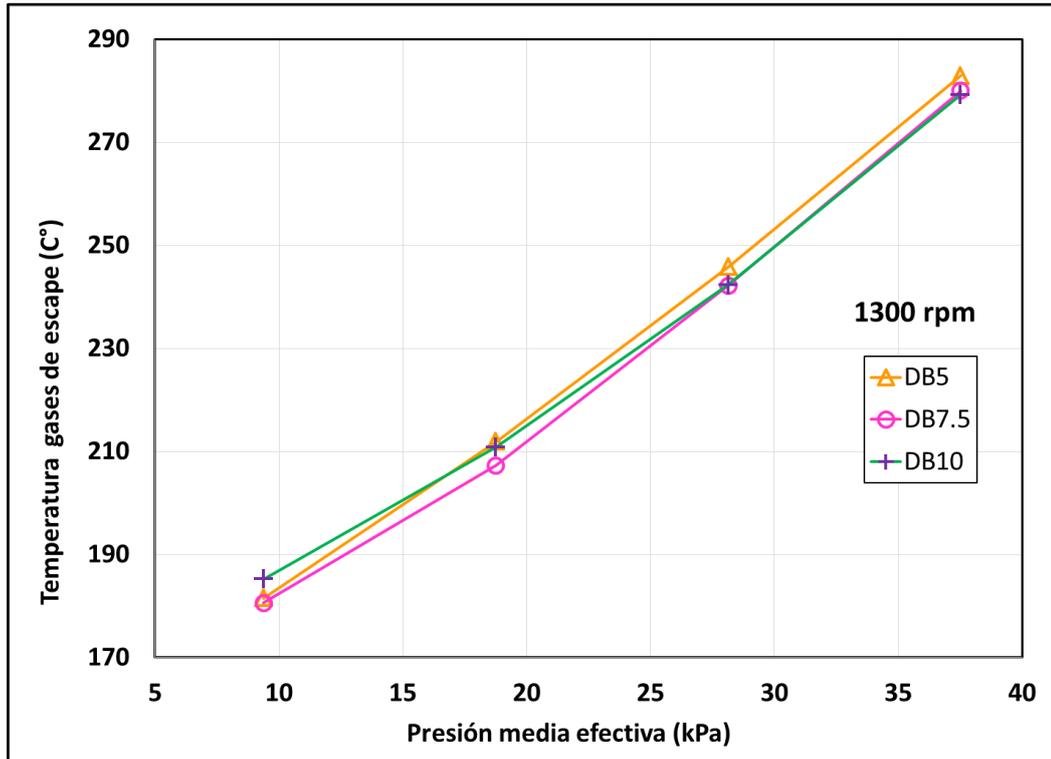


Figura 3.12 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1300 rpm

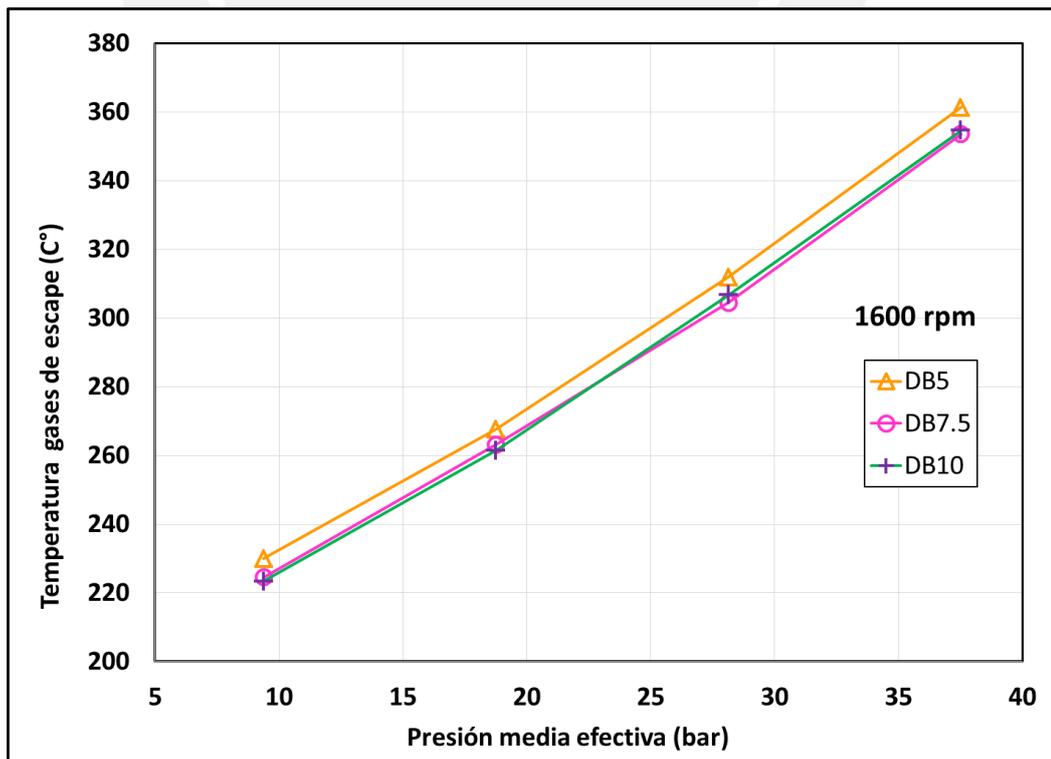


Figura 3.13 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 1600 rpm

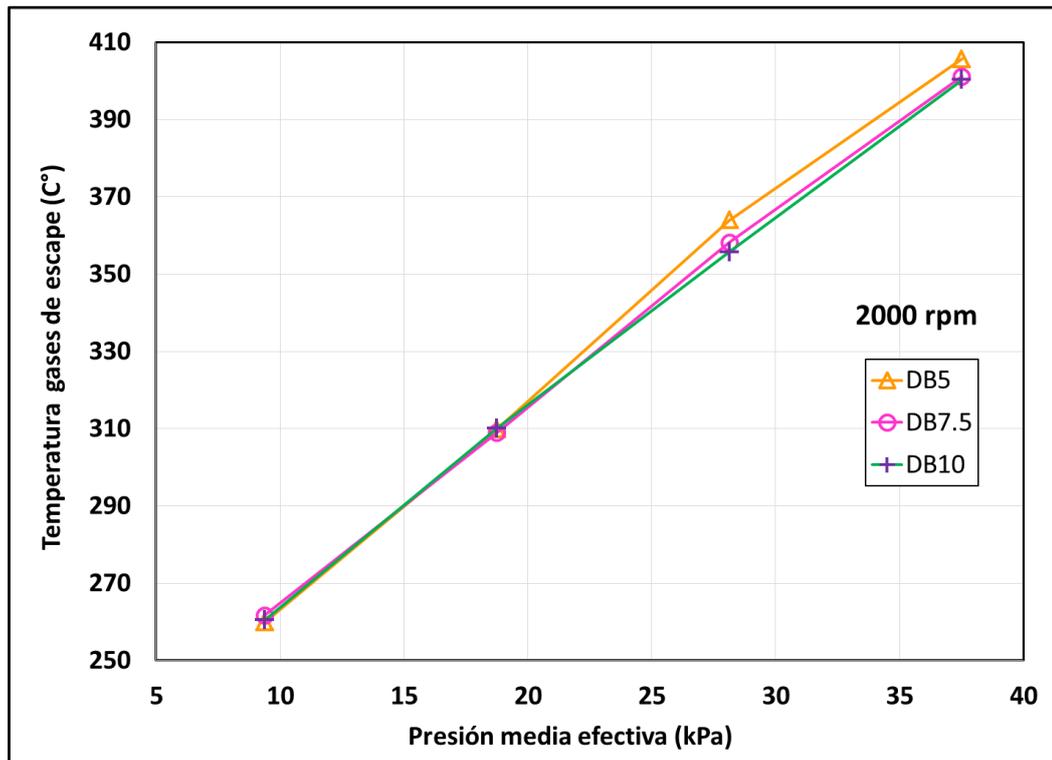


Figura 3.14 - Temperatura de gases de escape vs Presión media efectiva @ 2000 rpm

La temperatura más baja registrada fue 157 °C para la mezcla DB10 a 1000 rpm y 9,4 kPa (Figura 3.11) mientras que la temperatura máxima registrada fue 405 °C para la mezcla DB5 a 2000 rpm y 37,5 kPa (Figura 3.14).

3.5. Monóxido de carbono

Como se observa en las Figuras 3.15 a 3.18 las emisiones de monóxido de carbono aumentan conforme se incrementa la velocidad y carga en los ensayos. Los valores más altos de CO (Figura 3.18) fueron obtenidos con la mezcla con menos porcentaje de biodiesel (DB5) a 2000rpm y a la presión media efectiva más alta (37,5 kPa).

Para los 3 combustibles ensayados (DB5, DB7,5 y DB10), el CO disminuye conforme se aumenta el contenido de biodiesel en las mezclas. La disminución porcentual más alta encontrada fue de 4,26% y se obtuvo entre la mezcla DB5 y DB10 a 1000 rpm y 28,1 kPa (Figura 3.15)

Estos resultados son coherentes con los hallazgos reportados en la literatura del presente trabajo, donde la mayoría de investigaciones consultadas recogen descensos significativos de CO cuando se sustituye el combustible diesel convencional por biodiesel. Krahl *et al.* (2003) y Peterson *et al.* (1996) ensayaron motores turbo cargados de similares prestaciones y encontraron descensos de aproximadamente 50% de CO al utilizar biodiesel puro (B100)

El CO se genera a partir de la combustión incompleta del combustible y alcanza sus mayores valores cuando la mezcla de aire/combustible es más pobre. Una de las principales razones por la cual las concentraciones de CO disminuyen conforme se aumenta el contenido de biodiesel en las mezclas es que este biocombustible tiene un mayor contenido de oxígeno el cual permite una mejor combustión mejorando la oxidación del CO dentro del cilindro.

Otra explicación asociada a la disminución de las concentraciones de CO es el mayor número de cetano del biodiesel respecto al diesel convencional. El número de cetano es un indicador de la calidad ignición del combustible y guarda relación con la homogeneidad de la mezcla aire/combustible dentro de la cámara de combustión. El mayor número de cetano del biodiesel permite que el combustible se auto inflame más rápido, una vez inyectado, evitando la formación zonas ricas de combustible dentro de la cámara logrando una mezcla más uniforme y por consiguiente una combustión más eficiente.

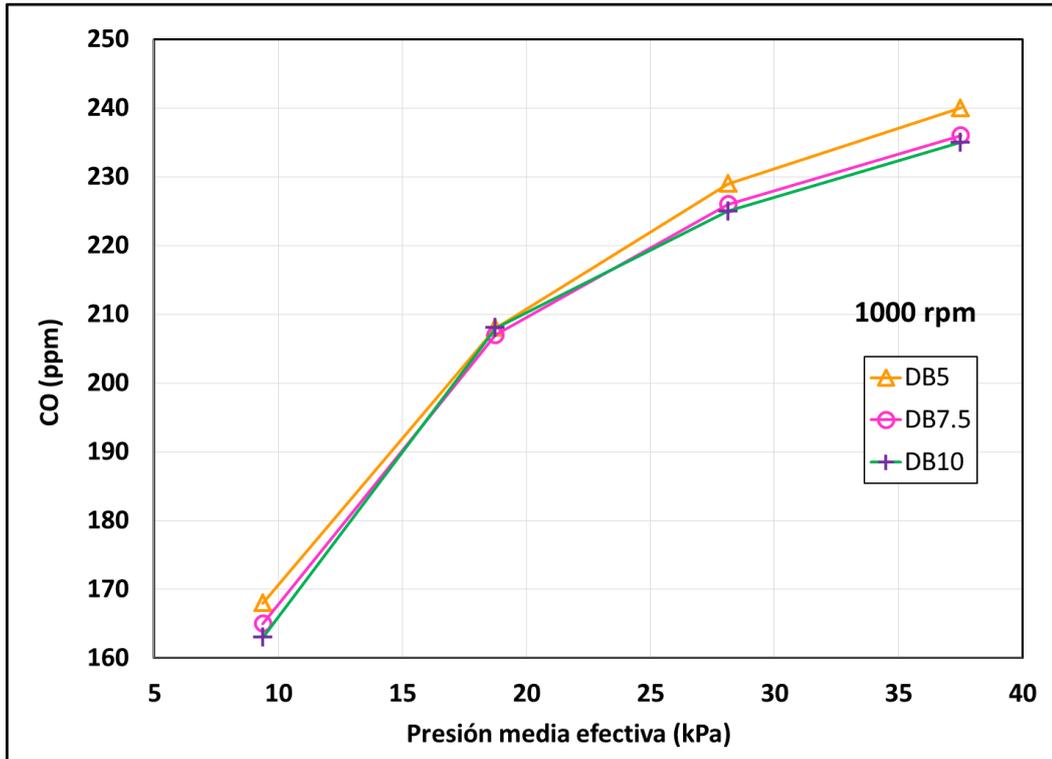


Figura 3.15 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1000 rpm

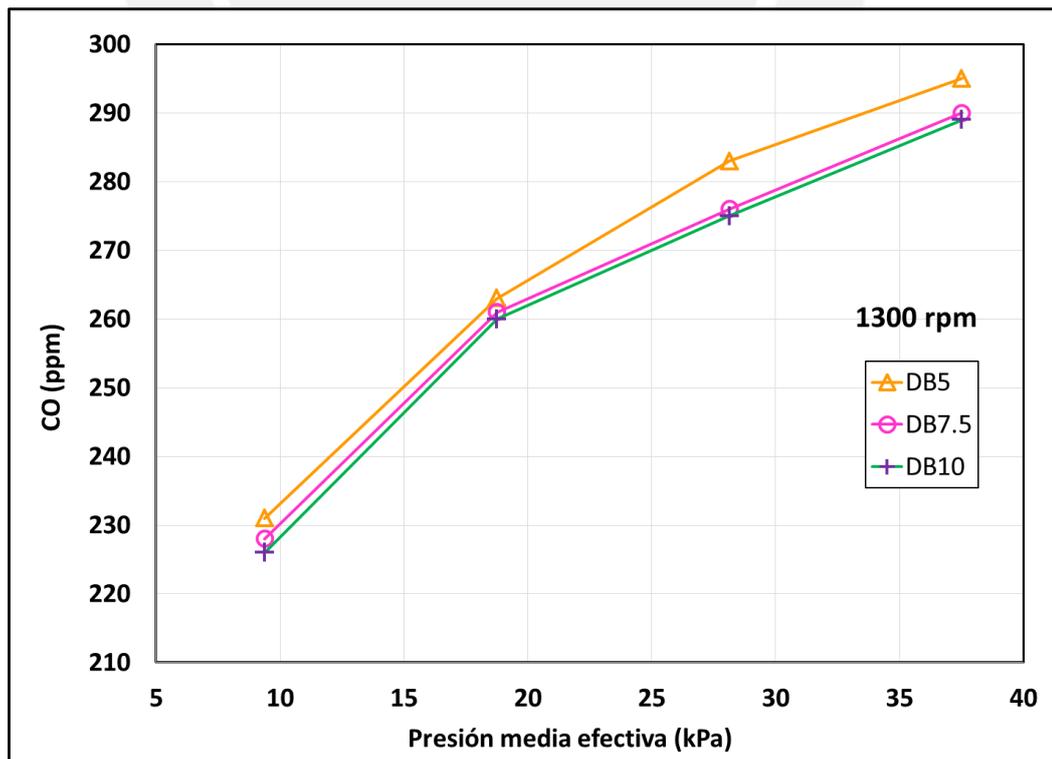


Figura 3.16 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1300 rpm

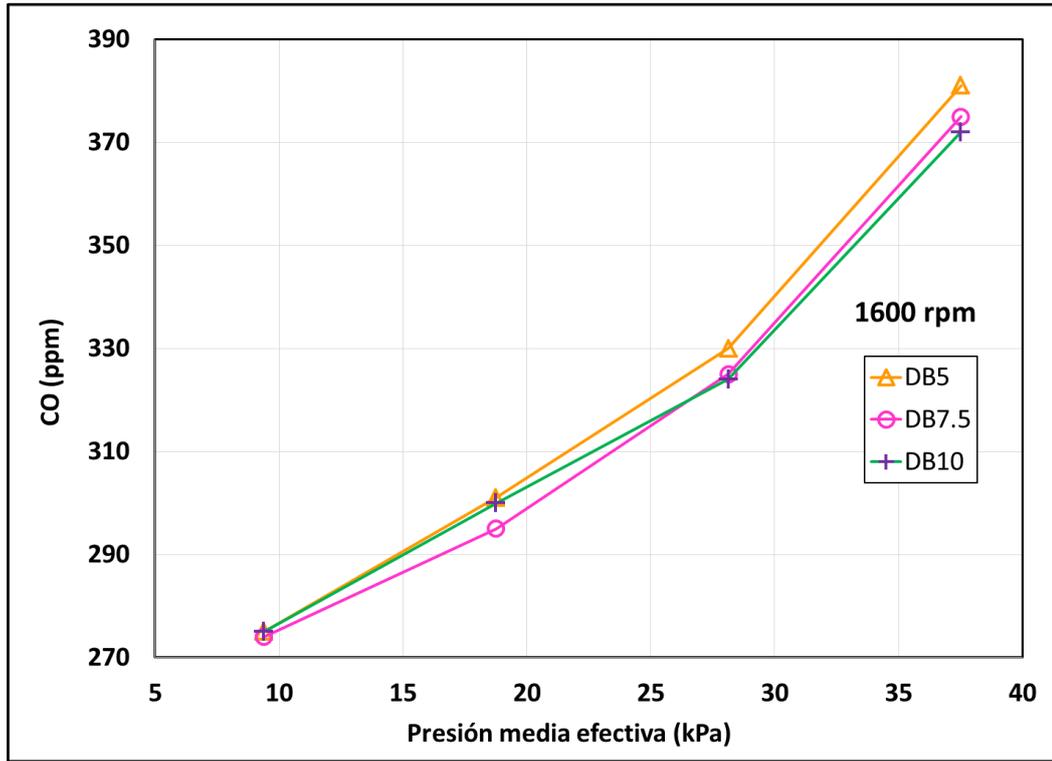


Figura 3.17 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1600 rpm

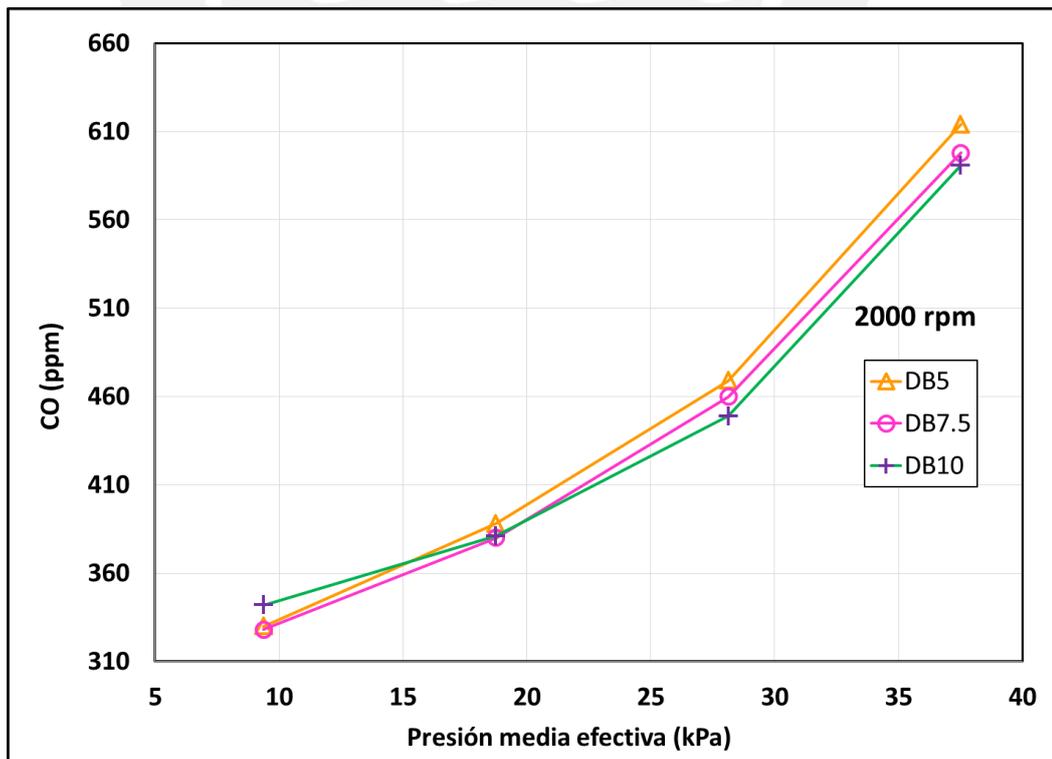


Figura 3.18 - Monóxido de carbono vs Presión media efectiva @ 2000 rpm

Las diferencias porcentuales obtenidas entre los 3 combustibles para un mismo punto del ensayo para pueden estar asociadas a la incertidumbre experimental. Por ejemplo, a 1000 rpm y 28,1 kPa la diferencia porcentual de CO entre los combustibles DB5 y DB10 fue de 4,26%. Por su parte, para esta misma condición, las incertidumbres experimentales del CO fueron de 5% para ambos combustibles (DB5 y DB10). Aquí es importante mencionar que para despreciar el efecto de la incertidumbre sobre los resultados se deberá contar con equipos e instrumentos que cuentan con la menor incertidumbre posible.

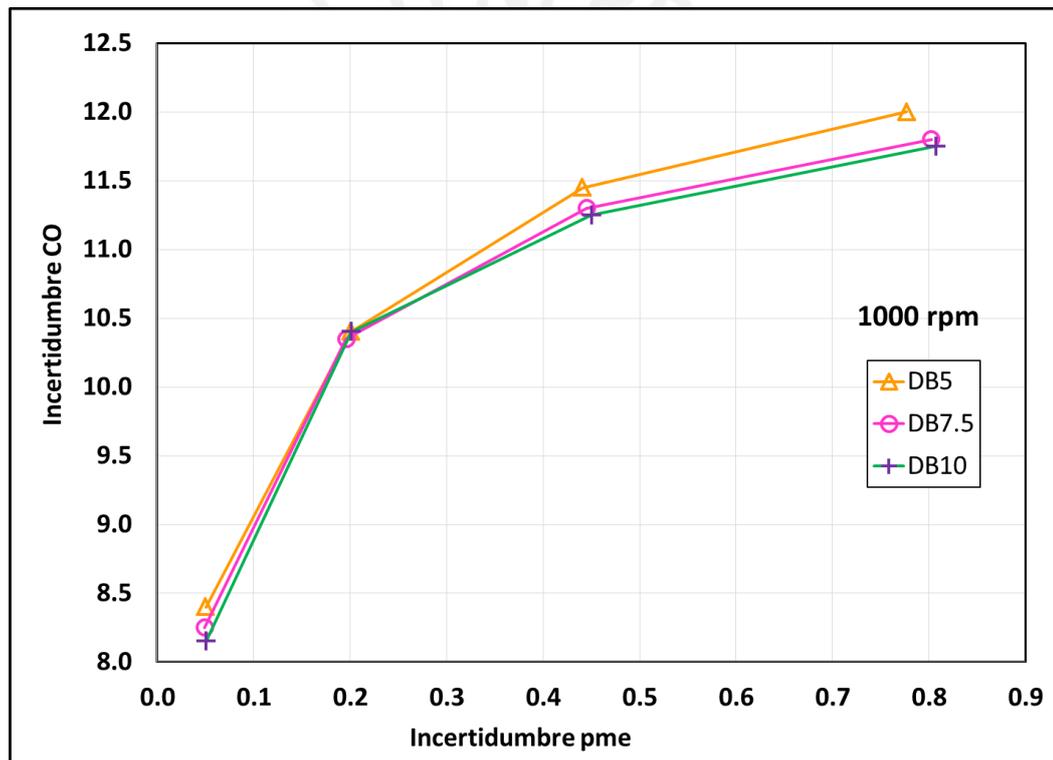


Figura 3.19 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1000 rpm

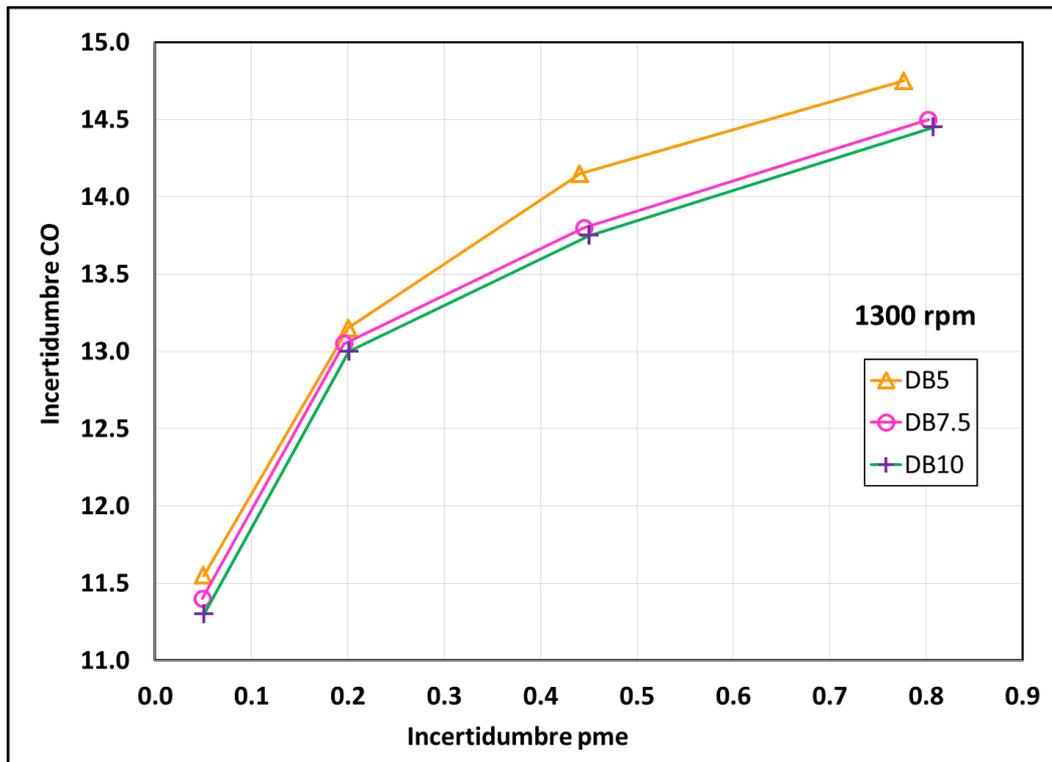


Figura 3.20 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1300rpm

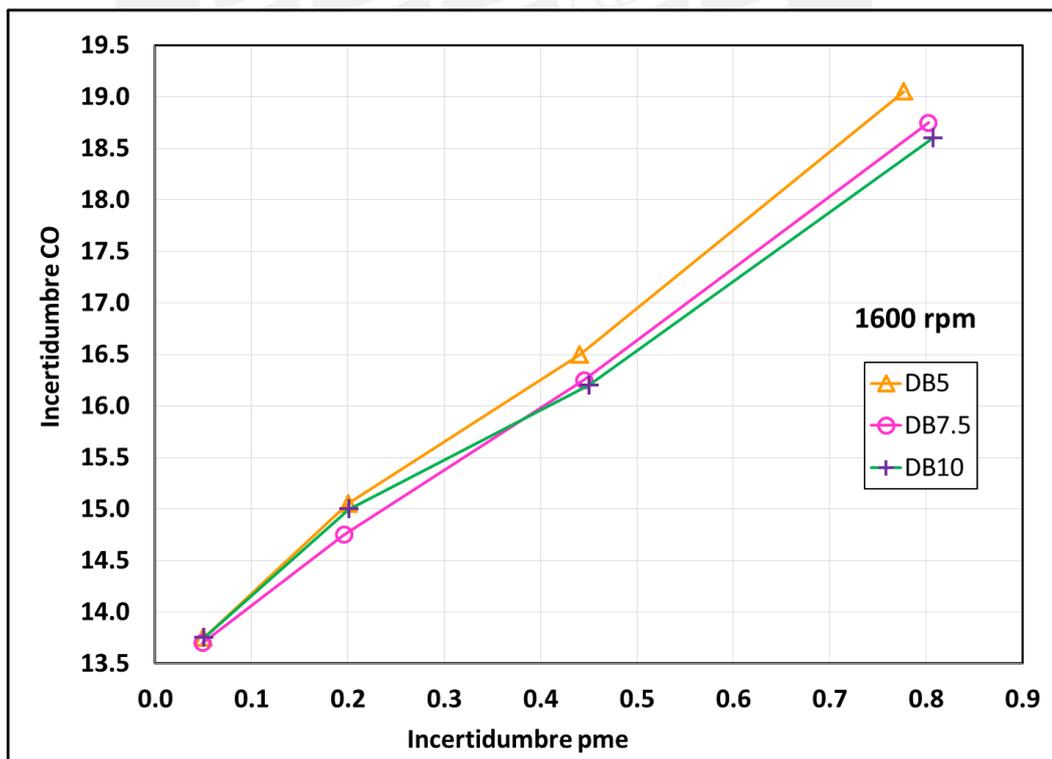


Figura 3.21 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1600rpm

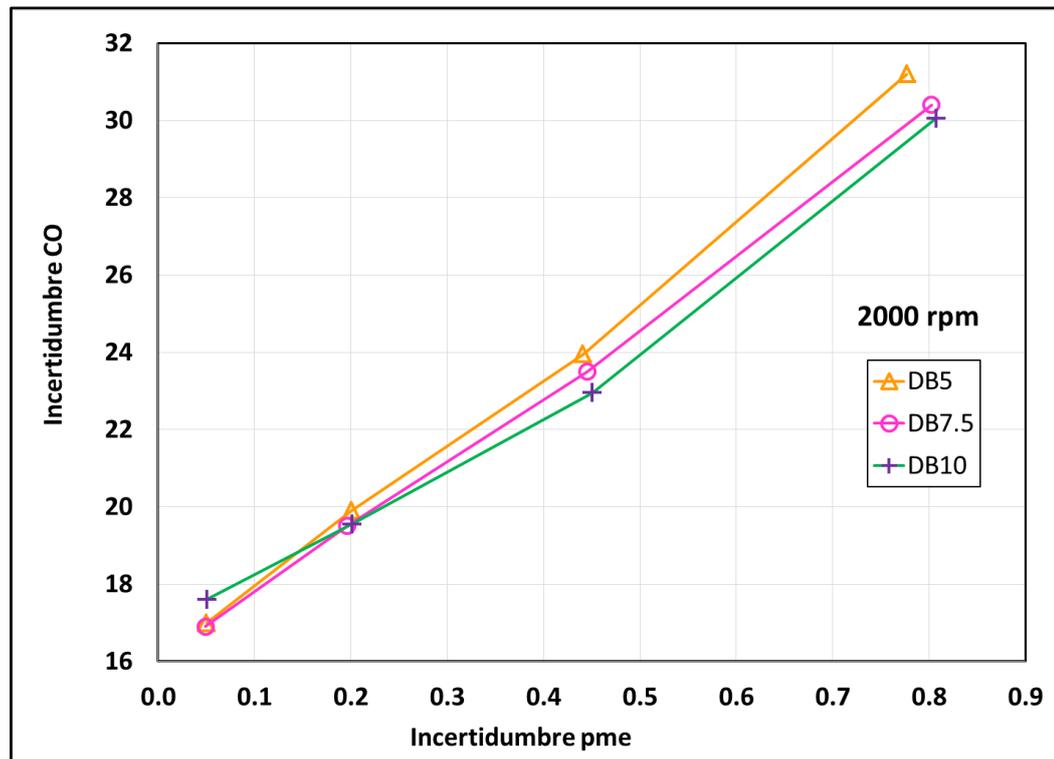


Figura 3.22 - Incertidumbre Monóxido de carbono vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 2000rpm

3.6. Dióxido de Carbono

Como se aprecia en las Figuras 3.23 a 3.26 el porcentaje de dióxido de carbono aumenta conforme se incrementa la carga en los ensayos. Si bien este aumento no es significativo, se puede observar que conforme se aumenta la velocidad del motor estos tienden a aumentar sus valores. Se obtuvo un rango de valores bastante similares para todas las velocidades ensayadas siendo a la velocidad de 2000 rpm en donde se observó los valores más altos a 37,5 kPa llegando a un máximo de 6.25% para DB5 (Figura 3.26). El valor más bajo encontrado fue de 2.45% para DB10 a 1000rpm y 9,38 kPa (Figura 3.23).

A pesar que las gráficas son bastantes similares, para las mezclas con contenido de biodiesel más alto (DB7.5 y DB10) se puede observar una disminución casi

imperceptible de CO_2 a mayores cargas y a las velocidades de 1600rpm y 2000rpm (Figuras 3.23 y 3.26).

Para este contaminante no se encontró reportes significativos en la literatura consultada para efectos de contaminación.

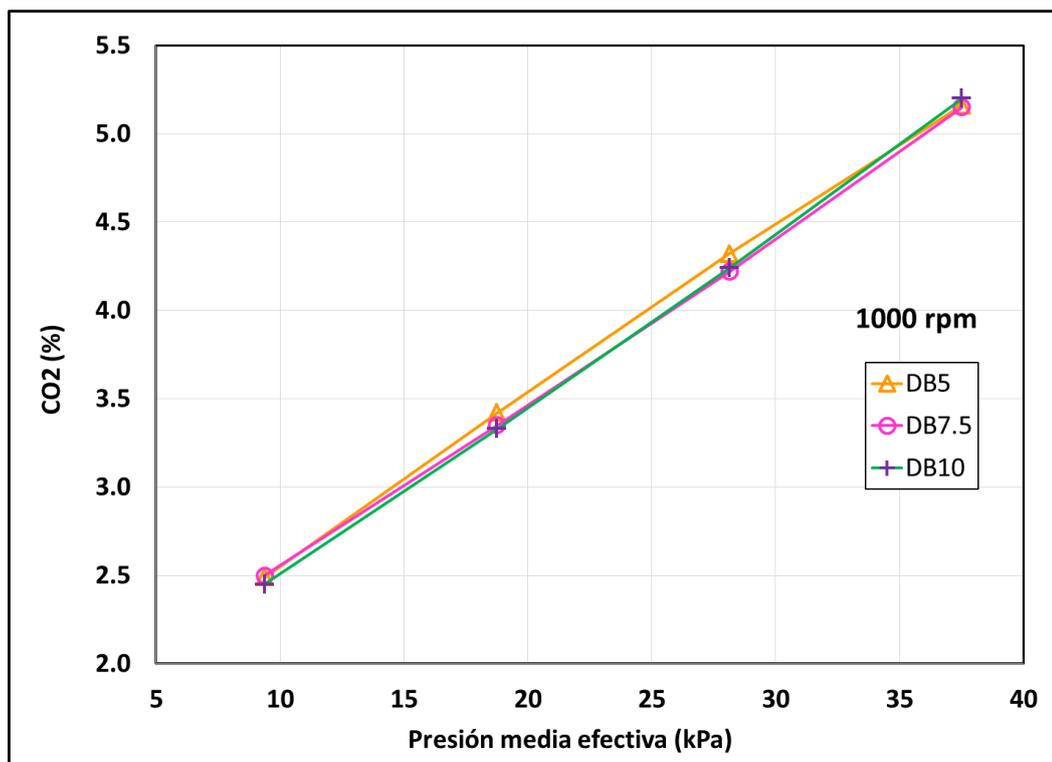


Figura 3.23 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1000rpm

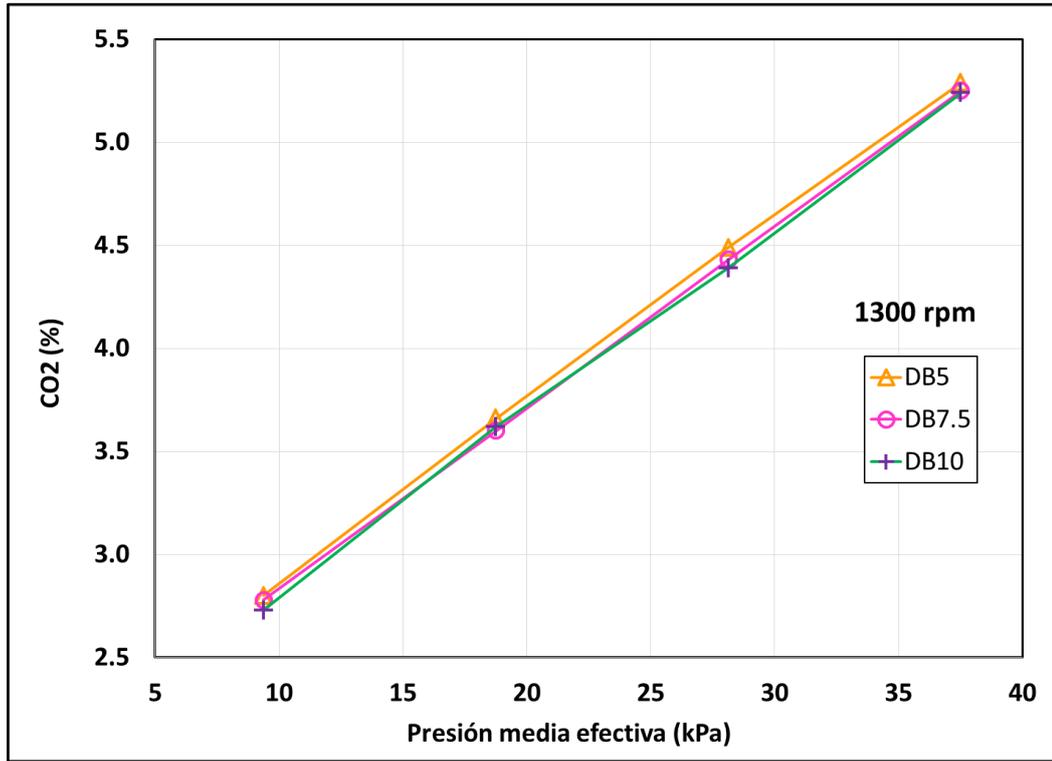


Figura 3.24 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1300rpm

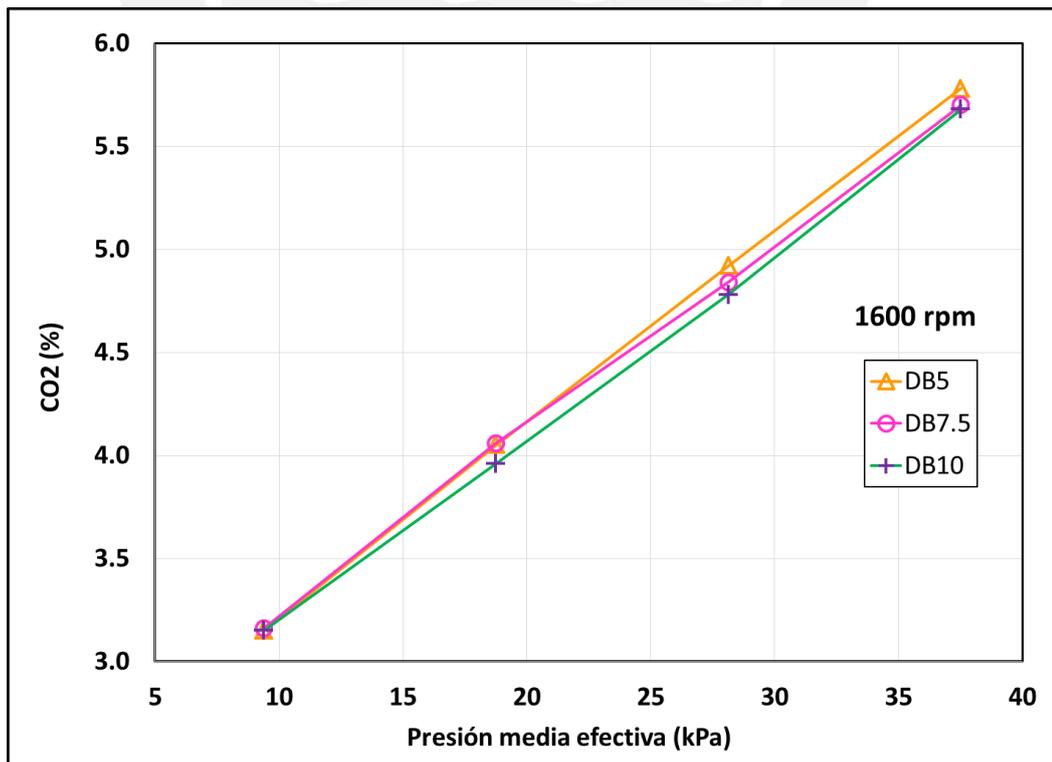


Figura 3.25 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 1600rpm

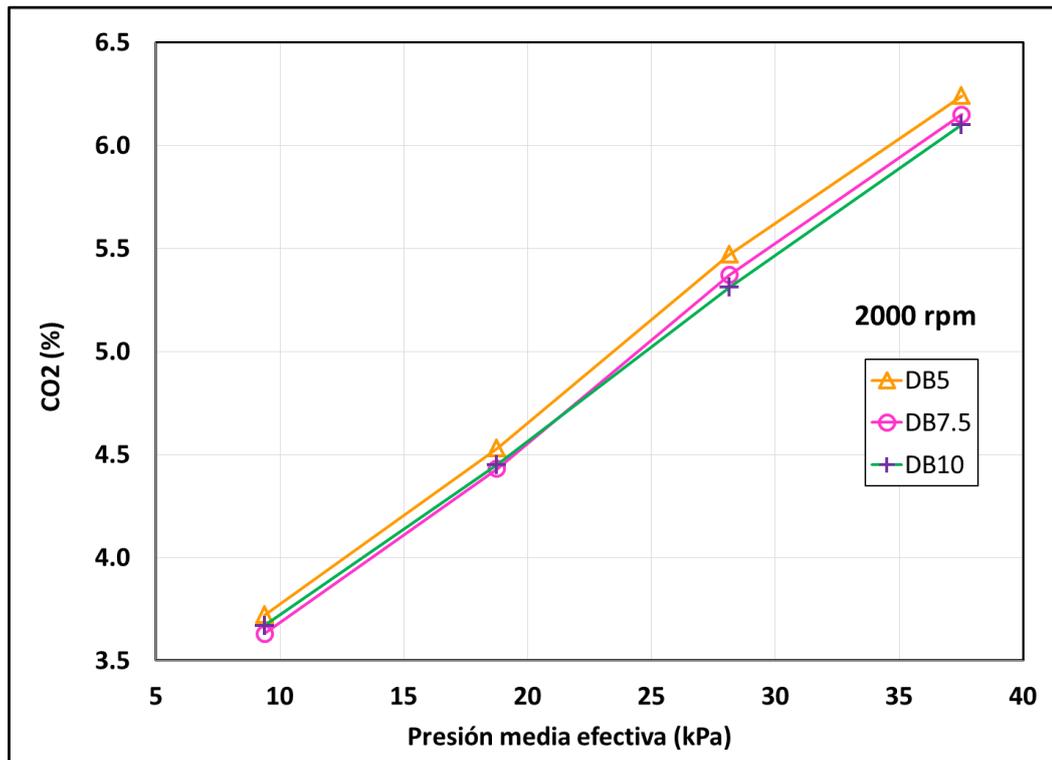


Figura 3.26 - Dióxido de carbono vs Presión media efectiva @ 2000rpm

3.6. Óxidos de Nitrógeno

Como se observa en las Figuras 3.27 - 3.30, a diferencia de los contaminantes anteriores (CO y CO₂), las concentraciones de NO_x se incrementan conforme se aumenta la carga a una velocidad constante pero disminuyen conforme se incrementa la velocidad.

Se puede observar que para menores velocidades, los NO_x alcanzan sus valores máximos siendo el valor más alto obtenido alrededor de 385 ppm a 1000 rpm y 37,5 kPa (Figura 3.30). A esta misma velocidad el valor mínimo se encuentra alrededor de los 200 ppm a 8,38 kPa. A 2000 rpm los óxidos de nitrógeno alcanzan sus valores mínimos, siendo el valor más alto obtenido alrededor de 180 ppm y el valor mínimo alrededor de 100 ppm para 37,5 y 8,38 kPa respectivamente (Figura 3.27).

Los valores de NO_x tienden a aumentar conforme se incrementa la cantidad de biodiesel en las mezclas. Por lo general, los aumentos porcentuales más altos se encontraron a mayores cargas y velocidades más altas. El aumento más significativo se aprecia a 2000 rpm y 37,5 kPa siendo alrededor de 3% y 2% para las mezclas DB10 y DB7,5 respectivamente (Figura 3.30). Para las velocidades y cargas más bajas no se encontró aumentos muy significativos, pero si se puede apreciar que los valores de NO_x mantienen la tendencia a ser mayores en las mezclas con mayor contenido de biodiesel.

Estos resultados también son coherentes con los hallazgos reportados en la literatura del presente trabajo, donde la mayoría de los autores concluyeron un ligero incremento en las emisiones de NO_x al sustituir el diesel convencional por biodiesel. FEV Engine Technology (1994) empleó diesel convencional con varios porcentajes de biodiesel en un motor Navistar 7.3L V8 HEUI. Obtuvo incrementos de NO_x de hasta un 28.2% para biodiesel puro (B100). Schumacher *et al.* (1994) operaron un motor diesel de 6 cilindros y 200 kW, a 1200 y 2100 rpm. Ensayaron mezclas con 10, 20, 30 y 40% de biodiesel y obtuvieron, para todas las mezclas, incrementos de NO_x hasta en un 15% para la mezcla con 40% de biodiesel.

Como ya fue mencionado en el capítulo 1 del presente trabajo, no existe un consenso para explicar el aumento de las concentraciones de NO_x al utilizar biodiesel mezclado con diesel. En primer lugar, las diferentes propiedades físicas del biodiesel (densidad, viscosidad, velocidad del sonido, entre otras) respecto al diesel, causan un adelanto en el inicio de la combustión, ocasionando un incremento en las temperaturas dentro de la cámara de combustión y consecuentemente un aumento de las reacciones del nitrógeno. Otra razón importante se puede atribuir al aporte adicional de oxígeno que contiene el biodiesel que favorecería a la formación de los NO_x . Estos mismos argumentos fundamentarían las tendencias del NO_x reportadas en la presente tesis.

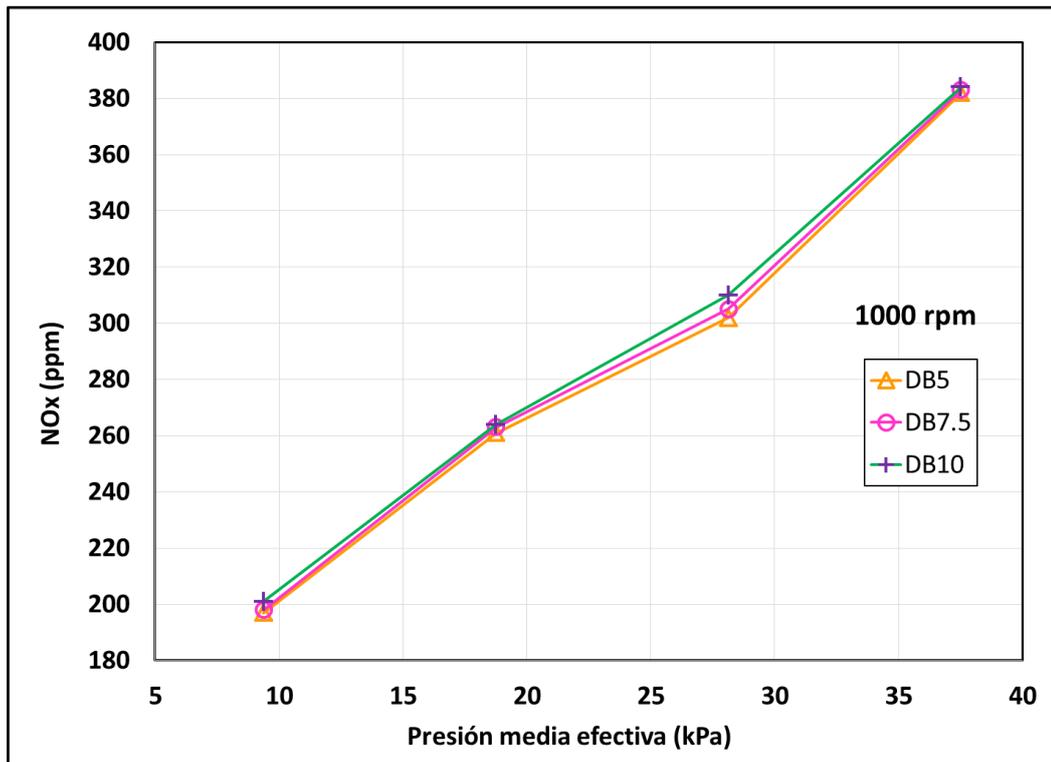


Figura 3.27 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1000rpm

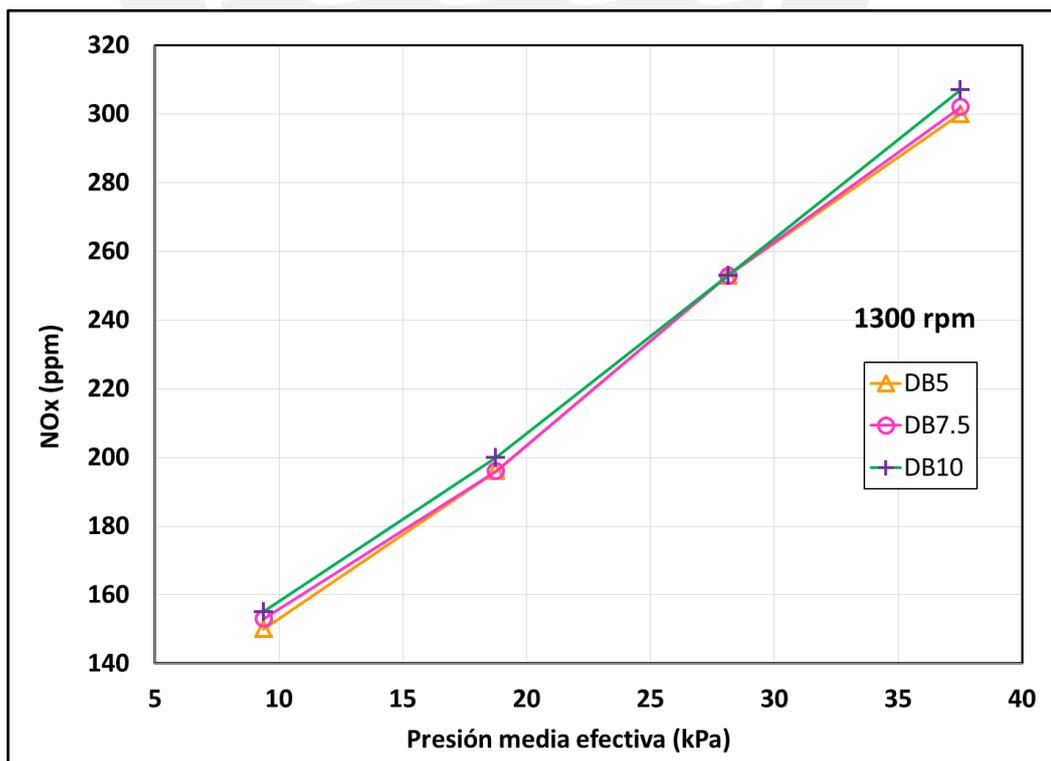


Figura 3.28 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1300rpm

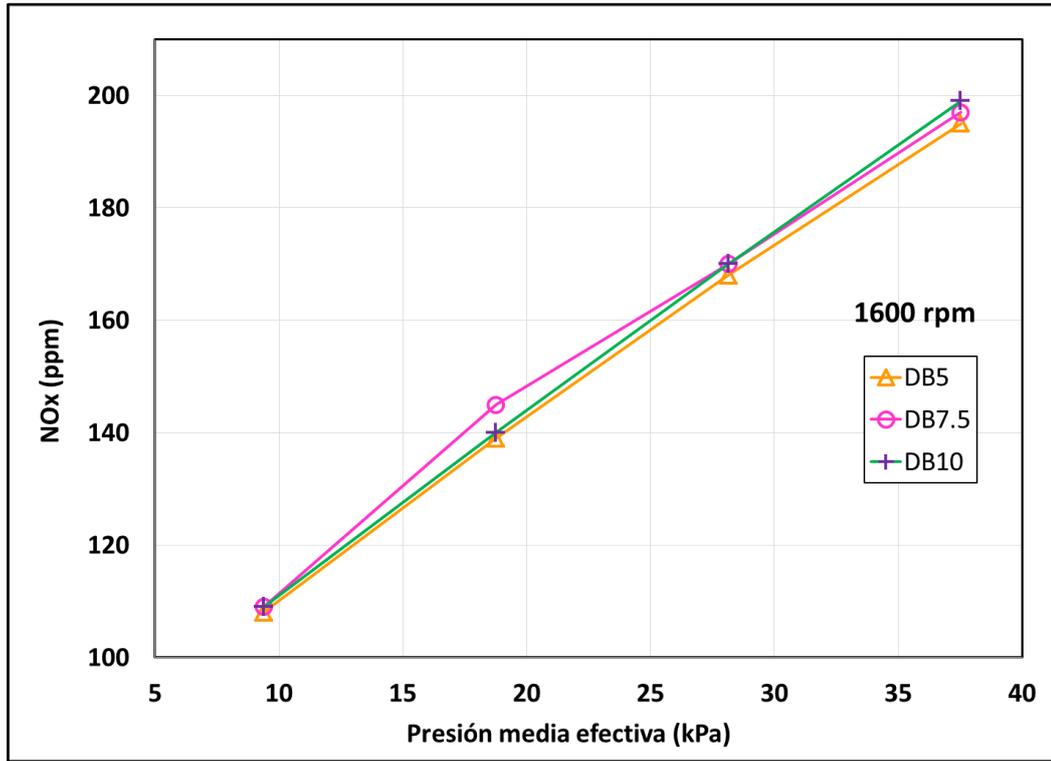


Figura 3.29 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 1600rpm

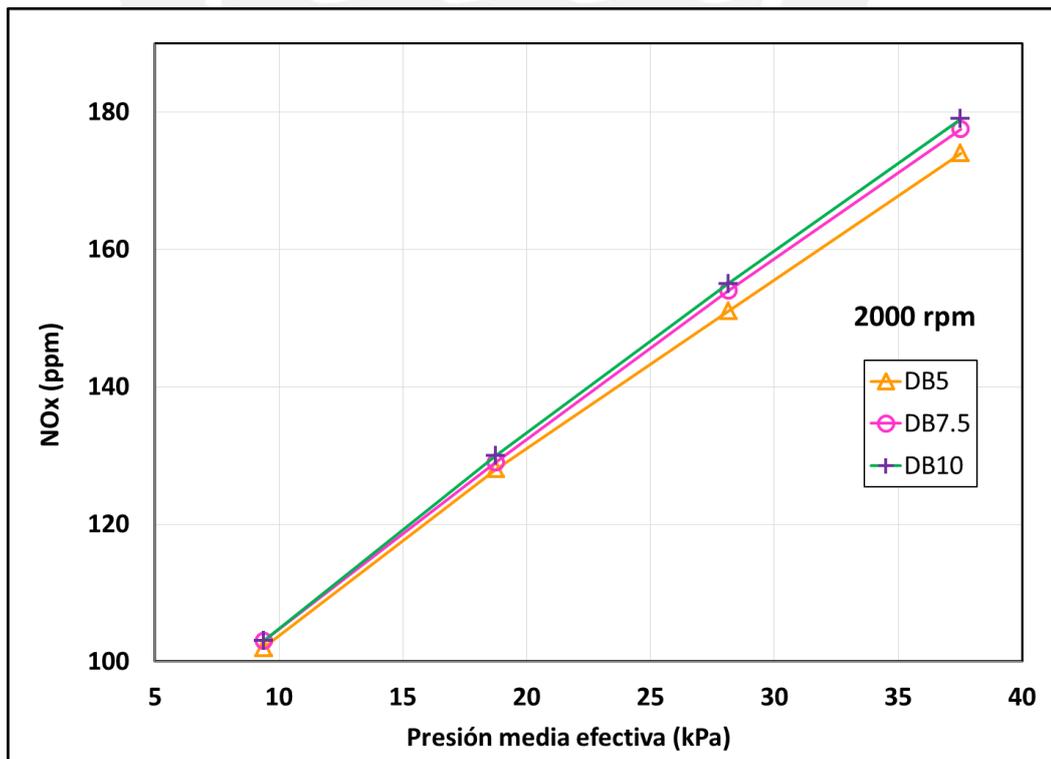


Figura 3.30 - Óxidos de Nitrógeno vs Presión media efectiva @ 2000rpm

Análogamente al análisis de la incertidumbre para las concentraciones de monóxido de carbono (CO), las diferencias porcentuales obtenidas entre los 3 combustibles para un mismo punto del ensayo para pueden estar asociadas a la incertidumbre experimental. Por ejemplo, a 2000 rpm y 37,5 kPa la diferencia porcentual de NO_x entre los combustibles DB5 y DB10 fue de 3%. Por su parte, para esta misma condición, las incertidumbres experimentales del NO_x fueron de 5% para ambos combustibles (DB5 y DB10). Aquí es importante mencionar que para despreciar el efecto de la incertidumbre sobre los resultados se deberá contar con equipos e instrumentos que cuentan con la menor incertidumbre posible.

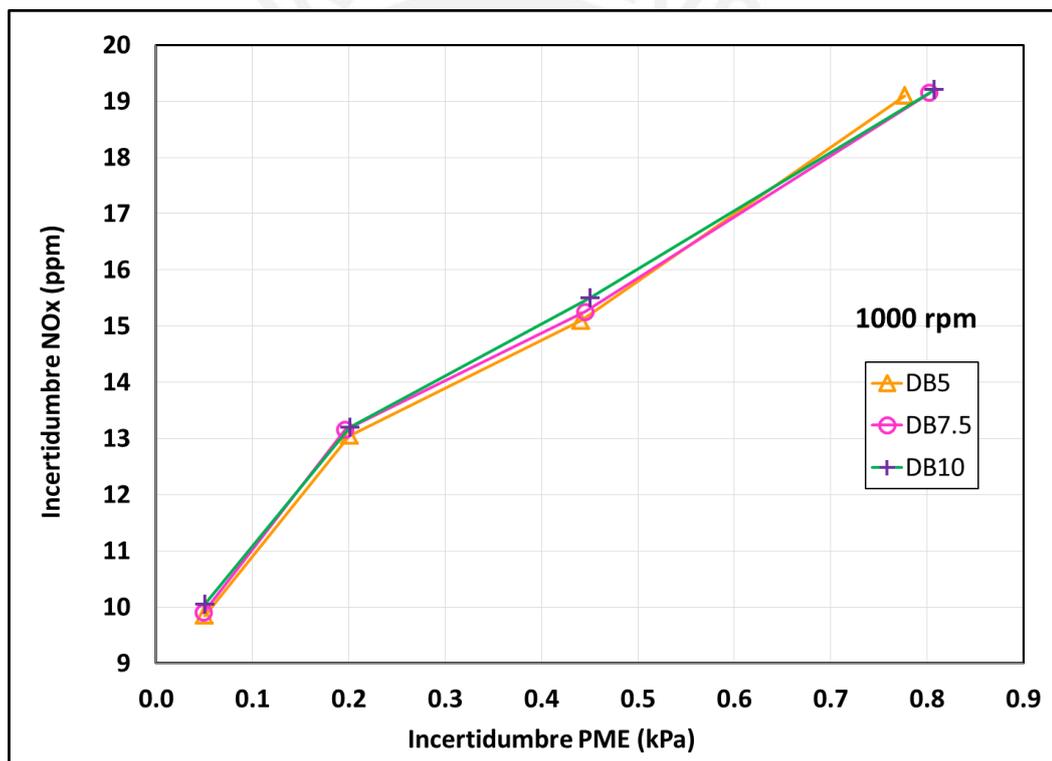


Figura 3.31 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1000rpm

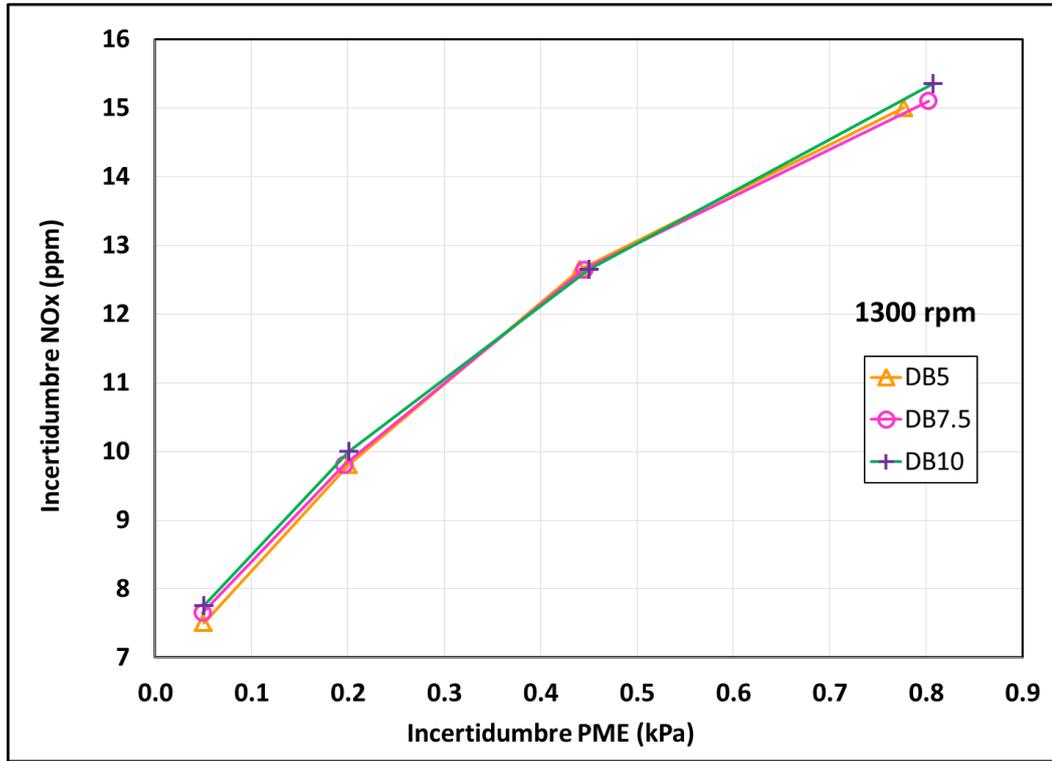


Figura 3. 32 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1300rpm

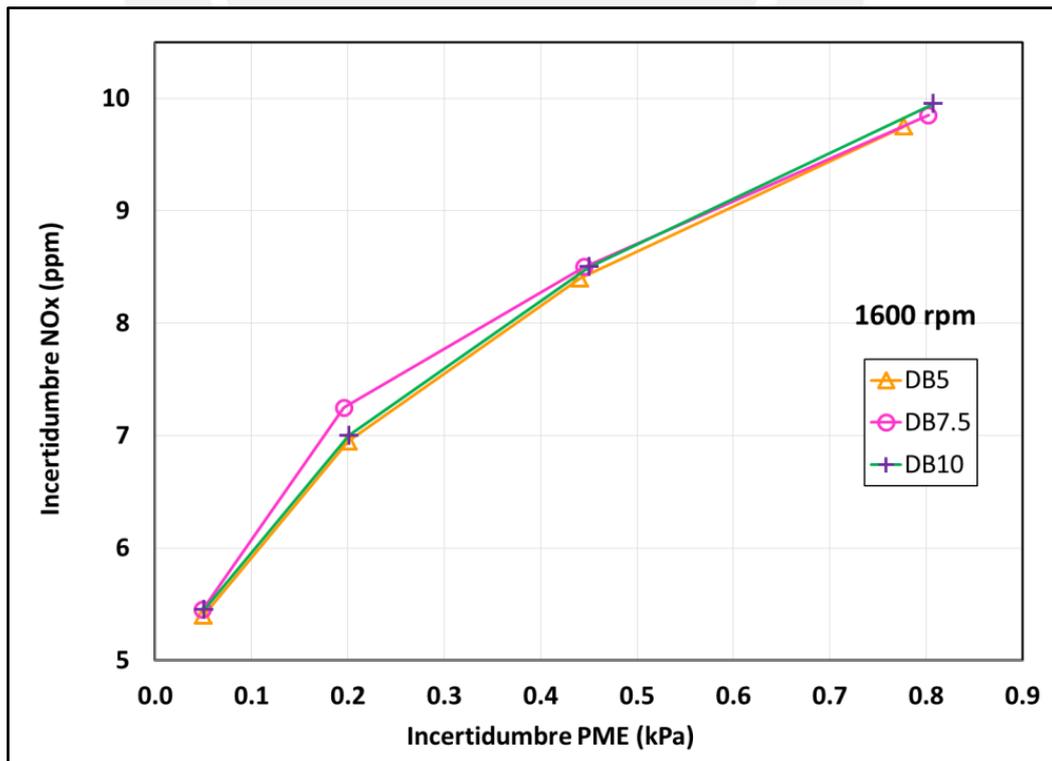


Figura 3. 33 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 1600rpm

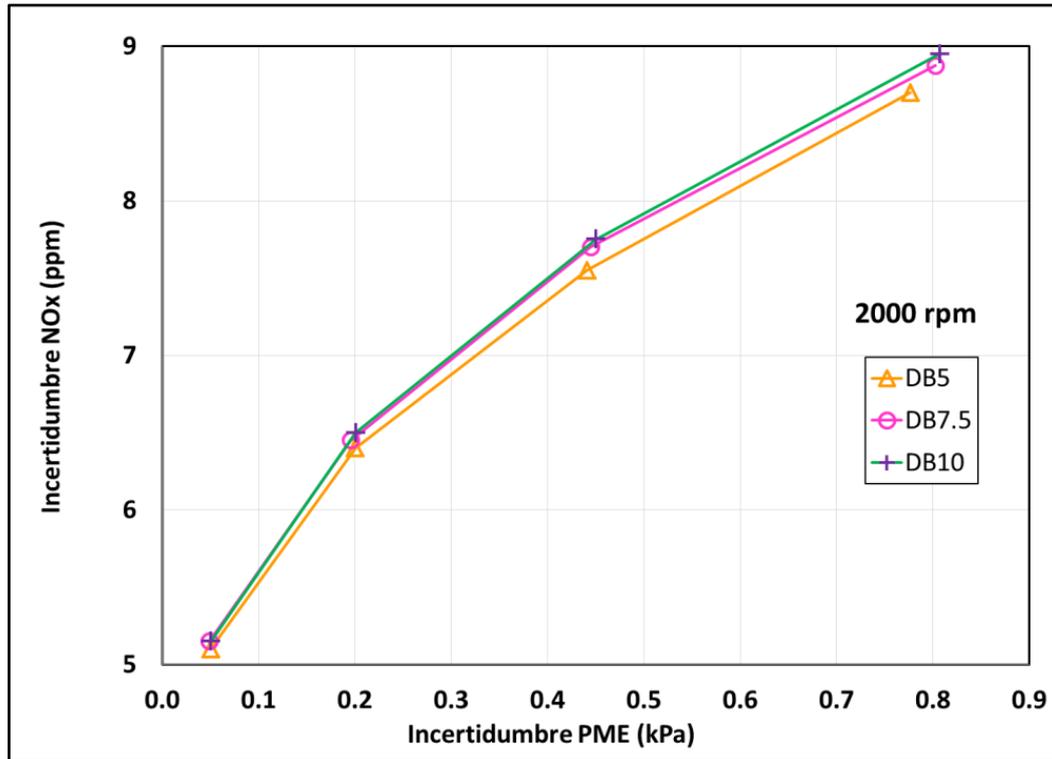


Figura 3. 34 - Incertidumbre Óxidos de Nitrógeno vs Incertidumbre Presión media efectiva @ 2000rpm

CONCLUSIONES

Para el presente trabajo se realizó una amplia revisión de la literatura relacionada a la utilización de mezclas diesel con biodiesel logrando evaluar y comparar las propiedades más representativas, de ambos combustibles, que afectan directamente sobre el desempeño mecánico y las emisiones contaminantes en un motor de encendido por compresión. Además, en las investigaciones realizadas por otros autores, referidas a este tema, se pudo constatar que los parámetros efectivos calculados en el presente trabajo tales como potencia efectiva, rendimiento efectivo y consumo específico de combustible; y las emisiones medidas de CO₂, CO y NO_x son las que guardan mayor implicancia a la hora de realizar una evaluación experimental de la utilización de mezclas diesel con biodiesel.

Se logró instrumentar un banco de pruebas estacionario en el Laboratorio de Energía de la Universidad Católica del Perú utilizando un motor proveniente de maquinaria pesada de la marca Cummins. Se instalaron e implementaron todos los equipos auxiliares e instrumentos de medición necesarios para poder recoger los datos y calcular todos los parámetros necesarios para el presente trabajo.

Se logró desarrollar una matriz experimental lo suficientemente amplia con el objetivo de realizar un análisis más extenso de los resultados. Se trató de abarcar la mayor cantidad de puntos posibles de ensayo, recopilando una cantidad considerable de datos por cada uno de ellos. Se ensayaron 3 mezclas de diesel con biodiesel (DB5, DB7,5 y DB10) a 11 velocidades de giro (de 1000 a 2000 rpm) y 4 niveles de carga distintos (9,4, 18,8, 28,2 y 37,5 kPa en términos de presión media efectiva). Sin embargo, solo se presentaron los resultados para 4 velocidades: 1000, 1300, 1600 y 2000 rpm, debido a que los resultados recogidos a estas velocidades se consideraron los más representativos para su análisis.

Se realizó un análisis estadístico de las incertidumbres experimentales en las variables medidas con el objetivo de comprobar si las variaciones porcentuales obtenidas experimentalmente de los parámetros medidos se encontraban dentro del rango de la incertidumbre.

En términos de desempeño mecánico del motor, se calculó la potencia efectiva, el consumo específico de combustible y el rendimiento efectivo para las 3 mezclas utilizadas: DB5, DB7,5 y DB10. Para el primer parámetro se constató que este aumenta conforme se incrementa la velocidad de giro y carga del motor. Debido a que la potencia efectiva está relacionada directamente con la velocidad y carga del motor, y ambos fueron establecidos como datos de entrada en los ensayos, los resultados obtenidos fueron similares para las 3 mezclas de combustible ensayadas.

El consumo específico de combustible aumentó conforme se incrementó el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Se encontró aumentos de hasta 4 % para una velocidad de 1000 rpm y 4,5% para 2000 rpm, ambos para la mezcla DB10 respecto a la mezcla DB5 y a la mayor presión media efectiva ensayada (37,5 kPa).

El rendimiento efectivo aumentó conforme se incrementó la carga en los ensayos alcanzando su pico más alto cuando el consumo específico de combustible alcanzó su valor más bajo. El rendimiento efectivo más alto, 34%, se encontró a la menor velocidad ensayada (1000 rpm) y su valor más bajo, 26%, a la velocidad más alta ensayada, (2000 rpm), ambas para la mezcla DB5 y a la presión media más alta. El incremento de biodiesel reduce el rendimiento efectivo. La mayor variación porcentual del rendimiento efectivo se presentó a 1000 rpm entre las mezclas DB5 y DB10 alcanzando un valor de 4% para 37,5 kPa.

Se midieron tres tipos de contaminantes: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). A partir de los valores registrados, se cuantificaron en términos porcentuales las variaciones más significativas entre las emisiones encontradas para las 3 mezclas solicitadas por el presente trabajo. Esta información fue utilizada para realizar un análisis con el objetivo de determinar el efecto del uso del biodiesel sobre las emisiones contaminantes de un motor de encendido por compresión. Así también, la influencia, sobre las emisiones, del porcentaje de biodiesel en la mezcla.

Las emisiones de monóxido de carbono aumentaron conforme se incrementó la velocidad y la carga en los ensayos. En los 3 combustibles ensayados (DB5, DB7,5 y DB10), el CO disminuye a medida que se aumenta el contenido de biodiesel en las

mezclas. La disminución porcentual más alta encontrada, en comparación al DB5, fue igual a 4,26% y se obtuvo en la mezcla DB10 a 1000 rpm y 28,1 kPa.

El CO₂ aumentó conforme se incrementó la carga en los ensayos y velocidad en los ensayos. Sin embargo, no se registraron variaciones significativas de las emisiones CO₂ entre las 3 mezclas utilizadas.

Las emisiones de NO_x aumentaron conforme se incrementó el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Los aumentos porcentuales más altos se encontraron a mayores cargas y velocidades más altas. El aumento más significativo se encontró a 2000 rpm y 37,5 kPa, siendo alrededor de 3% y 2% para las mezclas DB10 y DB7,5 respecto a la mezcla DB5. A velocidades y cargas bajas, las variaciones porcentuales no fueron significativas, pero se observó que los valores de NO_x tienden, por lo general, a aumentar conforme el porcentaje de biodiesel sobre la mezcla es mayor.

Las emisiones de CO y NO_x presentan tendencias coherentes respecto a la literatura pero no se puede decir que son resultados concluyentes debido a las incertidumbres asociadas al equipo de medición.

Por último, se generó una base de datos experimentales bastante amplia la cual podría ser tomada en cuenta para realizar futuros ensayos relacionados a esta investigación. Estos datos se podrán usar para obtener modelos numéricos con el fin de evaluar el desempeño mecánico y las emisiones contaminantes debido a la utilización de mezclas de diesel con biodiesel teniendo en cuenta las incertidumbres experimentales de los equipos a utilizarse.

RECOMENDACIONES

Aumentar el nivel de carga aplicada al motor Diesel, con el objetivo de tener resultados más amplios sobre los efectos del biodiesel en el desempeño y emisiones. En el presente trabajo, las cargas fueron limitadas por la capacidad del freno.

Se recomienda continuar con las investigaciones respecto a la utilización de mezclas diesel y biodiesel, en donde se pueda evaluar el efecto de las condiciones climáticas típicas de altitud.

Como se aprecia en los experimentos realizados en el presente trabajo, el biodiesel tiene efectos positivos en la mayoría de las emisiones contaminantes, sin embargo los óxidos de nitrógeno tienden a aumentar conforme se incrementa el porcentaje de biodiesel. Estos pueden ser disminuidos utilizando otras técnicas como modificar el tiempo de inyección o instalar un sistema de recirculación de gases (EGR). Por esto se recomienda realizar futuras investigaciones en donde se implementen dichas modificaciones y se evalué la utilización de este biocombustible.

Con el fin de poder validar de manera correcta los resultados obtenidos en los experimentos, se considera de vital importancia contar con instrumentos que cuenten con menores errores de medición.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

2009 "Los vehículos automotores como fuentes de emisión". Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas. México D.F., número 1, pp. 25-34

[2] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES DEL PERU

2001 Decreto Supremo DS N° 047-2001-MTC "Establecen límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial"

[3] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES DEL PERU

2001 Decreto Supremo DS N° 026-2006-MTC "Modifican Acápito II del Anexo 1 del DS N° 047-2001-MTC que regula los Límites Máximos Permisibles para vehículos nuevos que se incorporen a nuestro parque automotor"

[4] MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL PERU

2012 Decreto Supremo DS N° 009-2012 MINAM "Establecen límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial"

[5] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA

2004 EPA's Tough Diesel Engine Standards Will Achieve Dramatic Clean Air Benefits State of Maine Praised for Diesel-emission Reduction Efforts USA

[6] STRATA, José

2000 Biocombustibles: Los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. Argentina

[7] MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS DEL PERU

2012 Resolución Ministerial RM N° 139-2012-MEM/DM “Establecen prohibición de usar y comercializar Diesel B5 con un contenido de azufre mayor a 50 ppm en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la Provincia Constitucional de Callao”

[8] DE ALTHAUS GUARDERAS, Jaime

2014 *Producción de biodiesel en peligro*. Entrevista del 10 de Abril del 2014 a CARLOS FERRARO (Asesor de la Alta Gerencia de Industrias del Espino y Pdte. de ARAPER)

[9] INDECOPI

2008 Norma Técnica Peruana (NTP) 321.125:2008. Biocombustibles. Biodiesel. Especificaciones

[10] INDECOPI

2005 Norma Técnica Peruana (NTP) 321.003. Petróleo y Derivados. Diesel. Especificaciones.

[11] ARAYA JOFRÉ, Paz Isabel

2009 Efecto de la utilización de biodiesel sobre las emisiones de vehículos pesados. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica.

[12] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA

2006 NTC 5444. Biodiesel para uso en motores diesel. Especificaciones

[13] GERHAR, Knothe

2010 Biodiesel fuel quality and the ASTM standard
Usa

[14] EUROPEAN STANDARD

2003 EN 14214:2003. Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods.

[15] HEYWOOD, John

1998 Internal Combustion Engine Fundamentals
USA

[16] GARRIDO, Angie

2007 La producción de biodiesel en el Perú. Dirección general de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas del Perú.

[17] ZELDOVICH, Yakov

1946 The oxidation of nitrogen in combustion explosions
USSR

[18] LAVOLE, George, Jhon HEYWOOD y James KECK

1970 Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines
USA

[19] MARTINEZ, Ernesto y Yolanda DIAZ DE MERA

2004 Contaminación atmosférica. Cuarta edición. Cuenca: Editorial / Universidad de Castilla – La Mancha

[20] PAYRI, Francisco y José María Desantes

2011 Motores de Combustión Interna Alternativos. Primera edición. Valencia, España: Editorial / Reverte

[21] LAPUERTA AMIGO, Magin

Impacto medio ambiental en procesos de combustión
España

- [22] GARCES, Luis Fernando y Marta HERNANDEZ
2004 “La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local”. *Revista Lasallista de Investigación*. Antioquia, volumen 1, número 2, pp. 67 – 72.
- [23] FEV ENGINE TECHNOLOGY
1994 Emissions and Performance Characteristics of the Navistar T444E DI engine fuelled with blends of biodiesel and low sulphur diesel.
USA
- [24] SCHUMACHER L., BORGELT S., HIRES G., FOSSEEN D. y GOETZ W.
1994 Fueling diesel engines with blends of methyl ester soybean oil and diesel fuel.
USA
- [25] RODRIGUEZ FERNANDEZ, Jose
2007 Estudio Bibliográfico y Experimental de las Emisiones y Prestaciones de un Motor Trabajando con Biodiesel. Tesis Doctoral. España: Universidad de Castilla – La Mancha, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos.
- [26] MARSHALL W., SCHUMACHER L.G., HOWELL S.
1995. “Engine Exhaust Emissions Evaluation of a Cummins L10E when fuelled with a biodiesel blend” *SAE Technical Paper 952363*. USA
- [27] GRABOSKI, Michael y Robert MCCORNICK
1998 “Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines”. *Progress in Energy and Combustion Science*. Gran Bretaña, volumen 24, pp. 125 - 164.
- [28] GOYAL, M.
1994 “Biodiesel research. Deere power diesel engine durability issues using biodiesel”. *Commercialization of Biodiesel: Establishment of Engine Warranties*.
USA

- [28] RANTANEN L., MIKKONEN S., NYLUND L., KOCIBA P. y LAPPI M.
1993. "Effect of Fuel on the Regulated, Unregulated and Mutagenic Emissions of DI Diesel Engines". *SAE Technical Paper 932686*. USA
- [29] SERDARI A., FRAGIOUDAKIS K., TEAS C., ZANNIKOS F., STOURNAS S. y LOIS E.
1999 "Effect of biodiesel Addition to Diesel Fuel on Engine Performance and Emissions". *Journal of Propulsion and Power*. USA, pp.224 – 231
- [30] TAT, M.E.
2003 Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines. PhD Thesis. USA: Iowa State University.
- [31] LI X., GÜLDER Ö.L.
1998 "Effects of Fuel Cetane Number, Density and Aromatic Content on Diesel Engine NOx Emissions at Different Operating Conditions". *The Fourth International Symposium*. Canadá, pp. 111 - 116
- [32] PETERSON C.L., REECE D.L.
1996 "Emissions Testing with Blends of Esters of Rapeseed Oil Fuel With and Without a Catalytic Converter". *SAE Technical Paper 961114*. USA
- [33] KRAHL J., MUNACK A., BAHADIR M., SCHUMACHER L., ELSER N.
1996 "Review: Utilization of Rapeseed Oil, Rapeseed Oil Methyl Ester or diesel Fuel: Exhaust Gas Emissions and Estimation of Environmental Effects". *SAE Technical Paper 962096*. USA
- [34] SHI X., YU Y., HE H., SHUAI S., WANG J., LI R.
2005 Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. *Fuel 84*. China; pp. 1543–1549

- [35] LAST R.J., KRÜGER M., DÜRNHOLZ M.
1995 Emissions and Performance Characteristics of a 4-Stroke, Direct Injected Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel. *SAE Technical Paper 950054*. USA
- [36] ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA
2002 A comprehensive analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions
USA
- [37] PILOTO RODRIGUEZ, R
2008 Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel.
Cuba
- [38] AGUDELO. Jhon
2005 Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma
Colombia
- [39] LA PUERTA Magin, Octavio ARMAS y José RODRIGUEZ FERANDEZ
2007 "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions". *Progress in Energy and Combustion Science*. Ciudad Real, número 34, pp. 198 – 223.
- [40] TURRIO BALDASSARRI Luiggi, Chiara BATTISTELLI y Luiggi CONTI
2004 "Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend". *Science of the Total Environment*. Italia, número 327, pp. 147 – 162.
- [41] CANAKCI Mustafa, VAN GERPEN J.H.
2001 Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum diesel fuel, Yellow Grease biodiesel, and Soybean Oil biodiesel. *ASAE Annual International Meeting 016050*. USA

[42] MONYEM Abdul, VAN GERPEN J.H.

2001 "The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions".
Biomass and Bioenergy. USA, número 20, pp. 317 - 325.

[43] MOFFAT, Robert

1988 *Describing the uncertainties in experimental results*. California:
Standford University.

[44] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ – SECCIÓN DE FÍSICA

2015 Introducción a la teoría de incertidumbres. Lima

[45] CUISANO JULIO

2006 Redução das Emissões em Motores Diesel - gás. Rio de Janeiro: Pontifica
Universidad Catolica do Ríó de Janeiro

