

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL CONSUMO DE
COMBUSTIBLE E ÍNDICE DE EMISIONES DE UN VEHÍCULO
LIVIANO FUNCIONANDO CON DOS MEZCLAS DE GASOLINA Y
ETANOL (E7,8 Y E10) EN LIMA METROPOLITANA**

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

ROLANDO ABRAO ALIAGA LÓPEZ

ASESOR: Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

Lima, Setiembre del 2016



© 2016, Rolando Abrao Aliaga López.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se realizó un análisis de evaluación comparativa del consumo de combustible e índices de emisiones de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7,8 y E10) en Lima Metropolitana.

El vehículo, de marca Hyundai modelo Santa Fe, fue instrumentado e implementado adecuadamente mediante un único sistema de adquisición de datos para obtener un registro en tiempo real del consumo de aire de admisión de motor, las emisiones de gases de escape, la distancia recorrida y la velocidad del vehículo, y las condiciones ambientales durante las pruebas. La campaña experimental se desarrolló en dos circuitos de conducción urbana en Lima Metropolitana: circuito en condiciones de tráfico y circuito a velocidad constante. Las pruebas fueron realizadas en un periodo aproximado de dos semanas, tratando de asemejar las condiciones de operación: hora de inicio, carga del vehículo, presión de neumáticos entre otros.

De los resultados obtenidos en condiciones de tráfico, se constató que el consumo de combustible prácticamente no fue alterada al incrementar el contenido de etanol en el gasohol comercial (E7,8). En cambio, para el circuito a velocidad constante, el consumo de combustible aumentó en 11,2 % al incrementar el contenido de etanol.

Con respecto a los índices de emisiones calculados (g/km) en condiciones de tráfico, estos presentaron una mejora en reducción al usar E10 bajo condiciones de tráfico, ya que con E10 se obtuvo un índice de emisión de 91,71 mg/km de NO_x, 208,70 mg/km de HC, 14,24 g/km de CO y 273,80 g/km de CO₂, mientras que utilizando E7,8 el vehículo emitió 102,61 mg/km de NO_x, 232,44 mg/km de HC, 15,00 g/km de CO y 277,74 de CO₂.

El consumo de combustible promedio (km/L) y todos los índices de emisiones (g/km) disminuyeron, significativamente, indiferente del tipo de combustible (E7,8 o E10), en condiciones a velocidad promedio constante respecto a condiciones de tráfico.

Finalmente, el estudio concluye que el E10 representa una alternativa económicamente y ambientalmente viable debido a los resultados de desempeño y emisiones obtenidas en el presente estudio.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO	EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE E INDICE DE EMISIONES DE UN VEHÍCULO LIVIANO FUNCIONANDO CON DOS MEZCLAS DE GASOLINA Y ETANOL (E7,8 Y E10) EN LIMA METROPOLITANA.
ÁREA	Energía # 399
PROPUESTO POR	Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza
ASESOR	Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza
TESISTA	Rolando Abrao Aliaga López
CÓDIGO	20101695
FECHA	17 de Mayo del 2016



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El aumento anual del número de vehículos en circulación del parque automotor trae consecuencias negativas para la salud humana y para el medio ambiente. Actualmente, en el Perú se comercializa el combustible gasohol (E7,8); sin embargo, no se tiene ni registro ni inventario sobre el consumo e índices de emisiones al emplear este combustible. Asimismo, no es conocido los efectos que podría provocar un posible incremento del etanol en la gasolina comercial, de E7,8 a E10.

En el presente trabajo se pretende realizar un estudio experimental en un vehículo liviano representativo del parque automotor, el cual utilizará dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10. Para ello, se instrumentará el vehículo e implementará un único sistema de adquisición de datos, con el propósito de registrar en tiempo real el consumo de aire de admisión del motor, las emisiones de gases de escape, la distancia recorrida y velocidad del vehículo, y las condiciones ambientales durante las pruebas. La campaña experimental se desarrollará en dos circuitos de conducción urbana en Lima Metropolitana.






**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL CONSUMO DE
COMBUSTIBLE E INDICE DE EMISIONES DE UN VEHÍCULO
LIVIANO FUNCIONANDO CON DOS MEZCLAS DE GASOLINA Y
ETANOL (E7,8 Y E10) EN LIMA METROPOLITANA.**

Introducción

1. Estado del arte
2. Fundamentos teóricos
3. Metodología
4. Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas


Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

Asesor





DEDICATORIA

*A mis padres, Rolando y María,
por todo su apoyo incondicional
hacia mi persona y ser mis ídolos
A mis hermanos, Diana, María y Wilfredo,
a quienes siempre amaré y cuidaré.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por darme la vida y hacerla de ella interesante.

En segundo lugar, a mi familia que siempre me ha apoyado incondicionalmente durante esta etapa de mi vida y gracias a ellos puedo tener la dicha de culminarla.

En tercer lugar, agradezco a todos los profesores de la especialidad de ingeniería mecánica y especialmente a mi asesor el Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza porque apostó y confió en mí al ofrecerme la oportunidad de trabajar en el proyecto de investigación que ha dado origen a esta tesis, por su dirección técnica, su apoyo y respaldo en todo este tiempo de trabajo.

También agradezco a todas las personas que me ayudaron a elaborar mi tesis, Al Ing. Ronald Mas, por abrirme las puertas del Laboratorio de Energía, al Ing. Ronald Díaz y al Ing. André Chipoco, por todas sus ayudas en la parte electrónica de mi trabajo. Y finalmente, a los técnicos Jhonatan y Brony por el apoyo en la parte técnica.

A mis amigos de Ingeniería Mecánica con quienes he compartido momentos inolvidables no solo en lo académico sino en lo personal y social. Por ello, siempre los recordaré.

ÍNDICE

RESUMEN	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE.....	5
CAPÍTULO 2: FUNAMENTOS TEÓRICOS.....	17
2.1. Características de la gasolina	17
2.2. Características del etanol combustible	19
2.3. Mezclas de gasolina y etanol	20
2.4. Motores de combustión interna	22
2.5. Gases fundamentales	22
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	23
3.1. Características del vehículo representativo de la flota vehicular.....	24
3.1.1. Hyundai Santa Fe 2010.....	24
3.2. Sistema de adquisición de datos.....	27
3.2.1. Medición del flujo de aire de admisión.....	29
3.2.2. Medición de concentraciones de gases de escape	30
3.2.3. Medición de datos del circuito.	31
3.2.4. Medición de parámetros atmosféricos.....	32
3.3. Definición de circuitos urbanos.....	32
3.3.1. Circuito en condiciones de tráfico.....	33
3.3.2. Circuito a “velocidad constante”	34
3.4. Preparación de las mezclas de gasolina y etanol	35
3.5. Metodología de experimentación	36
3.6. Protocolo de pruebas	42
3.7. Expresiones para cálculo de parámetros	44
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
4.1. Resultados del circuito en condiciones de tráfico	54
4.1.1. Perfiles y valores promedios en condiciones de tráfico.	54
4.1.2. Índices de emisiones en condiciones de tráfico.....	69
4.2. Circuito a velocidad constante.....	70
4.2.1. Perfiles y valores promedios a velocidad constante	70
4.2.2. Índice de emisiones en condiciones a velocidad promedio constante	90
4.3. Resumen y comparación de los dos circuitos de la campaña experimental ..	91

CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Combustibles usados en la experimentación de Paivi y colaboradores.	9
Tabla 2.1 - Características fisicoquímicas de la gasolina .Adaptación de datos de Repsol.....	18
Tabla 2.2 - Características fisicoquímicas del etanol anhidro (I. Monfel, 2005).....	19
Tabla 2.3 - Modificaciones necesarias en el motor para mezclas etanol-gasolina (Joseph, 2007).	22
Tabla.3.1 - Datos técnicos del vehículo (Manual de Santa Fe, 2011).	26
Tabla 3.2 - Límites máximo permisibles para vehículos en conducción y para inspección técnica a nivel nacional (MTC, 2012).....	26
Tabla 3.3 - Resultado de la prueba de emisiones del vehículo. Adaptación de datos de Farenet [ver Anexo 2.....	27
Tabla 3.4 - Características del sensor de flujo de aire (MAF) (BOSCH, 2015).....	30
Tabla 3.5 - Características del analizador de gases (Infrared, 2015).....	31
Tabla 3.6 - Características del GPS (Grove, 2015).....	31
Tabla 3.7 - Características del sensor Omega (Omega, 2015).....	32
Tabla 3.8 - Cantidades de combustibles totales para la campaña.	35
Tabla 3.9 - Concentraciones volumétricas de las emisiones en condiciones estequiométrica.....	45
Tabla 3.10 - Masa molar de los componentes de los gases (Dinga, 1968).....	46
Tabla 4.1 - Cronograma de las pruebas realizadas funcionando con E7,8.	52
Tabla 4.2 - Cronograma de las pruebas realizadas funcionando con E10.	53
Tabla 4.3 - Índices de emisiones en circuito con condiciones de tráfico.	69
Tabla 4.4 - Índices de emisiones en circuito con condiciones a velocidad promedio constante.	91
Tabla 4.5 – Resumen y comparación de los valores promedios de los índices de emisiones y consumo de combustible en los dos circuitos (con tráfico y a “velocidad constante”) durante la campaña experimental.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Vehículo Hyundai Santa Fe 2010.	25
Figura 3.2 - Motor DOCH del vehículo.....	25
Figura 3.3 - Sistema de adquisición de datos (LABEN PUCP, 2016).	28
Figura 3.4 - Sensor de flujo de aire (MAF) (BOSCH, 2015)	29
Figura 3.5 - Analizador de gases FGA 4500 (Infrared, 2015).	30
Figura 3.6 - GPS Grove.....	31
Figura 3.7 - Sensor de humedad y temperatura ambientales (Omega, 2015).....	32
Figura 3.8 - Circuito en condiciones de tráfico.....	34
Figura 3.9 - Circuito a velocidad constante.....	35
Figura 3.10 - Etanol anhidro.	36
Figura 3.11 - Probeta graduada. Lado izquierdo con mayor precisión.....	36
Figura 3.12 - Esquema de implementación del SAD y equipos de medición dentro del vehículo.....	37
Figura 3.13 - Guarda cosas del vehículo.	37
Figura 3.14 - SAD dentro del vehículo.....	38
Figura 3.15 - Línea de admisión de aire antes (lado izq) y después (lado der) de la instalación del sensor MAF. A: filtro de aire, B: manguera de aire de admisión y C: cable de datos.....	39
Figura 3.16 - Materiales para la instalación: bridas (lado izquierdo) y manguera de caucho (lado derecho).....	39
Figura 3.17 - Instalación del analizador de gases dentro del vehículo. A: cable de datos y B: cable de alimentación.....	40
Figura 3.18 - Instalación de la sonda en el vehículo.....	40
Figura 3.19 - Batería externa para la alimentación del analizador.	41
Figura 3.20 - Carga extra recomendada para las pruebas.....	42
Figura 3.21-Instalación del sensor Omega en la parte superior y exterior del vehículo.	42
Figura 4.1 - Mediciones de velocidades en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	55
Figura 4.2 - Mediciones de velocidades en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	55
Figura 4.3 - Velocidades promedios en condiciones de tráfico.	55

Figura 4.4 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	56
Figura 4.5-Mediciones del flujo de aire en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	56
Figura 4.6 - Valores promedios de flujo de aire en condiciones de tráfico.	57
Figura 4.7 - Mediciones del factor lambda en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	58
Figura 4.8 - Mediciones del factor lambda en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	58
Figura 4.9 - Detalles de la variación del factor lambda, oxígeno residual y velocidad del vehículo en el tiempo. (A) Detalle de la PCT4; (B) detalle de la PCT7.....	58
Figura 4.10 - Factores lambda promedios en el circuito en condiciones de tráfico.	59
Figura 4.11 - Mediciones de O ₂ en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	60
Figura 4.12 - Mediciones de O ₂ en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	60
Figura 4.13 - Valores promedios de O ₂ en condiciones de tráfico.....	60
Figura 4.14 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	61
Figura 4.15 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	61
Figura 4.16 - Valores promedios de flujo de combustible en condiciones de tráfico. ...	62
Figura 4.17 - Consumo de combustible en condiciones de tráfico.....	62
Figura 4.18 - Mediciones de HC en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	63
Figura 4.19 - Mediciones de HC en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	63
Figura 4.20 - Valores promedios de HC en condiciones de tráfico.	64
Figura 4.21 - Mediciones de CO en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	65
Figura 4.22 - Mediciones de CO en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana 7, am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	65
Figura 4.23 - Valores promedios de CO en condiciones de tráfico.	66

Figura 4.24 - Mediciones de CO ₂ en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	67
Figura 4.25 - Mediciones de CO ₂ en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	67
Figura 4.26 - Valores promedios de CO ₂ en condiciones de tráfico.....	67
Figura 4.27 - Mediciones de NO _x en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) pruebas en la mañana 7 am; (B) pruebas en la tarde 2:30 pm.....	68
Figura 4.28 - Mediciones de NO _x en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.....	68
Figura 4.29 - Valores promedios de NO _x en condiciones de tráfico.....	69
Figura 4.30 - Mediciones de velocidad en condiciones de “velocidad constante” utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.	71
Figura 4.31 - Mediciones de velocidad en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h. .	72
Figura 4.32 - Valores promedios de velocidad en condición de velocidad constante...	72
Figura 4.33 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.	73
Figura 4.34 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h. .	74
Figura 4.35 - Valores promedios del flujo de aire en condición de velocidad constante.	74
Figura 4.36 - Mediciones del factor lambda en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.	75
Figura 4.37 - Mediciones del factor lambda en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h. .	76
Figura 4.38 - Valores promedios del factor lambda en condición de velocidad constante.	76
Figura 4.39 - Mediciones de O ₂ en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.	77
Figura 4.40 - Mediciones de O ₂ en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.	78
Figura 4.41 - Valores promedios de O ₂ en condición de velocidad constante.....	79

Figura 4.42 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.80

Figura 4.43 - Mediciones del flujo combustible en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h. .80

Figura 4.44 - Valores promedios de flujo de combustible en condición de velocidad constante.81

Figura 4.45 - Valores promedios de consumo de combustible en condición de velocidad constante.....81

Figura 4.46 - Mediciones de HC en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.82

Figura 4.47 - Mediciones de HC en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.83

Figura 4.48 - Valores promedios de HC en condición de velocidad constante.....84

Figura 4.49 - Mediciones de CO en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.85

Figura 4.50 - Mediciones de CO en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.85

Figura 4.51 - Valores promedios de CO en condición de velocidad constante.86

Figura 4.52 - Mediciones de CO₂ en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.86

Figura 4.53 - Mediciones de CO₂ en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.87

Figura 4.54 - Valores promedios de CO₂ en condición de velocidad constante.88

Figura 4.55 - Mediciones de NO_x en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.88

Figura 4.56 - Mediciones de NO_x en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.89

Figura 4.57 - Valores promedios de NO_x en condición de velocidad constante.....90

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2O	Agua.
Ar	Argón.
BHR	Bio-hidrocarburos renovales.
Q_{41}	Calor cedido en el ciclo Otto.
Q_{23}	Calor de aporte en el ciclo Otto.
$C_\beta H_\alpha O_\varepsilon$	Combustible
E0	Combustible gasohol que contiene 0% de etanol y 100% de gasolina en volumen.
E10	Combustible gasohol que contiene 10% de etanol y 90% de gasolina en volumen.
E100	Combustible gasohol que contiene 100% de etanol y 0% de gasolina en volumen.
E12	Combustible gasohol que contiene 12% de etanol y 88% de gasolina en volumen.
E15	Combustible gasohol que contiene 15% de etanol y 85% de gasolina en volumen.
E20	Combustible gasohol que contiene 20% de etanol y 80% de gasolina en volumen.
E30	Combustible gasohol que contiene 30% de etanol y 70% de gasolina en volumen.
E5	Combustible gasohol que contiene 5% de etanol y 95% de gasolina en volumen.
E7,8	Combustible gasohol que contiene 7.8% de etanol y 92.2% de gasolina en volumen.
E85	Combustible gasohol que contiene 85% de etanol y 15% de gasolina en volumen.
P	Combustible gasolina comercial premium.
R	Combustible gasolina comercial regular.
iB(14)	Combustible que contiene 14% de isobutanol y 86% de gasolina en volumen.
E15R	Combustible que contiene 15% de etanol y 85% de gasolina comercial regular.
iB(21)	Combustible que contiene 21% de isobutanol y 79% de gasolina en volumen.
E15P	Combustible que contiene 5% de etanol y 85% de gasolina comercial premium.
E5P	Combustible que contiene 5% de etanol y 95% de gasolina comercial premium.
E5R	Combustible que contiene 5% de etanol y 95% de gasolina comercial regular.
CO_2, H_2O, O_2, N_2, Ar	Componentes de los gases de escape
O_2, N_2, Ar	Componentes del aire
X_{mi}	Concentración de la masa molar del componente i-ésimo
C_i	Concentración volumétrico del componente i-ésimo
$consumo_{combustible}$	Consumo de combustible [L/km];
$m_{combustible}$	Consumo másico de combustible [kg/h];
m_{aire}	Consumo másico del aire [kg/h]

m_i	Consumo másico del componente i-ésimo
N_2	Di nitrógeno.
CO_2	Dióxido de carbono.
F_e	Dosado estequiométrico
$F_{E7,8}$	Dosado estequiométrico de la combustión estequiométrica E7,8.
F_{E10}	Dosado estequiométrico de la combustión estequiométrica E10.
DLC	Enlace de conector de datos.
E	Etanol.
C_2H_5OH	Etanol (fórmula química).
CH_3CH_2OH	Etanol (fórmula química).
eth	ETBE (Etil-tert-butil-eter).
MTBE	Etil-tert-butil-eter.
HC	Hidrocarburos no quemados.
DI	Índice de facilidad de conducción.
iB	Isobutanol.
IE_{CO}	Índice de emisión de CO (g/km).
IE_{CO_2}	Índice de emisión de CO_2 (g/km).
IE_{HC}	Índice de emisión de HC (g/km).
IE_{NO_x}	Índice de emisión de NO_x (g/km).
IE_{O_2}	Índice de emisión de O_2 (g/km).
D	Kilómetro recorrido.
CO	Monóxido de carbono.
MECH	Motores de combustión interna encendido por chispa
nB	n-butanol.
RON-MON	Número de octanaje
NO_x	Óxidos de nitrógeno.
O_2	Oxígeno.
PCVC5	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 100 km/h con E7,8
PCVC11	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 100 km/h con E7,8
PCVC1	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 60 km/h con E7,8
PCVC7	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 60 km/h con E7,8
PCVC3	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 80 km/h con E7,8
PCVC9	Primera prueba en circuito de velocidad constante a 80 km/h con E7,8
PCT5	Primera prueba en condiciones de tráfico turno mañana con E10
PCT1	Primera prueba en condiciones de tráfico turno mañana con E7,8
PCT7	Primera prueba en condiciones de tráfico turno tarde con E10
PCT3	Primera prueba en condiciones de tráfico turno tarde con E7,8
PCVC	Prueba en circuito de velocidad constante
PCT	Pruebas en condiciones de tráfico

PMI	Punto muerto inferior.
PMS	Punto muerto superior.
AFR	Relación de aire y combustible.
TVL20s	Relación de vapor-liquido
SD	Memoria externa <i>Secure digital</i>
PCVC6	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 100 km/h con E7,8
PCVC12	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 100 km/h con E7,8
PCVC2	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 60 km/h con E7,8
PCVC8	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 60 km/h con E7,8
PCVC4	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 80 km/h con E7,8
PCVC10	Segunda prueba en circuito de velocidad constante a 80 km/h con E7,8
PCT8	Segunda prueba en condiciones de tráfico turno tarde con E10
PCT4	Segunda prueba en condiciones de tráfico turno tarde con E7,8
PCT6	Segunda prueba en condiciones de tráfico turno mañana con E10
PCT2	Segunda prueba en condiciones de tráfico turno mañana con E7,8
MAF	Sensor de flujo de aire
SAD	Sistema de adquisición de datos
FSI	Sistema de inyección directa.
GPS	Sistema de posicionamiento global.
MPFI	Sistema variable que controla la apertura de las válvulas de admisión.
M	Turno mañana.
T	Turno tarde
t	Tiempo recorrido
VC	Vehículo convencional.
VF	Vehículo flexible.
VH	Vehículo híbrido.
VDC	Voltaje de corriente continua

Letras griegas

β	Cociente molar de carbono en la molécula de combustible hipotético.
α	Cociente molar de hidrógeno en la molécula de combustible hipotético.
ϵ	Cociente molar de oxígeno en la molécula de combustible hipotético.
λ	Factor lambda.
ρ	Densidad del combustible [kg/L]
μ_i	masa molar del componente i-ésimo [g/mol]

INTRODUCCIÓN

El parque automotor nacional del Perú es el responsable del 70% de la contaminación del aire existente. El porcentaje restante se le atribuye a las industrias (MINAN, 2012). Esto se debe que a cada año aumenta, considerablemente, el número de vehículos en circulación. Donde en el año 2000 se tuvo en circulación 1 162 859 vehículos y en el año 2014 se tuvo 2 423 696 vehículos, lo cual representa un aumento promedio de 90 000 vehículos cada año (INEI, 2015).

Los efectos perjudiciales a las personas que causan los gases que emiten los vehículos son los siguientes (MINAN, 2012):

- El dióxido de azufre puede provocar el estrechamiento de las vías aéreas, lo cual disminuye o bloquea el flujo de aire; y traqueítis o infección de la tráquea.
- El monóxido de carbono bloquea el transporte de oxígeno hacia las células y causa mareos, dolor de cabeza, náuseas y estado de inconciencia.
- El dióxido de nitrógeno puede irritar las vías respiratorias, causar bronquitis y pulmonía, además de reducir de forma significativa la resistencia respiratoria a las infecciones.
- Los gases emitidos por vehículos antiguos son el benceno y el plomo. El primero de ellos produce efectos nocivos en la médula ósea, daña el sistema inmunológico y se asocia a la leucemia mieloide; mientras que el segundo retrasa el aprendizaje y altera la conducta.

Por otra parte, la capital del Perú, Lima, es considerada no solo como la ciudad que posee el aire más contaminado a nivel nacional sino también en América Latina [OMS, 2014]. Lima posee el, en promedio, 64,5% de vehículos en circulación del parque automotor nacional. Además, se tiene, en promedio, un aumento anual de 58 200 vehículos en circulación en la ciudad de Lima (INEI, 2015).

Además, el 27 % de vehículos en circulación del parque automotor de Lima poseen más de quince años de antigüedad [SETAME, 2011] siendo estos vehículos los que emiten mayores concentraciones de gases contaminantes, debido a que no tienen la tecnología de post-tratamiento de gases. Por otro lado, la producción del etanol (caña de azúcar) en el Perú ha crecido considerablemente cada año (INEI, 2015). Este combustible es utilizado como aditivo para la mezcla con gasolina, donde su aporte

volumétrico es del 7,8%, definiendo la mezcla que comercialmente se conoce como gasohol. En la actualidad existen dos empresas ubicadas en el departamento de Piura que producen etanol. En primer lugar; la mayor productora de etanol del Perú es Caña Brava que tiene una capacidad de planta de 350 000 litros por día. Además, la empresa Maple (actualmente, propiedad del Grupo Gloria) es una productora importante de etanol que cuenta con una capacidad de producción de 130 millones de litros por año (Tipian, 2015).

Según World Wide Fuel Charter, el límite recomendado, específicamente, para la mezcla gasolina etanol con un contenido máximo de 10% de etanol en volumen (E10) es adecuado para el uso en vehículos con motores de encendido por chispa (World Fuel Charter Committee, 2009); es decir, los vehículos no necesitan de ninguna modificación en los motores en dicha mezcla de combustible. Sin embargo, para mezcla de etanol de nivel superior (mayor de E10) se necesita hacer modificaciones en los vehículos para el correcto funcionamiento.

Definición del problema

Los combustibles convencionales utilizados comúnmente provocan emisiones contaminantes perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Incluso, estos recursos no renovables son cada vez más escasos, de baja calidad y de mayores costos, y con el aumento de número de vehículos ya mencionados que utilizan estos combustibles trae consecuencias negativas tanto para la economía del país como para el ecosistema.

En la búsqueda de nuevas opciones para resolver los problemas generados por el uso de estos combustibles, se evalúan nuevas alternativas para la obtención de energía como el etanol y metanol biocombustible. Debido a que estos pueden utilizarse como aditivos para los combustibles derivados del petróleo, o como reemplazo total de estos últimos. Con la finalidad de disminuir las emisiones de los gases de escape de los vehículos, actualmente, se produce el combustible gasohol E7,8 para el parque automotor de Lima; sin embargo, no se tiene ni registro ni inventario sobre las emisiones y el consumo de combustible al emplear el E7,8. Por ello, no es posible cuantificar sus efectos ambientales y económicos. Además, no existen reportes sobre el uso de E10 en vehículos que circulan en la ciudad de Lima. Por eso, se ve la necesidad de desarrollar ensayos experimentales en campo utilizando un vehículo

liviano del parque automotor de Lima Metropolitana, los cuales utilizarán dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10.

Justificación

En el presente trabajo, se pretende realizar análisis experimentales en un vehículo (representativo de la flota urbana de Lima) funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7,8 y E10) para la evaluación comparativa del consumo de combustible e índice de emisiones al incrementar en 2,2 % el contenido de etanol en la gasolina comercial (gasohol, E7,8). Para ello, se instrumentará el vehículo e implementará un único sistema de adquisición de datos con el propósito de registrar en tiempo real el consumo de aire de admisión del motor, las emisiones de gases de escape, la distancia recorrida y velocidad del vehículo, y las condiciones ambientales durante las pruebas. La campaña experimental se desarrollará en dos circuitos de conducción urbana en Lima Metropolitana. El uso de un mayor porcentaje de etanol en la mezcla con la gasolina provocaría una reducción de las emisiones contaminantes producidas por el parque automotor de Lima Metropolitana y, también, se disminuiría la importación del petróleo y/o derivados. Sin embargo, en el Perú, la gasolina comercial (gasohol) contiene un 7,8% de etanol en volumen de la mezcla. Se cuenta con productores nacionales de este alcohol, surge la inquietud de qué pasaría si se aumenta en 2,2 % el porcentaje de etanol en la mezcla con la gasolina nacional. Otra razón, el etanol tiene un alto índice de octanaje que favorece la combustión y evita el golpeteo del motor. Una prueba importante para el aumento de etanol en la mezcla de la gasolina es el hecho de que el etanol introduce más oxígeno a la mezcla aire-combustible mejorando la eficiencia de la combustión debido a la presencia de un átomo de oxígeno en su composición (Tipian, 2015).

Los resultados esperados del estudio propuesto permitirán comparar cuantitativamente los diversos efectos de las emisiones contaminantes y la mayor o menor economía en el consumo de combustible del vehículo de las mezclas E7,8 y E10. También, se realizará un registro de datos sobre el consumo e índice de emisiones al emplear éstos combustibles.

El uso de la mezcla de gasohol E10 (90 % de gasolina y 10 % de etanol) en las actuales tecnologías vehiculares reducirá las emisiones de CO y HC sin alterar

drásticamente el consumo de combustible en condiciones urbanas de manejo en Lima Metropolitana.

Objetivo general

- Evaluar la comparación del consumo de combustible e índices de emisiones de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7,8 y E10) en dos circuitos de conducción urbana en Lima Metropolitana.

Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología experimental que permita evaluar, en condiciones reales de funcionamiento, el consumo promedio de combustible de los vehículos que circulan en Lima Metropolitana.
- Desarrollar una metodología experimental que permita evaluar, en condiciones reales de funcionamiento, los índices de emisiones de gases de escape del vehículo que circula en Lima Metropolitana.
- Evaluar, estadísticamente, datos de emisiones y consumo de combustible, tomados a cada segundo, durante circuitos reales de conducción de un vehículo liviano.
- Calcular el consumo de combustible, en km/L, de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas gasolina-etanol: E7,8 y E10.
- Calcular los índices de emisiones, en g/km, de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas gasolina-etanol: E7,8 y E10.
- Realizar una comparación cuantitativa del consumo de combustible e índices de emisiones de escape al aumentar el contenido de etanol en la gasolina comercial (de 7,8 % a 10 % bajo condiciones de tráfico y a “velocidad constante”).

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

La literatura internacional sobre el uso de mezclas gasolina-etanol es muy amplia, destacando los beneficios e inconvenientes al utilizar mezclas conteniendo desde 0% a 100% de etanol en la composición con la gasolina. A continuación se presenta un resumen de las investigaciones más relevantes sobre este tema y, además, metodológicas de mediciones de consumo de combustible y emisiones en conducción real de manejo y banco de dinamómetros.

En Monterrey (México), el Departamento de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Monterrey realizó una investigación para la evaluación del desempeño de las emisiones y el consumo de combustible de un vehículo híbrido (VH) respecto con cuatro vehículos de combustión interna (Menchaca et al., 2013).

Se utilizó un vehículo híbrido con las siguientes características Honda Civic Híbrido IMA 2006 (VH) con motor de combustión interna de 1,3 L de 100 hp a 6000 r.p.m. y motor eléctrico 20 HP a 2000 r.p.m. frente a cuatro vehículos convencionales Honda Civic (VC). Los resultados de las pruebas de rendimiento de combustible fueron el promedio de estos autos frente al auto híbrido. Se realizaron dos tipos de pruebas: arranque en frío se mantuvo apagado el motor por doce horas donde se realizaron veinte pruebas para VH y diez para VC; y arranque en caliente donde los vehículos se

mantuvieron apagados durante un lapso de diez minutos después de su uso cotidiano en donde se realizaron nueve pruebas para VH y diez para VC. Para condiciones reales de manejo, se realizaron diez pruebas en ciudad y cinco pruebas en carretera para VH; en cambio, para los vehículos VC, se realizaron ocho mediciones para cada una de las pruebas. Para las pruebas de emisiones de los gases de escape, se utilizó un analizador portátil marca Snap-On, modelo AL293-001. Para la determinación del consumo o rendimiento de combustible, se usaron los registros obtenidos por la computadora de viaje de vehículo y, también, los datos de las cantidades de cargas de combustible y las distancias en kilómetros entre cada carga (Menchaca et al., 2013).

Los resultados de esta experimentación mostraron que el VH posee un rendimiento promedio del consumo de combustible mayor en 31 % que el grupo de automóviles convencionales (16,5 km/L vs. 11,9 km/L respectivamente). En relación a las emisiones que generan en conducción con paradas frecuentes, el auto híbrido presentó menores emisiones con los siguientes resultados: 191,84 g/km de dióxido de carbono (CO₂), 0,21 g/km de monóxido de carbono (CO), 0,02 g/km de hidrocarburos no quemados (HC) y 0,006 g/km de óxidos de nitrógeno (NO_x) frente al auto convencional que generó 308,14 g/km, 0,79 g/km, 0,12 g/km y 0,11 g/km de cada contaminante, respectivamente. De acuerdo a los resultados, los autores de este experimento recomiendan el uso de la tecnología híbrida en ciudad. Sin embargo, para el uso de esta tecnología híbrida en conducción en carretera no habría una diferencia significativa en la emisión de los gases debido que estos autos fueron diseñados para el manejo en ciudad. Además, la autora recomienda que se debería de fomentar una nueva tecnología para disminuir las emisiones en arranque frío ya que según el experimento el registro de emisiones más altos se dio durante el arranque en frío para ambas tecnologías (Menchaca et al., 2013).

El instituto tecnológico de Monterrey realizó un trabajo experimental para la estimación del ahorro de combustible y las emisiones mediante la comparación de cuatro mezclas de gasolina-etanol con dos tipos de gasolina comerciales, en tres vehículos ligeros circulando en la ciudad de Monterrey, México. Los tres vehículos ligeros fueron: Nissan Tsuru 2004 (con motor 1,6 L, 132 hp, 6400 r.p.m.), VW Derby 2005 (con motor 1.8 L, 132 hp, 5500 r.p.m.) y Jeep Compass 2008 (con motor 2.4 L, 172 hp, 5400 r.p.m.). Además, se experimentó con dos gasolinas comerciales: regular (87 octanos, R) y premium (92 octanos, P) y cuatro mezclas de gasolina y etanol: E5R (5% de

etanol en la mezcla de gasolina regular), E5P (5% de etanol en la mezcla de gasolina premium), E15R (15% de etanol en la mezcla de gasolina premium), E15P (15% de etanol en la mezcla de gasolina premium). Se realizaron tres tipos pruebas: arranque en frío (donde previamente se mantuvo apagado el motor de los vehículos por doce horas), arranque en caliente (donde los vehículos se mantuvieron apagados durante un lapso de diez minutos) y velocidad constante (donde los vehículos circularon en vías sin tráfico vehicular) en un circuito de 3 km. Se realizaron cinco veces cada prueba mencionada para cada mezcla de combustible. Para las pruebas de emisiones de los gases de escape, se utilizó un analizador portátil marca Snap-On, modelo AL293-001 (similar al empleador por Menchada y colaboradores [1]). Para estimar el consumo de combustible en condiciones de conducción real, se utilizó un circuito de 16,8 km de longitud en donde la diferencia entre los volúmenes inicial y final se tomó como el consumo los datos de las cantidades de cargas de combustible y las distancias en kilómetros entre cada carga (Hernández et al., 2014).

Los resultados de esta experimentación mostraron que el ahorro de combustible disminuyó hasta 4.4 % en la mezcla E5R y 9.9% en la mezcla E15R. Para las mezclas de gasolina premium (alta calidad), la disminución del ahorro de combustible fue menor: 2,9% y 5,5% para las mezclas E5P y E15P respectivamente. Además, el vehículo más reciente, Jeep Compass, presentó un menor ahorro de combustible. En relación a las emisiones, las mezclas premium, y en particular la mezcla E15P, mostró las menores emisiones con los siguientes resultados: 0,77g/km de CO, 0,0032 g/km de HC y 0,017 g/km de NO_x. Los resultados para las emisiones de NO_x se obtuvieron, solamente, durante las pruebas de arranque en frío y caliente. Además, las emisiones de HC fueron mayores para las mezclas Premium (0,032 g/km-E15P y 0,038 g/km-E5P) en comparación con las correspondientes mezclas regulares (0,024 g/km-E15R y 0,024 g/km-E5R). Los datos de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) no fueron significativas para las pruebas realizadas. Estos resultados mostraron que cambios tecnológicos en los vehículos y formulaciones de base de gasolina podría contrarrestar el efecto negativo de los valores caloríficos inferiores de la mezclas de etanol. En general, las mezclas Premium dieron los mejores resultados en términos de ahorro de combustible y, con la excepción de HC, reducciones de otros contaminantes atmosféricos (Hernández et al., 2014).

Los investigadores de la Universidad Tecnológica de Pereira realizaron un estudio del comportamiento de vehículos de carburador e inyección con cuatro mezclas de gasolina y etanol (E0, E10, E12 y E15). Se utilizaron veinticuatro automóviles representativos del parque automotor colombiano, siete carburados y diecisiete de inyección. Los resultados mostraron que el incremento en las mezclas de E10 a E12 y posteriormente a E15 no genera cambios que sean perceptibles por el usuario en cuanto al comportamiento general del vehículo; es decir, los cambios en el torque, potencia, aceleración y consumo de combustible fueron mínimos. En relación a las emisiones, el aumento en la mezcla de etanol generó mayor eficiencia de combustión, por lo cual se presenta una ligera tendencia de incremento de CO₂ y una reducción de las emisiones de HC y CO. Además, los resultados de las emisiones con todas las mezclas realizadas en el estudio se ubicaron dentro de los rangos y límites establecidos por la legislación colombiana. Finalmente, en relación con el comportamiento de autopartes y materiales del vehículo, los resultados muestran que al aumentar la mezcla con etanol hasta E15, no hay cambios diferentes al deterioro normal de las autopartes sometidas al uso de gasolina pura (E0) (UTP, 2010).

Los autores concluyeron que el uso de mezclas de etanol hasta E15 en vehículos que no poseen la tecnología Flex Fuel (vehículo flexible) es viable y beneficioso, al reducir las emisiones que son perjudiciales para el ambiente y la salud humana y no generar deterioro adicional a las autopartes y mantener el comportamiento óptimo mecánico (UTP, 2010)

El centro de Investigación Técnica de Finlandia realizó un estudio experimental en laboratorio con tres vehículos con diferentes tecnologías. El primer vehículo, año 2010, posee un motor de encendido por chispa de cuatro cilindros y trabaja con un sistema de inyección directa (FSI). El segundo vehículo, año 2010, posee un motor de encendido por chispa de cuatro cilindros, dieciséis válvulas y un sistema variable que controla la apertura de las válvulas de admisión¹ (MPFI). Estos dos vehículos representan a los vehículos convencionales que circulan en la ciudad de Espoo y que no son, necesariamente, compatibles con combustibles que contengan más de 4 % masa de oxígeno en el combustible (4 % m/m). El último vehículo, año 2006, trabaja con un motor de encendido por chispa de cuatro cilindros y cuenta con un

¹ MPFI: Sistema que regula la cantidad de aire necesario para cierta cantidad de combustible, con ello logra una mejor eficiencia volumétrica y un menor consumo específico de combustible del vehículo.

turbocompresor; este vehículo representa a los vehículos flexibles² (VF). En la Tabla 1.1, se presenta los catorce combustibles (trece biocombustibles y más la gasolina) que fueron evaluados en los vehículos a -7 °C; es decir, funcionando en arranque en frío. Además, los combustibles con porcentaje de oxígeno mayor a 4 % m/m, solamente, fueron evaluados en el vehículo flexible. Se realizaron, en general, tres pruebas para cada combinación de combustible y vehículo. Por otro lado, debido que los vehículos poseen tecnologías distintas, las diferencias entre los biocombustibles y gasolina influyeron en gran medida en el comportamiento de los vehículos. Por ello, algunos beneficios de los combustibles para cierto vehículo, no necesariamente va a ser el mismo para cuando se utilice en otro vehículo con diferente tecnología (Paivi et al., 2011).

Tabla 1.1 - Combustibles usados en la experimentación de Paivi y colaboradores.

COMBUSTIBLE	OXIGENO %m/m	PODER CALORIFICO (MJ/kg)
ALTO CONTENIDO DE OXIGENO		
E85	29.8	28.9
E30	11.3	38.2
E+eth	10.3	38.4
iB+eth	7.3	40.1
iB (21)	5.8	40.9
BAJO CONTENIDO DE OXIGENO		
Gasolina	0.1	43.6
E10	3.7	41.4
iB (14)	3.8	41.6
nB	4	41.5
eth	3.5	41.5
R	0	43.4
R+E	4	41.4
R+eth	3.4	41.6
R+iB	3.8	41.5

E = etanol; eth = ETBE (etil-tert-butil-eter); iB = isobutanol; nB = n-butanol; R = bio-hidrocarburos renovables; iB (14) = combustible con una cantidad de isobutanol que contiene una energía equivalente al 14% de la energía suministrada por el combustible constituido por 100% gasolina.

De acuerdo a con los resultados, se determinó que, para los vehículos convencionales (FSI y MPFI) la cantidad de emisiones de CO fue menor cuando se usó biocombustibles, que para cuando se usó gasolina; para el vehículo FSI, la cantidad de emisiones de HC fue menor cuando se usó biocombustibles que cuando se usó

² Vehículo flexible: es un vehículo que es compatible con biocombustible con alto contenido de oxígeno (mayores a 4% m/m)

gasolina, con la excepción del n-butanol. Sin embargo, para los vehículos MPFI y FFV la cantidad de emisiones de HC usando biocombustibles fue casi igual que al usar gasolina. En relación a las emisiones de NO_x , los investigadores encontraron que para los vehículos MPFI y FSI la cantidad de emisiones de NO_x usando biocombustibles fue mayor que al usar gasolina; con la excepción del R+eth; en cambio, cuando se usó biocombustibles en el vehículo FFV la cantidad de emisiones de NO_x fue menor que al usar gasolina (Paivi et al., 2011).

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos realizó un estudio para determinar el consumo de combustible, las emisiones de los gases de escape y el comportamiento en seis modelos de vehículos con mezclas de combustibles E0, E15 y E20 durante un año de pruebas en la ciudad de Colorado. Se eligieron seis modelos de vehículos diferentes para las pruebas. Cuatro tipos de vehículos del año 2009 (Honda Odyssey, Ford Focus, Toyota Camry, Statum Outlook) y dos tipos de vehículos del año 2000 (Honda Accord y Ford Focus). Para cada modelo elegido, se contrató a tres vehículos en donde los tres autos en conjunto tenían la misma familia de motores. Un vehículo de cada modelo fue envejecido con gasolina pura (E0), el otro con 15 % de etanol mezclado en la gasolina (E15), y el tercero en 20 % de etanol mezclado en la gasolina (E20). Para cada modelo de vehículo, los resultados de las pruebas con E0, E15 y E20 se compararon directamente a evaluar el impacto del contenido de etanol en las emisiones de escape. Para las pruebas en los vehículos en laboratorio, se utilizaron ocho dinamómetros de acumulación de kilometraje (Vertin et al., 2012).

Los resultados de estas pruebas fueron que todos los autos experimentaron una reducción en la economía de combustible de 7,7% al emplear E20 con respecto al E0. En relación a las emisiones, los resultados de NO_x no registraron variaciones significativas con el cambio de porcentaje de etanol ensayado. Sin embargo, se reportaron disminuciones del CO y los HC con el aumento del porcentaje de etanol. Adicionalmente, en este estudio se realizó un análisis de la variación de la temperatura de los gases producto de la combustión al pasar por los catalizadores de cada vehículo, reportando que a condiciones de baja carga no se registraron cambios en la variación de temperatura de los gases al aumentar el contenido del etanol. Sin embargo, en los otros rangos de operación se tuvo dos resultados: nueve de los vehículos de prueba realizaron un ajuste desde la computadora para mantener la

mezcla estequiometría pese a la inclusión del E20 logrando una mínima variación en las temperaturas y siete de los vehículos se registró un enriquecimiento de la mezcla para la combustión con E20 aumentando la temperatura a la salida del catalizador entre 29 °C y 35 °C con respecto a las emisiones de E0. Finalmente, con respecto al comportamiento de los autos experimentados, no se registraron inconvenientes relacionados con el aumento del porcentaje del etanol (Vertin et al., 2012).

Andrzej Kuranc elaboró un estudio acerca de soluciones técnicas en el área de investigación de las emisiones de escape en condiciones operativas reales de un vehículo en la ciudad de Lublin (Polonia). El autor describe su propia metodología de investigación de conducción de las emisiones con el uso de la información sobre el flujo de suministro de aire de un motor (OBD II) y las mediciones de concentraciones volumétricas de los componentes particulares de las emisiones (analizador de gases de escape). Los resultados confirman la posibilidad de aplicar este método de medición y su análisis muestra diferencias con las pruebas de homologación en comparación con el funcionamiento real del vehículo. Debido a que el analizador de gases mide las concentraciones volumétricas de los componentes de emisiones sin posibilidad de determinar sus tasas de flujo, existe una necesidad para completar el sistema en construcción con un elemento que permite la definición del flujo. Por consiguiente, un enlace de conector de datos (DLC) se utilizó para registrar el flujo de aire que pasa por el colector de admisión (Kuranc, 2015).

El auto utilizado en las pruebas fue el nuevo vehículo de Toyota (ver Tabla 2), modelo Corolla Verso 2013 con un kilometraje de 16 500 km, equipado con un motor 2ZR-FAE de gasolina de inyección de combustible multipunto con un válvula variable que cronometra sistema Valvematic y un sistema EOBD (European a bordo diagnóstico) y DLC que permite la conexión de grabador de datos de rendimiento de un motor. Antes de que el vehículo se introdujera al mercado fue sometido a las pruebas de homologación donde obtuvo la aprobación de los requerimientos de emisiones estándar Euro 5. Los principales dispositivos utilizados en la investigación fueron: analizador de gases de escape MGT5 de MAHA clasificado en la clase 0 según OIML (Organización Internacional de Metrología Legal), un registrador de datos de motor y un teléfono con un receptor GPS para registrar los datos de la ruta recorrida. La conducción se llevó a cabo de una manera similar a otros usuarios de la carretera que conducen en Lublin en una ruta de 6,95 km de longitud con la velocidad media de 25,8

km/h. El vehículo fue cargado con su propia masa, la masa de los instrumentos de medición, un conductor y un pasajero. Antes de la conducción, el vehículo de la prueba había sido pesado en un coche de escalas y la masa total fue de 1726 kg. Al principio de la conducción, se calienta el motor del vehículo (Kuranc, 2015).

Basado en el análisis y los resultados presentados del artículo, el autor hace las siguientes conclusiones:

- El estudio descrito en el documento confirma que las medidas de emisión son posibles con el uso de un analizador de gases diagnóstico y señales de EOBD vía DLC.
- Los gases de escape medidos en condiciones reales pueden variar significativamente de los límites especificados para la prueba de homologación en un laboratorio (213 g/km vs 158 g/km) de CO₂.
- La metodología de la investigación presentada y la preparación de resultados son bastante laboriosos pero muestran la posibilidad de construir sistemas de medición similares que permiten al usuario un registro automático de cálculo y los resultados de las emisiones de escape cuantitativo.
- Las pruebas de homologación puede contribuir a malos entendidos, porque casi nunca los usuarios del vehículo alcanzan el contenido permisible de emisión de CO₂ en un nivel bajo que se indica para el examen de aprobación.

El departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Minnesota realizó una evaluación de facilidad de conducción de una flota de vehículos de prueba que consiste en 80 vehículos, que comprende 40 pares de similares vehículos con los patrones de uso similares. Uno de cada par de los vehículos fue alimentado con el combustible de referencia para la prueba programa (E0) y el otro fue alimentado con el proyecto combustible de prueba (E20). Se pidió a los conductores de vehículos de completar hojas de registro diario para anotar cualquier problema del auto. Estas evaluaciones de conductores fueron compilados durante todo el estudio junto con el mantenimiento y los datos de consumo de combustible. Las pruebas se realizaron durante un año en otoño, invierno, primavera y verano en el campus de la universidad. Para la flota de prueba, 40 pares de vehículos fueron elegidos de los estudiantes de la Universidad de Minnesota. No se tuvo vehículos con carburador en este programa, pero se incluyeron los híbridos. Los modelos de los años vehículo oscilaron entre 2000 y 2006. El desplazamiento del motor varió de 1,5 a 8,1 litros. La flota estaba

compuesta por catorce vehículos de turismos y 66 entre camiones ligeros y furgonetas. Los vehículos fueron fabricados por DaimlerChrysler, Ford, General Motors y Toyota (Kittelson et al., 2007).

Se registraron las siguientes conclusiones:

- Análisis de los datos y evaluaciones de maniobrabilidad de los vehículos generados por los conductores revela que las diferencias de rendimiento estacionales entre E0 y E20 son inconsistentes y no estadísticamente significativa. Todas las pruebas estadísticas se basan en el requisito de un nivel de confianza del 95 %.
- Estudio de los registros de mantenimiento de los cuarenta vehículos de prueba E20 revelan que haya dos casos de insuficiencia operatividad del vehículo. En un caso, el regulador de presión del sistema de combustible falló y, tras la inspección, se determinó a ser un problema hardware relacionado bastante común. El otro caso se refiere a la unidad de control electrónico.
- Las propiedades de los combustibles E0 y E20 utilizados en el programa fueron controlados a través de pruebas regulares. Las principales propiedades se resumen a continuación:
 - Contenido de etanol de los combustibles nominales E20 osciló desde 18,7 hasta 22,8 % en volumen a lo largo de los trece estudio mes facilidad de conducción del vehículo.
 - El índice de facilidad de conducción (DI) de los combustibles E20, ajustados por contenido real de etanol, varió de 973 (invierno) dE1046 (verano). El DI de los combustibles E0 varió dE1042 (invierno) a 1199 (verano). Según las especificaciones de la ASTM para Minnesota, los dos combustibles poseen una mayor garantía en arranque en frío y en conducción ya que sus índices de facilidades de conducción eran menores a los máximos de DI durante el invierno 1200 y 1250 durante el verano.
 - Relación de vapor-líquido (TVL20s) de los combustibles E20 varió dE104 ° F (invierno) a 127 °F (verano), mientras que los combustibles E0 variaron dE106 °F (invierno) a 142 °F (verano). Según las especificaciones de la ASTM para Minnesota, los dos combustibles poseían mayor protección contra los problemas de funcionamiento del sistema de combustible de tipo bloqueo vapor (con excepción de E20

en invierno) ya que sus TVL20s eran mayores a los mínimos de 105 °F durante el invierno y 124 °F durante el verano.

- El consumo de combustible para la flota de prueba en el transcurso del proyecto fue relativamente bajo: 11,9 MPG para los vehículos que operan con E0, y 11,8 MPG para los vehículos que operan con E20. Esto representa una disminución del 0,6% en el consumo promedio de combustible para los vehículos E20.

En la ciudad de Tainan (China), se realizó un estudio acerca de las prestaciones y emisiones contaminantes de un motor de encendido por chispa utilizando mezclas de etanol y gasolina con diferentes tasas combinadas (E0, E5, E10, E20, E30). Los aparatos para la investigación fueron tres sistemas principales: el sistema de motor, el sistema de medición de potencia y el sistema de medición de gases de escape. El sistema de motor usado en este experimento es un motor comercial, New Sentra GA16DE, que es un motor de gasolina de inyección de múltiples puntos 1600 cc. con diámetro interior del cilindro y longitud de carrera de 76,0 y 88,0 mm, respectivamente, y la relación de compresión de 9,5. Mediante el uso de control de bucle cerrado, se investigó el efecto de la adición de etanol en el rendimiento del motor y las emisiones. El segundo sistema para medir la potencia de salida del motor es un dinamómetro de corriente inducida de la marca BORGHI y SAVERI (FE60-100-150 Series). Y el último sistema para medir las concentraciones de CO, CO y HC en los gases de escape se usa un analizador de UREX-5000-4T con pre-calibración. La AFR y la relación de equivalencia de aire-combustible (λ) se pueden calcular simultáneamente por el analizador de acuerdo con las composiciones de los gases de escape. Debido a las características de impulsos del motor, se tomaron diez mediciones para promediar los datos para cada condición de operación. Las condiciones de operación seleccionadas para este experimento son las siguientes: las velocidades del motor están en 1000, 2000, 3000 y 4000 r.p.m.; válvulas de mariposa están en 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de apertura. Con esas condiciones de funcionamiento, podemos tener una comprensión completa de los efectos de la adición de etanol en el rendimiento del motor y las emisiones contaminantes (Wei-Dong Hsieh et al., 2001).

Los resultados experimentales indican que el uso de combustibles con mezcla de etanol y gasolina, el torque de salida y el consumo de combustible del motor aumentan ligeramente; las emisiones (CO y HC) disminuyeron drásticamente como

resultado del efecto causado por la adición de etanol y las emisiones de CO₂ aumenta debido a una combustión mejorada. Por ello, en este estudio se tuvo los siguientes resultados: las emisiones (CO y HC) pueden reducirse de 10 % hasta 90 % y de 20 % hasta 80 %, respectivamente, mientras que los incrementos de emisión de CO₂ de 5 % hasta 25 %, dependiendo de las condiciones del motor. Se observó que la emisión de NO_x estaba estrechamente relacionada con la relación de equivalencia, de manera que la emisión de NO_x alcanzaba un máximo cerca de la condición estequiometría ($\lambda = 1$); y que NO_x depende de la condición de funcionamiento del motor en lugar del contenido de etanol (Wei-Dong Hsieh et al., 2001).

La Escuela Politécnica Nacional de Quito realizó un estudio del comportamiento de un motor a gasolina utilizando alcohol anhidro como combustible de aporte. Se plantearon pruebas estáticas, dinámicas y en ruta utilizando combustible comercial y añadiendo alcohol anhidro en diferentes mezclas (E5, E10, E15 y E20) en un vehículo Chevrolet Aveo de inyección electrónica de 1600 cc. Las pruebas en ruta se realizaron en la ciudad de Quito. Para la medición de los gases contaminantes, se utilizaron los siguientes equipos: analizador de gases de marca Nextech modelo NGA 6000, Scanner automotriz de marca Nextech modelo Carman Scan VG+, GPS de la Marca Garmin modelo 76CSx e inversor de corriente. Para la medición del consumo de combustible, se determinó por medio de flujómetros (Biotech) que enviaban pulsos a una pantalla digital (Biotech) donde transforman esos pulsos en cantidad de combustible consumida. En las pruebas estáticas, para la medición de los gases contaminantes se basó en el procedimiento de la norma técnica nacional de Ecuador (INEN 2203.99). Para las pruebas de torque y potencia, se determinó el comportamiento del motor según las variaciones de la adición de etanol en el combustible. En esta prueba, se usó un dinámetro de chasis (MAHA LPS 3000) y una computadora con el software del equipo de dinamómetro. En relación a las pruebas dinámicas bajo las condiciones de 50 % de carga y 15 millas por hora y 25 % de carga y 25 millas por hora, se utilizó un banco de pruebas (ASM BF EURO), computadora portátil y el mismo analizador de gases que se usó en la pruebas en ruta (Freire et al., 2013).

Los autores concluyen, en base a los resultados de las pruebas, lo siguiente:

- El consumo de combustible se incrementa cuando se aumenta el contenido de etanol, debido a que el rendimiento energético es más bajo.

- Con respecto a las concentraciones de los gases contaminantes, el dióxido de carbono se mantuvo constante, se incrementaron las concentraciones de O_2 y NO_x y se redujeron las emisiones de HC y CO en relación a las cantidades obtenidas de la gasolina comercial (Freire et al., 2013).

La exploración de la literatura mostrada en este capítulo manifiesta que el contenido de etanol en la mezcla con gasolina posee resultados positivos y algunos inconvenientes. Por ejemplo, en los estudios se tiene como resultado el aumento del consumo de combustible y las emisiones NO_x al incrementar el contenido de etanol en la mezcla de combustible. Sin embargo, en la mayoría de los estudios, se tiene una reducción en las emisiones de CO y HC. Por otra parte, durante la investigación de la literatura no se encontró artículos ni inventario sobre el uso de la mezcla gasolina-etanol en Perú. Por ello, el presente trabajo de tesis procura aportar a la literatura, desarrollando pruebas en conducción real en Lima Metropolitana en un vehículo ligero.



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo, se explicará las principales características fisicoquímicas de la gasolina y etanol, luego el uso de la mezcla de gasolina y etanol y las modificaciones que se debe realizar el motor según el contenido de etanol en dicha mezcla. En el punto 2.4, se realizará una breve explicación del funcionamiento de un motor de combustión interna. Finalmente, se explicará los gases fundamentales emitidos por el motor: oxígeno residual (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC).

2.1. Características de la gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos derivada del petróleo, que se utiliza como combustible en motores de combustión interna de ignición por chispa; su fórmula química es C_5H_{12} y C_9H_{20} (Pemex, 2004). La gasolina se obtiene del petróleo, el cual es procesado transformándose en derivados comercializables. Es de color rojo, con un olor característico un tanto agradable, pero al estar por periodos prolongados en contacto, llega a causar náuseas. En la Tabla 2.1, se observa las propiedades fisicoquímicas de la gasolina (Pemex, 2004).

Las gasolinas contienen aditivos químicos llamados oxigenantes. Los oxigenantes contribuyen a que exista la combustión completa en los motores; de esta forma se reduce la cantidad de gases contaminantes emitidos al medio ambiente, principalmente monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados. Existen muchos tipos de oxigenantes utilizados para las gasolinas, como los éteres. El Metil Tert Butil Eter (MTBE) es un tipo de éter que al mezclarlo con la gasolina eleva el octanaje del producto final; este aditivo vino a sustituir al plomo debido a que este último presentaba impactos negativos en la salud, como la aparición de cáncer y la contaminación ambiental, también porque el MTBE es menos costoso que el plomo y puede ser producido en las mismas refinerías de petróleo (Carrasco, 2014).

Tabla 2.1 - Características fisicoquímicas de la gasolina .Adaptación de datos de Repsol.

Parámetros representativos	Unidades	Valor
Temperatura de ebullición	°C	33
Temperatura de inflamación	°C	46
Temperatura de autoinflamación	°C	200
Solubilidad en agua	-	Insoluble
Presión de vapor	atm	0,7
Densidad	g/cm ³	0,709 – 0,727
Poder calorífico inferior	KJ/kg	44 000
Poder calorífico superior	KJ/kg	47 300
Numero de octanaje (RON-MON)	KJ/kg	91-80
Relación estequiométrica	-	14,7-15

El MTBE es un compuesto químico que ocasiona enfermedades cancerosas y alteraciones genéticas; es muy volátil y completamente soluble en el agua, lo que puede ocasionar contaminación en fuentes de abastecimiento de agua potable (EPA, 2005). Estudios realizados por algunos organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), indican que el MTBE también tiene efectos nocivos sobre el ambiente y la salud del ser humano.

Por otra parte, los alcoholes suelen, también, utilizarse como fuente de oxigenantes. Algunas utilidades de emplear etanol en lugar de MTBE es que contiene el doble contenido en peso de oxígeno (35 %) que tiene el MTBE, produciendo una combustión más completa. Adicionalmente, el etanol es particularmente biodegradable, eliminando algunas de las preocupaciones relativas a la contaminación de agua que, como ya se vio, se le han atribuido al MTBE (Montoya, 2006).

2.2. Características del etanol combustible

El etanol, también conocido como alcohol etílico, es un líquido incoloro de fórmula química $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (o también expresado como $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (I. Monfel, 2005), inflamable, de olor y sabor agradable, miscible en agua en todas sus proporciones y con la mayoría de los disolventes orgánicos. Debido a que el etanol contiene hasta un 35 % de oxígeno en su composición, puede provocar una combustión más completa en el motor, generando, menores emisiones de gases contaminantes hacia la atmósfera. En la Tabla 2.2 se observa las propiedades fisicoquímicas del etanol anhidro.

Tabla 2.2 - Características fisicoquímicas del etanol anhidro (I. Monfel, 2005).

Parámetros representativos	Unidades	Valor
Temperatura de ebullición	°C	78,5
Temperatura de inflamación	°C	13
Temperatura de autoignición	°C	363
Densidad relativa	g/cm ³	0,79
Solubilidad en agua	-	Miscible
Presión de vapor	Kpa	43
Poder calorífico inferior	KJ/kg	26 810
Poder calorífico superior	KJ/kg	29 670
Numero de octanaje (RON-MON)	-	109/98
Relación estequiométrica	-	9

El etanol se obtiene a partir del etileno por hidratación catalítica o por una reacción de adición de ácido sulfúrico e hidrólisis posterior. Se produce también por fermentación de productos naturales ricos en hidratos de carbono, tales como la caña de azúcar, papa, maíz y arroz, principalmente (Montoya, 2006). Existen varios tipos de etanol, de acuerdo a la cantidad de agua que tiene presente, como lo son alcohol de 70 %, alcohol de 96 %, alcohol de 26 %, etc. Ese número, se refiere al contenido volumétrico de etanol, el valor restante se refiere a la cantidad de agua; por ejemplo el alcohol de 96 % tiene un 4 % en volumen de contenido de agua y 96 % de alcohol absoluto.

El etanol absoluto, o etanol anhidro es el que tiene el más bajo contenido de agua. Para que el etanol se considere absoluto, debe tener una proporción de volumen de agua menor al 0.5%. Este tipo de etanol se utiliza en la industria como solvente de algunos compuestos, pero principalmente se utiliza como combustible, mezclándose con gasolina en distintos proporciones (Espinoza, 2010).

El contenido máximo de pureza que se puede obtener de un etanol por medio de destilación normal es del 96 %. En este nivel, la mezcla etanol-agua tiene un comportamiento azeotrópico, con lo que las propiedades químicas y físicas de ambos compuestos se fusionan en uno, conservando las propiedades del etanol; por ello, para obtener etanol anhidro se requiere de un proceso extra a la destilación, lo que trae como consecuencia un encarecimiento del producto (Pérez, 2007), llegando a ser económicamente inviable para su uso en países que empiezan la producción de este tipo de combustible, como el caso de Perú.

2.3. Mezclas de gasolina y etanol

La idea de agregar bajos contenidos de etanol a la gasolina no es nueva, ya que a raíz de la crisis energética de los años 70's, se empezaron a utilizar mezclas de etanol o metanol con diesel y gasolina. Inicialmente, el metanol fue considerado el alcohol más atractivo para ser mezclado con la gasolina, debido a que es producido a partir del gas natural, a un bajo costo y es fácilmente mezclable con la gasolina. Sin embargo, la experiencia llevó a los investigadores a darse cuenta de que el uso de este aditivo, conllevaba a un estricto control de seguridad a la hora de su transporte y almacenamiento, ya que es muy corrosivo en algunos materiales como el plástico e incluso metales, con lo cual, los automóviles empezaron a dar problemas en su funcionamiento. Es por ello que el etanol se utiliza desde esa época para mezclarse en distintas proporciones con la gasolina (AVL, 2005).

En países como Estados Unidos y Canadá, se le llama gasohol a la mezcla de gasolina y alcohol en distintas proporciones. El uso más común de este término se refiere a la mezcla con 10 % etanol y 90 % gasolina en volumen, pero también se utiliza en general para referirse a las mezclas con bajos contenidos de alcohol, usualmente inferiores al 25 %. Las mezclas que contienen un alto porcentaje de alcohol requieren que el sistema de inyección y otros componentes del motor sean adaptados a las propiedades químicas del alcohol, con mayor atención a los efectos corrosivos (Nichols, 2003). La proporción entre ambos combustibles se suele indicar con el porcentaje de etanol precedido por una letra E mayúscula. De esta manera, el combustible E10 se compone de 10 % etanol y 90 % gasolina y, análogamente, el E85 se obtiene mezclando 85 % etanol y 15 % gasolina (Nichols, 2003).

El E10 es una mezcla que puede usarse en los motores de encendido por chispa de la mayoría de los automóviles sin producir daño alguno en ellos (World Fuel C.C, 2009). En diversas literaturas se describe que el uso de mezclas E10 no exige modificaciones en los motores, pero para mezclas de mayor porcentaje de etanol, se requiere un diseño especial del motor. Aunque por otro lado, existen evidencias de que para mezclas mayores al 10 % de etanol, ya se requieren modificaciones especiales para el correcto funcionamiento del motor. Los componentes del motor más afectados por concentraciones mayores de etanol se pueden resumir de la siguiente manera:

- I. **E10:** para mezclas de hasta un 10 % de etanol únicamente se requiere modificación en el carburador, ya que el convencional es de aluminio y por lo tanto, un contenido mayor de etanol puede dañarlo. Se debe sustituir o utilizar un tratamiento de superficie o un anodizado. La inyección electrónica no necesita ninguna modificación (Mello, 2006) y (World Fuel C.C, 2009).
- II. **E10-E20:** para mezclas con 10 % a 20 % de etanol, se requiere, además de sustituir el carburador (debido al problema anteriormente mencionado), sustituir los componentes de poliamida³ por otros materiales que soporten el contenido de etanol. En el sistema de inyección electrónica, se requiere sustituir los inyectores convencionales por unos de acero inoxidable, con la finalidad de favorecer la atomización; se requiere una nueva calibración del motor y sustitución del sensor de oxígeno. Por el lado del tanque de combustible, si es metálico, la superficie interna debe ser protegida con un recubrimiento adecuado y, de igual manera, los componentes de poliamida deben ser sustituidos por otros materiales. La superficie interna de la bomba y los devanados deben ser recubiertos por un material anticorrosivo. El convertidor catalítico también requiere de un cambio, principalmente por la cantidad de metales nobles que están presentes en el catalizador (Joseph, 2007).
- **E20-E100:** para mezclas con 20% a 100 % de etanol, se requiere prácticamente una modificación total del motor, empezando por el carburador o inyectores, las partes metálicas y plásticas del motor, el tanque de combustible, tubo de escape, la bomba de combustible, múltiple de admisión, el dispositivo

³ Poliamida: es un termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto elevadas. Buen comportamiento al deslizamiento, y buena resistencia al desgaste. Aplicaciones en el sector automotriz: ventiladores, filtro aceite, filtro gasolina, cajas, rejilla radiadores, tapas motor.

de presión del combustible, sistema de ignición, y el filtro del combustible (Mello, 2006).

De forma general, la Tabla 2.3 muestra las modificaciones necesarias que debe tener un motor para que pueda operar correctamente según el porcentaje de etanol en las mezclas de gasolina y etanol.

Tabla 2.3 - Modificaciones necesarias en el motor para mezclas etanol-gasolina (Joseph, 2007).

Modificaciones en el motor	Cantidad de etanol			
	<=E10	E10-E25	E25-E85	E85-E100
Carburador	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Inyección combustible	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Bomba de combustible	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Filtro	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Sistema de encendido	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Tanque de combustible	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Convertidor catalítico	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Motor básico	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Aceite de motor	No ⁽²⁾	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Sistema de escape	No ⁽²⁾	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾	Si ⁽¹⁾
Sistema de arranque en frío	No ⁽²⁾	No ⁽²⁾	No ⁽²⁾	Si ⁽¹⁾

(1): Vehículos con modificaciones; (2): Vehículos de 15 – 20 años de antigüedad

Está comprobado que la utilización de aditivos oxigenantes reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC) en los gases de escape de los motores, al mismo tiempo que elevan el octanaje del combustible, lo cual permite reemplazar sustancias tóxicas como el ya mencionado MTBE (Torres, 2002).

2.4. Motores de combustión interna

En el Anexo 1, se explicará con detalle el funcionamiento de un motor de combustión interna.

2.5. Gases fundamentales

En el Anexo 1, también, se explica con detalle los principales gases emitido por un motor de combustión interna.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se explican las características del vehículo seleccionado representativo de Lima Metropolitana para la evaluación del consumo de combustible e índices de emisiones de gases de escape. Para el registro de datos, se instrumentó e implementó un único sistema de adquisición de datos SAD (Arduino) para registro de parámetros en tiempo real. Este sistema cuenta con los siguientes dispositivos de medición: sensor de flujo de aire (MAF), analizador de gases de escape, sistema de posicionamiento global (GPS) y sensores para el registro de las condiciones ambientales (humedad y temperatura). Los detalles del sistema de adquisición de datos son presentados en el subcapítulo 3.2.

La campaña experimental consideró dos tipos de circuito de conducción en el centro urbano de Lima Metropolitana: circuito en condiciones de tráfico y circuito a velocidad constante; es decir, se tiene un circuito representativo de la congestión vehicular en la ciudad de Lima y un circuito en una conocida autopista respectivamente. Los detalles de la definición de circuitos son presentados en el subcapítulo 3.3. En el subcapítulo 3.4, se describe la preparación de las mezclas de gasolina y etanol para las pruebas. Además, en el subcapítulo 3.5 se explica la metodología experimental en los dos circuitos. Se expresa las consideraciones del protocolo de campo que se debe tener para cada prueba, estas consideraciones se detallan en el subcapítulo 3.6.

Finalmente, en el subcapítulo 3.7 se desarrolla las expresiones para el cálculo de los parámetros de los índices de emisiones y el consumo de combustible.

3.1. Características del vehículo representativo de la flota vehicular

Como se ha mencionado previamente en la introducción y en el subcapítulo 2.3, el límite recomendado, específicamente, para la mezcla gasolina etanol con un contenido máximo de etanol en volumen es el 10% de contenido en volumen (E10) en la mezcla. Este contenido es adecuado para el uso en vehículos con motores de encendido por chispa; es decir, los vehículos no necesitan de ninguna modificación en los motores en dicha mezcla de combustible. Por ello, en Lima Metropolitana se puede usar la mayoría de vehículos para las pruebas experimentales.

Según Araper⁴, el vehículo Hyundai Santa Fe es el más vendido desde el 2009, con 12 876 unidades comercializadas. Este vehículo se encuentra en la categoría Mini Suv cuatro puertas (M1).

3.1.1. Hyundai Santa Fe 2010

Camioneta de uso doméstico para zonas urbanas y rurales (ver Figura 3.1). Este auto cuenta con siete asientos, un motor DOCH (ver Figura 3.2) con cilindrada de 2400, tracción delantera (4x2) y posee caja mecánica para seis velocidades. El kilometraje del vehículo antes de las pruebas fue 45 000 km.

⁴ Araper: Asociación de Representantes Automotrices del Perú



Figura 3.1 – Vehículo Hyundai Santa Fe 2010.



Figura 3.2 - Motor DOCH del vehículo.

A continuación, en la Tabla.3.1 se presenta un resumen de los datos técnicos del vehículo utilizado en la campaña experimental.

Tabla.3.1 - Datos técnicos del vehículo (Manual de Santa Fe, 2011).

HYUNDAI SANTA FE 2010		
Parámetros	Unidad	Valor
Nº Cilindros	Un.	4
Volumen	L	2,349
Potencia máx.	HP	174
Velocidad a Potencia máx.	r.p.m.	6000
Torque máx.	N.m	226
Velocidad a Torque máx.	r.p.m.	3750
Peso bruto	kg	2505
Peso neto	kg	1680
Carga útil	kg	825
Año de fabricación	año	2010
Año del modelo	año	2011

Por otro lado, según la modificación del Decreto Supremo N° 047-2001-MTC (MTC, 2012), en la Tabla 3.2 se observa los límites establecidos permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial.

Tabla 3.2 - Límites máximo permisibles para vehículos en conducción y para inspección técnica a nivel nacional (MTC, 2012).

VEHÍCULOS DE LAS CATEGORIAS M y N CON MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA A GASOLINA, GAS LICUADO DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL VEHICULAR U OTROS COMBUSTIBLES ALTERNOS				
Año de fabricación	Altitud m.s.n.m.	CO % de volumen	HC ppm	CO+CO₂ % (mínimo)
Hasta 1995	0 a 1800	3,0	400	10 ⁽¹⁾
	>1800	3,0	450	8
1996 a 2002	0 a 1800	2,5	300	10 ⁽¹⁾
	> 18000	2,5	350	8
2003 en adelante	A cualquier altitud	0,5	100	12 ⁽¹⁾

(1) Sólo para GLP/GNV el valor mínimo de CO+CO₂ será 8%.

De acuerdo a la Tabla.3.1 y Tabla 3.2, el vehículo se encuentra en la categoría M1 y tendrá como límites permisibles: 0,5 % CO, 100 ppm HC y 12% CO+CO₂. Aquí es importante mencionar que, en mayo de 2016, el vehículo aprobó la revisión técnica. En la Tabla 3.3, se tiene los resultados de emisiones de gases del vehículo. En el Anexo 2, se puede ver como más detalle la revisión técnica.

Tabla 3.3 - Resultado de la prueba de emisiones del vehículo. Adaptación de datos de Farenet [ver Anexo 2.

Parámetros tomados								
T° Aceite (°C)	R.P.M.	Opacidad (m ⁻¹)	CO Ralenti (%)	CO+CO ₂ Ral. (%)	HC Ralenti (ppm)	CO acelerado (%)	CO+CO ₂ Acel. (&)	HC Acelera. (ppm)
80	850	-	0,05	13,50	61,00	0,05	13,51	62,00
APROBADO								

Comprobando los valores de la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se constatan que las emisiones del vehículo utilizado en las pruebas se encuentran por debajo de la normativa ambiental vigente. Estos valores se tendrán como referencia en el Capítulo 4: Análisis de resultados de las pruebas experimentales.

3.2. Sistema de adquisición de datos

Se instrumentó e implementó un único sistema de adquisición de datos mediante un una plataforma de hardware libre basada en una sencilla placa de entradas y salidas simple y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación. Para las pruebas, se usó la plataforma Arduino de la marca Genuino modelo Mega 2560. Las características técnicas de esta plataforma son presentadas en el Anexo 3.

En esta plataforma, se instrumentó cinco equipos de medición de datos: sensor de flujo másico de aire de admisión (MAF), analizador de gases de escape, sistema de posicionamiento global (GPS), sensor de parámetros ambientales (humedad y temperatura) y acelerómetro. Para las pruebas experimentales, solo se usaron los cuatro primeros equipos para el registro de datos y posteriormente análisis y resultados de estos. En la Figura 3.3, se observa el esquema del sistema de adquisición de datos (SAD) con los equipos de medición.

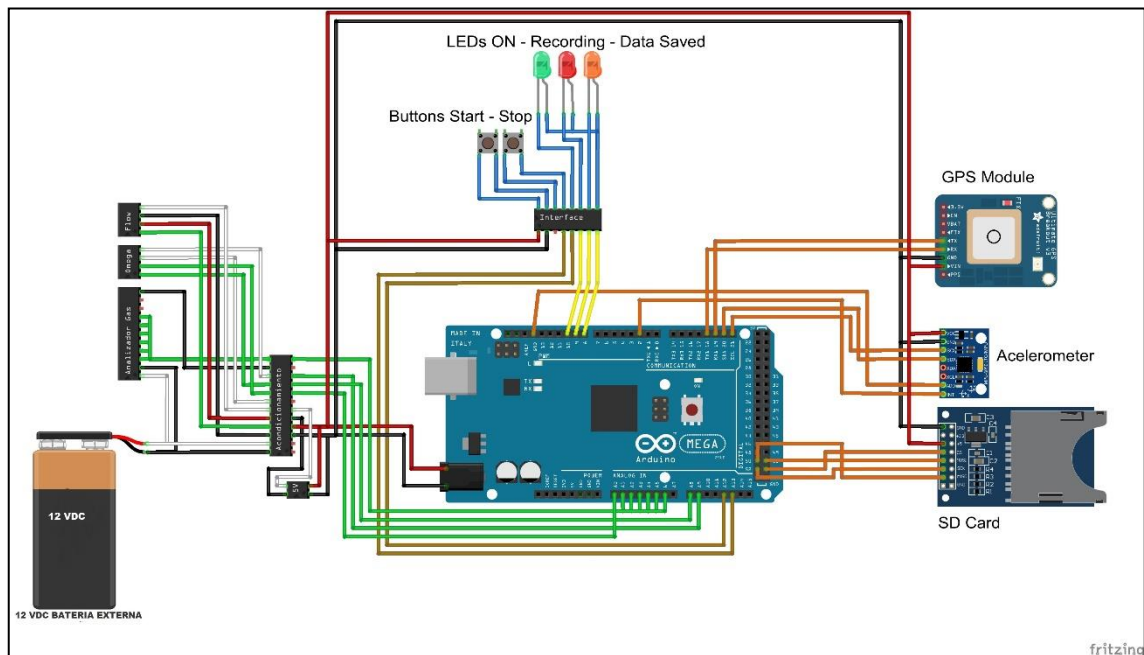


Figura 3.3 - Sistema de adquisición de datos (LABEN PUCP, 2016).

Este sistema de adquisición de datos presenta las siguientes características:

- **Alimentación:** el sistema tiene como fuente de alimentación una batería externa de 12 V (mediante conexión cocodrilos) Sin embargo, el analizador de gases se energiza directamente a la batería externa de 12 V y es ajeno al sistema de alimentación del SAD.
- **Cables:** las longitudes de los cables de datos del analizador de gases y el sensor omega hacia la plataforma del Arduino son iguales a dos metros. En el caso del sensor de flujo, el cable de datos es de tres metros de longitud. Para el resto de equipos de medición, las longitudes de cables son mínimas ya que se encuentran cerca de la arquitectura del Arduino.
- **Interfaz y funcionamiento:** el sistema dispone de dos botones de operación: inicio de grabación y parada de grabación. El sistema se enciende automáticamente una vez energizado y espera el ingreso de la tarjeta SD para poder grabar los datos. Además, posee de tres LEDs de estado: color azul que el SAD se encuentra energizado y no cuenta con la tarjeta SD, color rojo que el sistema está grabando datos y el color verde que indica que ha guardado los datos correctamente y se puede sacar la tarjeta SD. Si se presiona el botón de parada no se desenergizará mientras se está grabando, procederá a cerrar y salvar el archivo avisando mediante el LED verde el fin de esta secuencia. Para poder salvar la información, el SAD está programado para guardar

automáticamente los datos medidos cada cinco minutos. El sistema puede grabar por un tiempo total de 24 horas.

- **Toma de datos:** el sistema escribe en el archivo un índice (1, 2, 3,...) por cada toma de datos en cada segundo y el valor de cada variable. El SAD no posee un registro de hora; por ello, hora de inicio de tomas de datos se apuntó manualmente para cada circuito. El formato del archivo es .txt (Bloc de notas). El sistema toma en total trece datos de los equipos de medición: siete del analizador de gases, dos del sensor de omega, uno del sensor de flujo de aire y tres del GPS.
- **Puertos:** el sistema cuenta con los siguientes puertos: programador Arduino (puerto USB), puerto SD Card, alimentación batería de 12 V, alimentación cigarrera del auto, cable de datos del analizador de gases, cable de datos del sensor omega, cable de datos del sensor de flujo.

3.2.1. Medición del flujo de aire de admisión

Para medir el flujo de aire de admisión, se utilizó un sensor de flujo másico de aire (MAF) de la marca BOSCH modelo HFM5 (ver Figura 3.4). Este sensor se adquirió con la finalidad de determinar, indirectamente, el consumo de combustible, el flujo de gases de escape y los flujos de cada componente de las emisiones.



Figura 3.4 - Sensor de flujo de aire (MAF) (BOSCH, 2015)

En la Tabla 3.4, se tiene las principales características del sensor. Todas las características técnicas de este sensor son presentadas en el Anexo 4

Tabla 3.4 - Características del sensor de flujo de aire (MAF) (BOSCH, 2015).

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	8-17	V
Salidas	0-5	V
Variables:		
1. Flujo de aire	12-640	kg/h

3.2.2. Medición de concentraciones de gases de escape

Se utilizó un analizador de gases portátil de la marca Infrared Industries, modelo FGA 4500 (ver Figura 3.5). Este dispositivo se puede conectar por puerto USB a una computadora portátil para el registro de datos, pero en este estudio se conectó hacia la plataforma del Arduino mediante un conector de ocho pines. Además, este equipo posee una conexión 12 VDC para generar una fuente de energía en donde se conecta al portador de cigarrillos del vehículo mediante un cable y también se energiza directamente a la batería externa de 12 VDC.

Este equipo tiene una sonda la cual se conecta al tubo de escape del vehículo para medir las emisiones. El dispositivo portátil tiene la capacidad de medir cinco tipos de gases contaminantes principales, los cuales son los siguientes: CO, CO₂, NO_x, HC y O₂; además mide el factor lambda (λ) y relación de aire-combustible (AFR). Las concentraciones de NO_x y O₂ se cuantifican mediante celdas electroquímicas, mientras que las emisiones de CO, CO₂ y HC, mediante un infrarrojo no dispersivo; también, el analizador de gases tiene una precisión del 1 % en todas sus variables. En el presente capítulo se explicará con más detalle la instalación del analizador de gases en el vehículo.



Figura 3.5 - Analizador de gases FGA 4500 (Infrared, 2015).

En la Tabla 3.5, se tiene las principales características del analizador. Todas las características técnicas de este analizador de gases son presentadas en el Anexo 5

Tabla 3.5 - Características del analizador de gases (Infrared, 2015).

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	10-16	V
Salidas	0-10	V
Variables:		
1. HC	0-9999	ppm
2. CO	0-10	%
3. CO ₂	0-20	%
4. O ₂	0-25	%
5. NO _x	0-5000	ppm
6. Lambda	0-5	-
7. AFR	0-50	-

3.2.3. Medición de datos del circuito.

Para la medición de los datos de posición del vehículo durante cada circuito: distancia recorrida y velocidad del vehículo, se utilizó un GPS de la marca Grove, el cual fue compatible con la arquitectura del Arduino (ver Figura 3.6).



Figura 3.6 - GPS Grove.

En la Tabla 3.6, se tiene las principales características del GPS.

Tabla 3.6 - Características del GPS (Grove, 2015).

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	3.5 - 5	V
Salidas		V
Variables:		
1. Velocidad	-	m/s
2. Longitud	-	-
3. Latitud	-	-

3.2.4. Medición de parámetros atmosféricos.

Para registrar los datos de las condiciones atmosférica (humedad y temperatura) se utiliza un sensor de humedad/temperatura de la Marca Omega, modelo HX94 (ver Figura 3.7). Este sensor proporciona una excelente sensibilidad, respuesta rápida, y estabilidad de los datos tomados.



Figura 3.7 - Sensor de humedad y temperatura ambientales (Omega, 2015).

En la Tabla 3.7, se tiene las principales características del sensor Omega. Todas las características técnicas de este sensor son presentadas en el Anexo 6.

Tabla 3.7 - Características del sensor Omega (Omega, 2015).

Parámetros	Valor	Unidad
Alimentación	6-30	V
Salidas	4-20	mA
Variables:		
1. Temperatura	0-100	°C
2. Humedad	0-100	%

Todos estos equipos y dispositivos presentados (Figura 3.4 a Figura 3.7) están sincronizados para el registro de los datos correspondientes a cada segundo en las pruebas experimentales realizadas. Esta sincronización está programada mediante la plataforma del Arduino

3.3. Definición de circuitos urbanos

Lima, capital del Perú, es la ciudad más poblada del país con más de 9 millones de habitantes. Uno de sus principales problemas de esta ciudad es el tráfico vehicular que presenta a diario. Esto se debe a dos razones: la gran cantidad de vehículos en

circulación y a la ineficiente planificación de las principales avenidas. Debido a este problema, Lima, como ya se ha mencionado en la parte de la Introducción, es la ciudad que posee el aire más contaminado de toda Latinoamérica.

En conformidad con los artículos revisados en la literatura, las pruebas del vehículo consideraron dos tipos: circuito en condiciones de tráfico y circuito a velocidad constante.

3.3.1. Circuito en condiciones de tráfico

En la selección del circuito de tráfico vehicular, se consideró las principales avenidas con mayor congestión vehicular y las más representativas de Lima Metropolitana.

En la Figura 3.8 se representa el circuito, en el cual se tendrá el mismo punto inicial y final de partida que es el campus de la PUCP. Este circuito tuvo la siguiente trayectoria: Av. Riva Agüero, Av. Venezuela, Av. Arica, Plaza Bolognesi, Avenida 9 de Diciembre, Plaza Grau, Av. Miguel Grau, Av. Abancay, Av. 9 de Octubre, Jr. Castañeda, Jr. Cajamarca, Av. Francisco Pizarro, Av. Tacna, Jr. Ica, Oroya, Plaza Ramón Castilla, Av. Alfonso Ugarte, Plaza Dos de Mayo, Av. Alfonso Ugarte, Plaza Bolognesi, Av. Brasil, Av. Simón Bolívar, Av. Universitaria, Av. Urubamba y Av. Riva Agüero. El recorrido total fue de 21,3 kilómetros y el tiempo promedio transcurrido en condiciones de tráfico turno mañana y turno tarde fue de 1 h 17min y 1 h 12 min respectivamente.

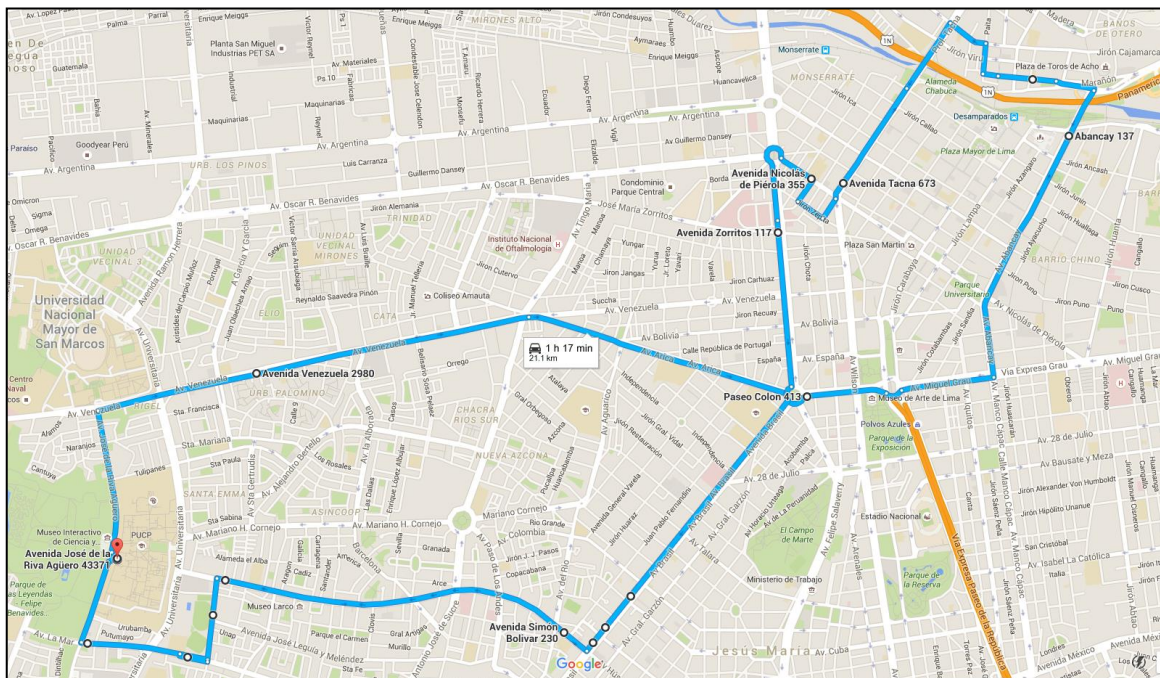


Figura 3.8 - Circuito en condiciones de tráfico.

3.3.2. Circuito a “velocidad constante”

Para el circuito a velocidad constante, se escogió la autopista Ramiro Prialé debido a que en Enero 2016 se terminó de ampliar el tercer carril en toda la primera parte de la autopista y, por ello, posee un flujo vehicular rápido. En la Figura 3.9, se representa el circuito a velocidad constante, donde se tuvo como inicio de partida el peaje de la autopista y como punto de llegada el mirador de Mafre. El recorrido total fue de 8,4 kilómetros, a tres velocidades altas de 60 km/h, 80 km/h y 100 km/h. y el tiempo de duración fue de 8, 7 y 5 minutos respectivamente. En el capítulo 4 se explica con más detalle la toma de valores para cada velocidad requerida.

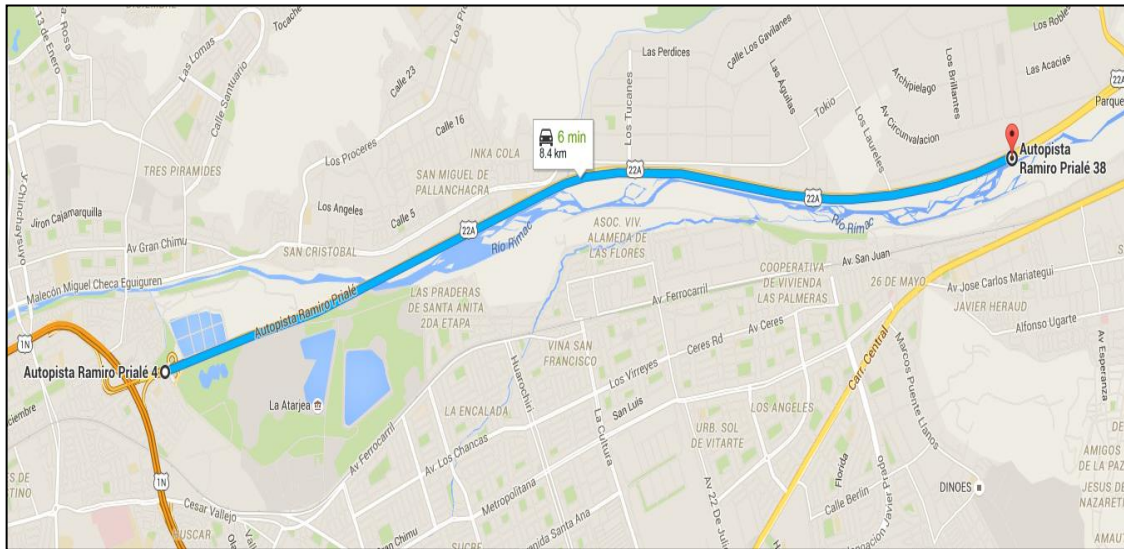


Figura 3.9 - Circuito a velocidad constante.

3.4. Preparación de las mezclas de gasolina y etanol

En este estudio se usan dos tipos de combustibles: gasolina comercial con 7,8 % de etanol y la gasolina con 10 % de etanol. Para realizar la preparación de este último combustible, fue necesario adquirir el gasohol comercial de 95 octanos con ficha técnica en el Anexo 7, y el etanol anhídrido (ver Figura 3.10) con ficha técnica en el Anexo 8. Los instrumentos que se utilizaron para realizar la mezcla fueron dos probetas, una con mayor precisión, y un embudo (ver Figura 3.11). Se determinó la concentración necesaria de etanol para el tanque del vehículo; una vez obtenida la cantidad en mL esta se midió en la probeta graduada. Luego, se procedió a mezclar el etanol en un envase de capacidad de 10 galones conteniendo 9 galones de gasohol comercial. Luego de realizar la mezcla homogénea, se procedió a verter, a través del embudo, la mezcla E10 dentro del tanque de combustible del vehículo. En la, Tabla 3.8, se observa las cantidades totales de los dos combustibles involucrados en la campaña experimental.

Tabla 3.8 - Cantidades de combustibles totales para la campaña.

DATOS Mezcla	Unidades -	VEHÍCULO	
		E7,8	E10
Porcentaje de etanol	%	7,8	10
Volumen de etanol añadido	Galones	-	0,367
Volumen de gasohol E7,8	Galones	15	15
Volumen total	galones	15	15,367



Figura 3.10 - Etanol anhidro.

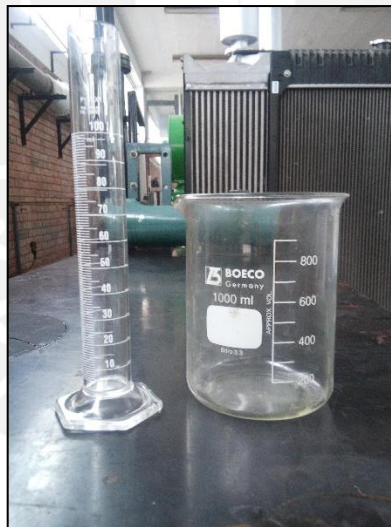


Figura 3.11 - Probeta graduada. Lado izquierdo con mayor precisión.

3.5. Metodología de experimentación

Según diversas literaturas e investigaciones, afirman que el estilo de conducir un vehículo afecta directamente en el consumo de combustible. Por ello, se decidió mantener el mismo conductor durante las pruebas.

El vehículo liviano utilizado en la campaña experimental fue de la marca Hyundai, modelo Santa Fe, con cilindrada 2,4 L y 174 hp a 6000 r.p.m. En la Figura 3.12, se

presenta el esquema ilustrativo de la implementación del sistema de adquisición de datos (SAD) y los equipos de medición dentro del vehículo

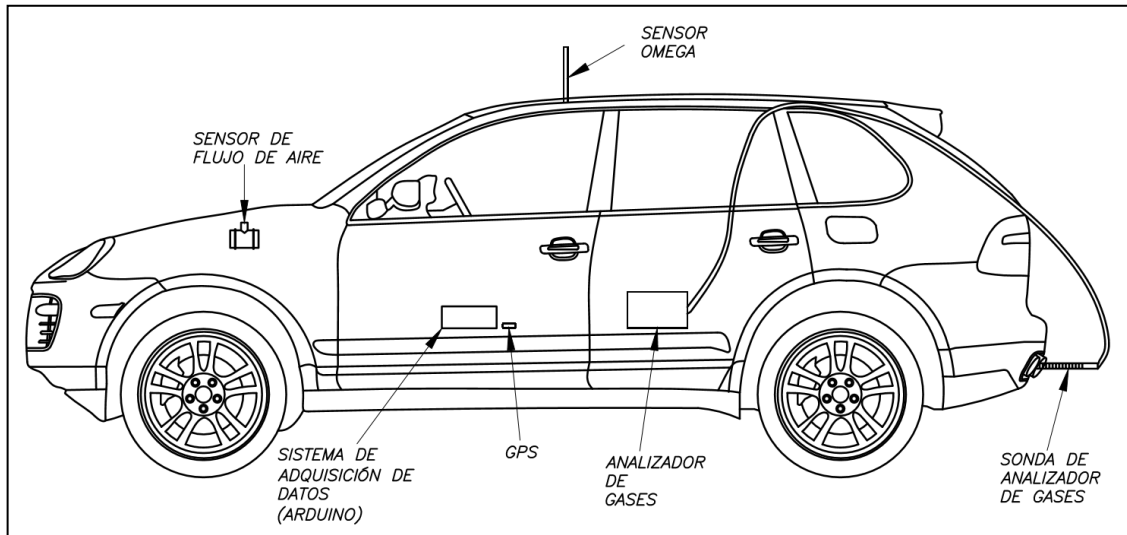


Figura 3.12 - Esquema de implementación del SAD y equipos de medición dentro del vehículo.

El SAD se instaló en la parte delantera del vehículo encima del guarda cosas que se encuentra entre los dos asientos delanteros (ver Figura 3.14). Se seleccionó este lugar debido a que cuenta con una base plana para poder instalar el SAD (ver Figura 3.13).



Figura 3.13 - Guarda cosas del vehículo.

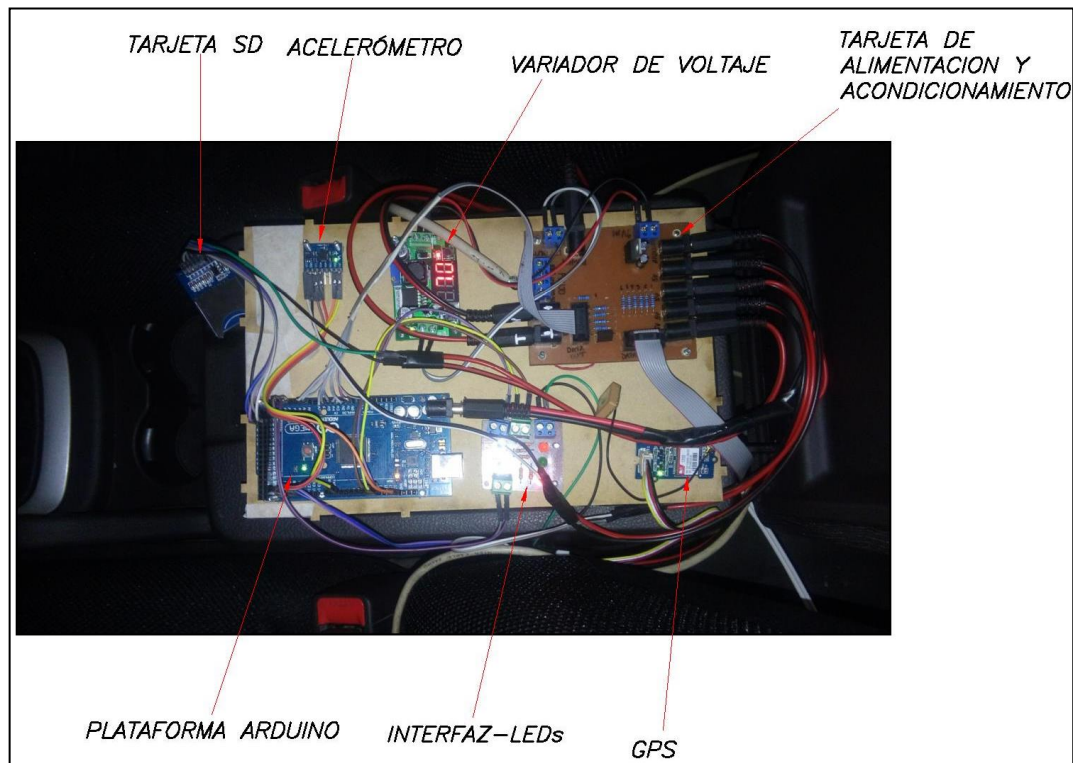


Figura 3.14 - SAD dentro del vehículo.

El registro de los datos de emisiones en el tubo de escape del vehículo se llevó a cabo con el analizador de gases portátil de la marca Infrared Industries, modelo FGA4500. El dispositivo portátil tiene la capacidad de medir cinco tipos de gases contaminantes (CO , CO_2 , NO_x , HC y O_2); además, mide el factor lambda (λ) y la relación de aire/combustible (AFR).

Con el analizador de gases, se pueden hallar las concentraciones volumétricas de las emisiones, pero no es posible cuantificar los índices de emisiones en g/km . Para esto, se requiere conocer el flujo de gases de escape, el cual se determina indirectamente a través del flujo de aire de admisión que ingresa al motor del vehículo. El vehículo no contaba con un sensor de flujo de aire (MAF); por ello, se instaló dentro del vehículo para el registro de flujo de aire.

El sensor de flujo de aire se instaló entre el filtro y la manguera de admisión (ver Figura 3.15). Previamente, este sensor fue calibrado en el Laboratorio de Energía de la PUCP. Para la instalación del sensor MAF a la línea de aire de admisión del motor, se implementó una pequeña manguera de caucho flexible de 78 milímetros de diámetro y dos bridas para ajustar la unión entre el filtro de aire y la manguera de

caucho y este con el sensor MAF (ver Figura 3.16). Finalmente, la alimentación y señal del sensor MAF se instaló hacia la plataforma Arduino (instalado en la cabina del vehículo) mediante un cable de datos de 4 pines.

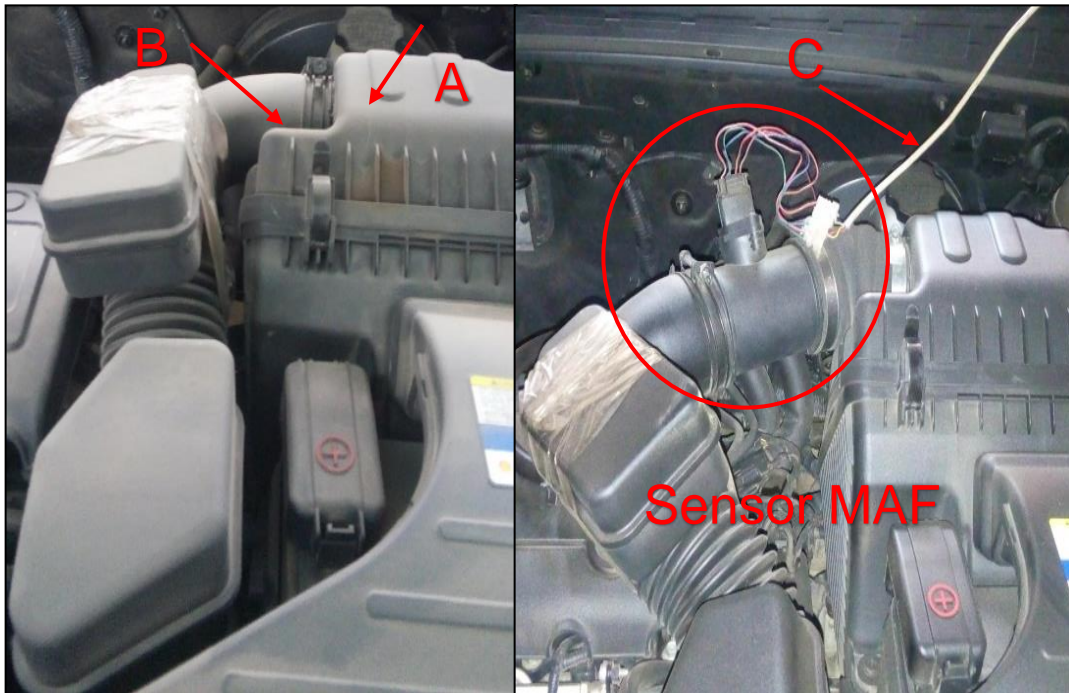


Figura 3.15 - Línea de admisión de aire antes (lado izq) y después (lado der) de la instalación del sensor MAF. A: filtro de aire, B: manguera de aire de admisión y C: cable de datos.



Figura 3.16 - Materiales para la instalación: bridas (lado izquierdo) y manguera de caucho (lado derecho).

El analizador de gases se instaló en la parte trasera del vehículo como se muestra en la Figura 3.17 donde se muestra, también, el cable de alimentación y el cable de datos

que va conectado hacia el SAD. En la Figura 3.18 se muestra la conexión de la sonda que conecta desde el tubo de escape hacia el analizador de gases. En la Figura 3.19, se observa la conexión del analizador con su fuente de alimentación que es una batería externa de 12 VDC. Para cada prueba, el dispositivo se seteó mediante la función que otorga el fabricante.



Figura 3.17 - Instalación del analizador de gases dentro del vehículo. A: cable de datos y B: cable de alimentación.



Figura 3.18 - Instalación de la sonda en el vehículo.



Figura 3.19 - Batería externa para la alimentación del analizador.

Para la determinación del consumo de combustible, se utilizó, indirectamente, los datos del flujo de aire de admisión del sensor MAF, los datos del factor lambda (λ) y la relación de aire/combustible. Con estos tres datos se obtuvo el flujo combustible instantáneo. Además, con la información de la distancia y tiempo del recorrido (medidos por el GPS), se calculó el consumo de combustible en g/km.

La experimentación se realizó en dos circuitos representativos de Lima Metropolitana: uno en condiciones de tráfico vehicular y otro a velocidad constante. Para el circuito en condiciones de tráfico vehicular, se realizó la comparación del circuito entre el tráfico con intensidad alta y el tráfico con intensidad media. Para el circuito a velocidad constante, se realizó pruebas en tres diferentes velocidades: 60 km/h, 80 km/h y 100 km/h. Se realizaron dos veces cada prueba mencionada para cada mezcla de combustible, ya que el motivo fue obtener los valores promedios de cada parámetro medido. Esto se explicará con más detalle en el Capítulo 4 (Análisis de resultados). En todas las pruebas, aparte del peso de los equipos de SAD y sus equipos, se adicionó una carga extra de 250 kg según recomendación de la Norma SAE J1711 (SAE, 2010). Por ello, se utilizó cinco sacos de arroz de 50 kg cada uno (ver Figura 3.20).



Figura 3.20 - Carga extra recomendada para las pruebas.

Finalmente, las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) se midieron con el sensor de la marca Omega, el cual se conectó a la arquitectura del Arduino. El sensor Omega se instaló en la parte exterior y superior del vehículo (ver Figura 3.21).



Figura 3.21-Instalación del sensor Omega en la parte superior y exterior del vehículo.

3.6. Protocolo de pruebas

Con la finalidad que los resultados de las pruebas de mediciones sean los más confiables posibles, fue necesario seguir rigurosamente un protocolo de medición para las dichas pruebas en conducción real. Por ello, se propuso el siguiente protocolo para los circuitos en condiciones de tráfico vehicular y a velocidades constantes.

El siguiente protocolo de pruebas fue basado en las recomendaciones propuestas por el Grupo de Investigación en Combustibles Alternativas, Energía y Protección del Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia.

- Establecer una estación de servicio particular para abastecer de combustible al vehículo ya que se requiere homogeneidad de combustible en todas las pruebas. La estación seleccionada fue Servicentro Alas Peruanas.
- Seleccionar equipos de medición como analizador de gases, sensor de flujo de aire de admisión, GPS, sensores de temperatura y humedad que cumplan con los requerimientos del circuito y del estudio, además que garanticen fiabilidad en los resultados y en su funcionamiento.
- El vehículo debe ser cargado con el 50% de su carga útil según recomendación dada por la Norma SAE J1711 (SAE, 2010). El peso promedio por pasajero fue considerado en 68,1 kilogramos. Para completar el peso recomendado, se usaron cinco sacos de arroz de capacidad de 50 kg, lo cual permitió simular la carga recomendada en el vehículo.
- La sonda del equipo del analizador de gases debe ser instalado lo más cerca posible al tubo de escape para evitar caídas de presión en la toma de datos y garantizar la composición, de modo que esta corresponda lo mejor posible con la composición a la salida del tubo de escape. Es decir, se debe reducir los efectos de reacciones secundarias.
- Anotar el kilometraje del vehículo antes y después de cada prueba, para compararlo y usarlo como medición alternativa en caso de que los datos medidos por GPS pierdan señal, lo cual es recurrente para este tipo de dispositivo.
- Se debe incluir una batería adicional, puesto que los equipos de medición funcionan con energía eléctrica y no se debe cargar al vehículo con este consumo adicional.
- El analizador de gases requiere ser calibrado antes de cada prueba. Previamente se debe cambiar los filtros.
- Cada prueba se inicia cuando todos los equipos hayan sido calibrados y se verificar su correcto funcionamiento. Una vez iniciada la prueba, se debe supervisar el correcto funcionamiento de los equipos durante la prueba, así como las lecturas de composición de gases, flujo de aire, etc. para poder

prevenir inconvenientes y solucionarlos a tiempo sin necesidad de rehacer la prueba.

- Cuando una prueba se ha finalizado, se procede a descargar los archivos desde el sistema de adquisición de datos a un computador para su posterior análisis.

3.7. Expresiones para cálculo de parámetros

El analizador de gases mide solo las concentraciones volumétricas de las emisiones de los gases de escape, sin posibilidad de determinar sus tasas de flujo; por ello, con los datos del sensor de flujo de aire (MAF) fue posible conocer, indirectamente, el flujo de gases de escape y los flujos de cada componente de las emisiones.

En la determinación del flujo de masa de cada componente, se debe especificar las concentraciones volumétricas de los principales componentes de escape. Además, es importante conocer que las concentraciones de Ar, H₂O y N₂. Por lo tanto, la ecuación de combustión estequiométrica está dada por:

$$\begin{aligned}
 X \cdot C_a H_b + Y \cdot C_2 H_5 O H + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \\
 \cdot \frac{1}{21} Ar \rightarrow \\
 \rightarrow \beta \cdot CO_2 + \frac{\alpha}{2} \cdot H_2O + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{78}{21} N_2 + \lambda \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot \frac{1}{21} Ar \\
 + (\lambda - 1) \cdot \left[\left(\beta + \frac{\alpha}{4} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde:

$C_a H_b$: fórmula química de la gasolina;

$C_2 H_5 O H$ fórmula química del etanol;

$\beta = aX + 2Y$

$\alpha = bX + 6Y$

$\varepsilon = Y$

$\beta, \alpha, \varepsilon$: cantidad de átomos del carbono, hidrógeno y oxígeno presentes en la mezcla de combustibles (gasolina y etanol);

λ : factor lambda;

O_2, N_2, Ar : componentes seleccionados del aire;

CO_2, H_2O, O_2, N_2, Ar : componentes seleccionados para representar a los gases de escape.

En la literatura no existe un consenso sobre los subíndices de los elementos químicos de la gasolina comercial (Hueniez, 2014), (MAHA. 1999) y (EKG ONZ,2012). En este

trabajo, la fórmula hipotética utilizada, $C_{8,26}H_{15,5}$ fue basada en la referencia (Heywood, 1988).

Las pruebas se realizaron con dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10:

$$E\ 7,8: \quad 0,922 \cdot C_{8,26}H_{15,5} + 0,078 \cdot C_2H_5OH \quad (3.2)$$

$$E\ 10: \quad 0,90 \cdot C_{8,26}H_{15,5} + 0,1 \cdot C_2H_5OH \quad (3.3)$$

En las ecuaciones (3.4) y (3.5) se puede identificar, en paréntesis, los coeficientes estequiométricos X e Y de ambas mezclas combustibles. Se asumió, inicialmente, que la combustión del motor es estequiométrica ($\lambda = 1$). Las ecuaciones (3.2) y (3.3) se reemplazan en la ecuación (3.1) y se tiene los siguientes resultados:

$$E\ 7,8: 0,922 \cdot C_{8,26}H_{15,5} + 0,078 \cdot C_2H_5OH + 12,07 \cdot O_2 + 44,83 \cdot N_2 + 0,57 \cdot Ar \quad (3.6)$$

$$\rightarrow 6,701 \cdot CO_2 + 6,645 \cdot H_2O + 37,067 \cdot N_2 + 0,475 \cdot Ar \cdot$$

$$E\ 10: \quad 0,90 \cdot C_{8,26}H_{15,5} + 0,1 \cdot C_2H_5OH + 11,55 \cdot O_2 + 42,9 \cdot N_2 + 0,55 \cdot Ar \quad (3.7)$$

$$\rightarrow 6,59 \cdot CO_2 + 6,56 \cdot H_2O + 36,44 \cdot N_2 + 0,467 \cdot Ar$$

De las ecuaciones (3.6) y (3.7), se obtuvieron las concentraciones volumétricas de N_2 y Ar cuyos resultados se encuentran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 - Concentraciones volumétricas de las emisiones en condiciones estequiométrica.

EMISIONES	COMBUSTIBLE	
	E7,8	E10
N_2	72,84%	72,81%
Ar	0,93%	0,93%

En el análisis de los cálculos, se utilizaron los valores de las concentraciones volumétricas de N_2 y Ar en condiciones estequiométricas (Tabla 3.9), y en el caso de los otros componentes se utilizaron los valores medidos por el analizador de gases. Este equipo mide el factor lambda y la relación de aire y combustible (AFR). Con estos datos, se pudo determinar la relación entre el consumo másico de los gases y la concentración de masa de los componentes de los gases mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{aire} \cdot \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot AFR}\right) \cdot x_{mi} \quad (3.8)$$

donde:

- \dot{m}_i : consumo másico del componente i-ésimo;
- \dot{m}_{aire} : consumo másico del aire [kg/h];
- AFR : relación de aire y combustible;
- x_{mi} : concentración de la masa molar del componente i-ésimo.

Para hallar la concentración de la masa de cada componente, se utilizó la ecuación (3.9) con el uso de las masas molares de cada componente.

$$x_{mi} = \frac{c_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=1}^n c_j \cdot \mu_j} \quad (3.9)$$

donde:

- c_i : concentración volumétrica del componente i-ésimo;
- μ_i : masa molar del componente i-ésimo [g/mol];
- $\sum_{j=1}^n c_j \cdot \mu_j$ este parámetro se calcula mediante la ecuación (3.8) (Kuranc, 2015):

$$\sum_{j=1}^n c_j \cdot \mu_j = \mu_{CO} \cdot c_{CO} + \mu_{HC} \cdot c_{HC} + \mu_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot c_{O_2} + \mu_{NO_x} \cdot c_{NO_x} + \mu_{N_2} \cdot c_{N_2} + \mu_{Ar} \cdot c_{Ar} + \mu_{H_2O} \cdot \left(1 - (c_{CO} + c_{HC} + c_{CO_2} + c_{O_2} + c_{NO_x} + c_{N_2} + c_{Ar})\right). \quad (3.10)$$

En la Tabla 3.10, se observa los valores de las masas molares de los componentes de los gases, aire y del agua.

Tabla 3.10 - Masa molar de los componentes de los gases (Dinga, 1968).

Componentes de gases	Unidad	Masa molar
μ_{CO}	g/mol	28,01
μ_{CO_2}	g/mol	44,009
μ_{O_2}	g/mol	31,999
μ_{H_2O}	g/mol	18,015
μ_{HC}	g/mol	114,224
μ_{NO_x}	g/mol	38,006
μ_{N_2}	g/mol	28,013
μ_{Ar}	g/mol	39,948

(1): Datos de propano C_3H_8 ; (2) datos de NO_x en la composición (NO-50% NO_2 -50%)

En la determinación de la distancia total recorrida por cada prueba, se calculó la distancia entre intervalo de cada segundo debido a que el GPS registraba datos cada

segundo de posición y latitud. En la ecuación 3.9, se observa la ecuación usada para determinar la distancia:

$$D_{(t1 a t2)} = R \cdot \arccos(\sin(LATITUD_{t1}) \cdot \sin(LATITUD_{t2}) + \cos(LATITUD_{t1}) \cdot \cos(LATITUD_{t2}) \cdot \cos(LONGITUD_{t1} - LONGITUD_{t2})) \quad (3.11)$$

$$D = \sum_1^n D_{(t1 a tn)} \quad (3.12)$$

donde:

$LATITUD_{t1}$ y $LONGITUD_{t1}$: posición geográfica en el punto t1;
 $LATITUD_{t2}$ y $LONGITUD_{t2}$: posición geográfica en el punto t2;
 R: radio de la tierra en km.
 D: distancia total recorrida.
 Nota: los ángulos deben estar en radianes.

Para el cálculo de los índices de emisiones y consumo de combustible se calculó la masa total de cada uno mediante el método de áreas de trapecios.

A partir de la ecuación (3.8) y con los datos de tiempo de recorrido (t) y kilómetro recorrido (D) para cada prueba, se calculó los índices de emisiones:

Índice de emisión de O_2 ($\frac{g}{km}$):

$$IE_{O_2} = \frac{\sum_1^t \dot{m}_{O_2}}{D} \quad (3.13)$$

Índice de emisión de CO ($\frac{g}{km}$):

$$IE_{CO} = \frac{\sum_1^t \dot{m}_{CO}}{D} \quad (3.14)$$

Índice de emisión de CO_2 ($\frac{g}{km}$):

$$IE_{CO_2} = \frac{\sum_1^t \dot{m}_{CO_2}}{D} \quad (3.15)$$

Índice de emisión de NO_x ($\frac{g}{km}$):

$$IE_{NO_x} = \frac{\sum_1^t \dot{m}_{NO_x}}{D} \quad (3.16)$$

Índice de emisión de HC ($\frac{g}{km}$):

$$IE_{HC} = \frac{\sum_1^t \dot{m}_{HC}}{D} \quad (3.17)$$

Por otro lado, con los datos registrados por el sensor MAF, se calculó, indirectamente, el consumo másico de cada combustible mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{combustible} = \dot{m}_{aire} \cdot \frac{F_e}{\lambda} \quad (3.18)$$

donde:

$\dot{m}_{combustible}$: consumo másico de combustible [kg/h];

F_e : dosado estequiométrico del combustible.

El dosado estequiométrico de cada combustible (E7,8 y E10) fue calculado a partir de las ecuaciones de combustión estequiométrica de cada combustible: (3.6) y (3.5) respectivamente.

El dosado estequiométrico de E7,8 se calculó de la siguiente manera:

Masa del aire:

$$12,071 \cdot mol_{O_2} \cdot 31,99 \frac{g}{mol} + 44,835 \cdot mol_{N_2} \cdot 28,013 \frac{g}{mol} + 0,575 \cdot mol_{Ar} \cdot 39,948 \frac{g}{mol} = 1665,19 g \quad (3.19)$$

Masa de la mezcla de combustible:

$$0,922 \cdot mol_{C_8H_{18}} \cdot 114 \frac{g}{mol} + 0,078 \cdot mol_{C_2H_5OH} \cdot 46 \frac{g}{mol} = 112,44g \quad (3.20)$$

De estos datos se obtuvo el dosado estequiométrico de la combustión estequiométrica del E7,8:

$$F_{eE7,8} = \frac{masa\ combustible}{masa\ del\ aire} = \frac{112,44}{1665,19} = \frac{1}{14,809} \quad (3.21)$$

Adyacentemente, el dosado estequiométrico de E10 se calculó de la siguiente manera:

Masa del aire:

$$11,55 \cdot mol_{O_2} \cdot 31,99 \frac{g}{mol} + 42,9 \cdot mol_{N_2} \cdot 28,013 \frac{g}{mol} + 0,55 \cdot mol_{Ar} \cdot 39,948 \frac{g}{mol} = 1593,32g \quad (3.22)$$

Masa de la mezcla de combustible:

$$0,90 \cdot mol_{C_8H_{18}} \cdot 114 \frac{g}{mol} + 0,1 \cdot mol_{C_2H_5OH} \cdot 46 \frac{g}{mol} = 107,2g \quad (3.23)$$

De estos datos se obtuvo el dosado estequiométrico de la combustión estequiométrica E10:

$$F_{eE10} = \frac{masa\ combustible}{masa\ del\ aire} = \frac{107,2}{1593,32} = \frac{1}{14,86} \quad (3.24)$$

Finalmente, se obtuvo el consumo de combustible para cada combustible mediante la siguiente ecuación:

$$consumo_{combustible} = \frac{\sum_1^t m_{combustible}}{\delta \cdot D} \quad (3.25)$$

donde:

$consumo_{combustible}$: consumo de combustible [L/km];

δ : densidad del combustible [kg/L].



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se presenta los resultados adquiridos durante las pruebas en campo de los circuitos de Lima Metropolitana. Las pruebas se realizaron en dos circuitos representativos de la ciudad de Lima: uno en condiciones de tráfico vehicular y otro a velocidad constante.

En el primer circuito, pruebas en condiciones de tráfico (PCT), se realizaron dos recorridos en la mañana (7:00 am) y dos recorridos en la tarde (2:30 pm) para cada mezcla de combustible (E7,8 y E10). En total, durante la campaña experimental se realizaron ocho recorridos para el primer circuito. Los cuatro primeros fueron realizados usando combustible comercial E7,8 y denominados como PCT1 y PCT2 para los recorridos realizados en la mañana (M) y PCT3 y PCT4 para las recorridos realizados en la tarde (T). Los cuatro recorridos restantes se realizaron con la mezcla E10 sus denominaciones fueron PCT5, PCT6, PCT7 y PCT8, donde los dos primeros fueron realizados en la mañana y los restantes en la tarde respectivamente.

En el segundo circuito, pruebas en condiciones de velocidad constante (PCVC), se establecieron las siguientes velocidades promedios: 60 km/h, 80 km/h y 100 km/h. En estas pruebas se realizaron dos recorridos para cada velocidad, empleando cada mezcla de combustible (E7,8 y E10). En total, durante la campaña experimental del segundo circuito se realizaron doce recorridos y todos ellos fueron realizados durante la mañana. Los seis primeros fueron realizados usando combustible comercial E7,8 y sus denominaciones fueron PCVC1 y PCVC2 para las pruebas a 60 km/h; PCVC3 y PCVC4 para las pruebas a 80 km/h y PCVC5 y PCVC6 para las pruebas a 100 km/h. Análogamente, los seis recorridos restantes se realizaron empleando la mezcla E10, sus denominaciones fueron PCVC7, PCVC8, PCVC9, PCVC10, PCVC11 y PCVC12 para las pruebas a 60 km/h, 80 km/h y 100 km/h respectivamente. El motivo de realizar dos recorridos para cada circuito fue para obtener un promedio de los datos medidos.

En total, se realizaron veinte pruebas durante el estudio. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, se muestra el cronograma de las pruebas realizadas en las campañas experimentales utilizando los combustibles E7,8 y E10 respectivamente. En estas tablas se puede observar las fechas, horas de inicio y fin, duración, distancia recorrida, velocidad promedio y condiciones ambientales promedio durante cada prueba realizada.

Tabla 4.1 - Cronograma de las pruebas realizadas funcionando con E7,8.

COMBUSTIBLE	CIRCUITO	DENOMINACIONES	FECHA	HORA INICIO	HORA FINAL	DURACIÓN	DISTANCIA RECORRIDA (km)	VELOCIDAD PROMEDIO	TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO (%)	
E7,8	EN CONDICIONES DE TRAFICO	PCT1	17/06/2016	7:06 a. m.	8:24 a. m.	1 h 12 min 27 s	20,94	15,71	16,97	82,78	
		PCT2	20/06/2016	7:38 a. m.	9:05 a. m.	1 h 20 min 53 s	21,12	14,14	16,67	88,09	
		PCT3	21/06/2016	2:42 p. m.	4:07 p. m.	1 h 18 min 02 s	21,33	14,71	20,93	64,93	
		PCT4	22/06/2016	3:01 p. m.	4:14 p. m.	1 h 07 min 46s	21,26	16,83	21,63	62,60	
			PROMEDIO			1 h 14 min 47 s	21,16	15,35	19,05	74,60	
			PCVC1	21/06/2016	9:48 a. m.	9:58 a. m.	8 min 11 s	8,56	58,66	16,21	83,69
			PCVC2	21/06/2016	10:30 a. m.	10:40 a. m.	8 min 11 s	9,24	62,67	16,15	84,11
			PROMEDIO			08 min 11 s	8,90	60,67	16,18	83,90	
			PCVC3	21/06/2016	10:03 a. m.	10:10 a. m.	02 min 48 s	3,87	76,55	16,08	85,97
			PCVC3	21/06/2016	11:05 a. m.	11:12 a. m.	02 min 48 s	4,05	79,92	16,44	84,34
			PROMEDIO			02 min 48 s	3,96	78,24	16,26	85,16	
			PCVC5	21/06/2016	11:38 a. m.	11:45 a. m.	05 min 37 s	8,82	86,42	16,70	82,28
			PCVC6	21/06/2016	11:54 a. m.	12:01 p. m.	05 min 37 s	8,57	83,80	17,45	79,10
			PROMEDIO			05 min 37 s	8,70	85,11	17,08	80,69	
		A VELOCIDAD CONSTANTE									

Tabla 4.2 - Cronograma de las pruebas realizadas funcionando con E10.

COMBUSTIBLE	CIRCUITO	DENOMINACIONES	FECHA	HORA INICIO	HORA FINAL	DURACIÓN	DISTANCIA RECORRIDA (km)	VELOCIDAD PROMEDIO	TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO (%)
E10	EN CONDICIONES DE TRAFICO	PCT5	23/06/2016	11:24 a. m.	12:47 p. m.	1 h 16 min 31 s	20,88	14,56	17,45	84,30
		PCT6	24/06/2016	7:06 a. m.	8:32 a. m.	1 h 20 min 56 s	20,93	14,08	17,49	82,63
		PCT7	23/06/2016	2:39 p. m.	2:39 p. m.	1 h 15 min 01 s	21,25	15,23	18,56	75,53
		PCT8	24/06/2016	2:28 p. m.	2:28 p. m.	1 h 06 min 11 s	21,01	16,96	22,34	56,44
		PROMEDIO				1 h 14 min 40 s	21,02	15,21	18,96	74,72
		PCVC7	24/06/2016	10:35 a. m.	10:45 a. m.	7 min 44 s	8,97	64,24	17,55	79,36
		PCVC8	24/06/2016	11:07 a. m.	11:17 a. m.	7 min 44 s	9,29	66,32	18,19	76,06
		PROMEDIO				7 min 44 s	9,13	65,28	17,87	77,71
A VELOCIDAD CONSTANTE	PCVC9	24/06/2016	9:49 a. m.	9:57 a. m.	5 min 46 s	7,82	75,79	17,09	82,40	
	PCVC10	24/06/2016	10:19 a. m.	10:26 a. m.	5 min 46 s	7,88	76,20	17,49	80,96	
	PROMEDIO				5 min 46 s	7,85	76,0	17,29	81,68	
	PCVC11	24/06/2016	9:35 a. m.	9:42 a. m.	5 min 36 s	8,44	84,50	17,56	79,73	
PCVC12	24/06/2016	10:07 a. m.	10:14 a. m.	5 min 36 s	8,55	85,48	17,55	79,94		
PROMEDIO				5 min 36 s	8,50	84,99	17,56	79,84		

4.1. Resultados del circuito en condiciones de tráfico

4.1.1. Perfiles y valores promedios en condiciones de tráfico.

Las Figura 4.1 y Figura 4.2 muestran el registro de las velocidades en las pruebas del circuito sobre condiciones de tráfico, utilizando combustibles E7,8 y E10, respectivamente. Se observa que estas velocidades presentan picos altos y bajos; esto se debe a que las pruebas se realizaron en circuito de conducción real en donde el vehículo se detiene momentáneamente debido a los semáforos, muelles o eventos espontáneos como imprudencia de otro conductor o peatón.

La Figura 4.1A, muestra la variación de velocidades durante los recorridos en el turno de mañana (PCT1 y PCT2), mientras la Figura 4.1B muestra los resultados en el turno tarde (PCT3 y PCT4). Análogamente, Figura 4.2A muestra los resultados para el turno mañana (PCT5 y PCT6) y la Figura 4.2B muestra los resultados en el turno tarde (PCT7 y PCT8) utilizando E10.

Se puede apreciar que para el circuito definido en condiciones de tráfico, las velocidades máximas siempre fueron menores a 80 km/h, independiente del combustible utilizado (véase Figura 4.1 y Figura 4.2). Por otro lado, a través de estas figuras se pudo comprobar que no existe una diferencia entre los perfiles con E7,8 y E10, durante el turno mañana y turno tarde. Esto demuestra que, actualmente, las principales vías de la ciudad de Lima Metropolitana (consideradas en este circuito) poseen la misma intensidad de tráfico entre 7 am y 5 pm.

Adicionalmente, se calculó las velocidades promedios (ver Figura 4.3) obtenidas a partir de las Figura 4.1 y Figura 4.2. Se observa que PCT4 y PCT8 poseen las mayores velocidades promedio (16,83 km/h y 16,96 km/h, respectivamente) del resto, debido a que tienen un menor tiempo de recorrido (3780 s y 3790s). Asimismo, la prueba PCT6 posee la menor velocidad promedio (14.07 km/h) y el mayor tiempo de recorrido (5160 s).

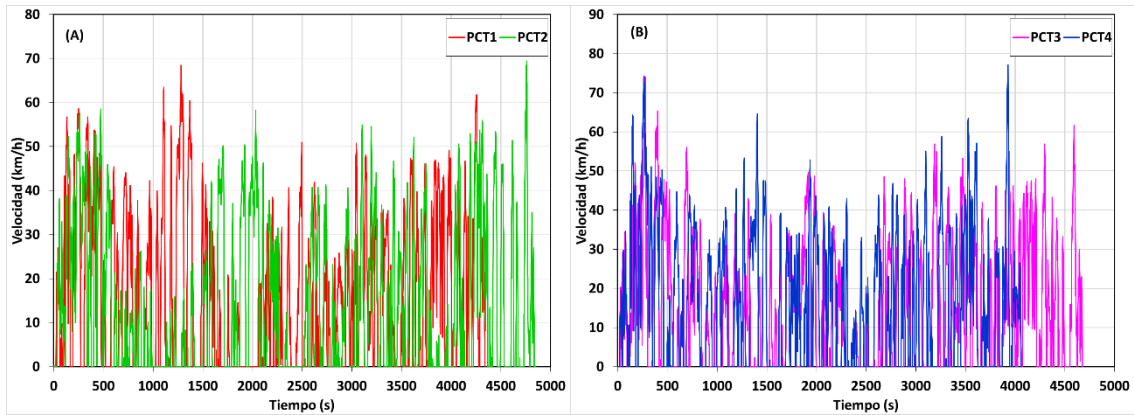


Figura 4.1 - Mediciones de velocidades en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

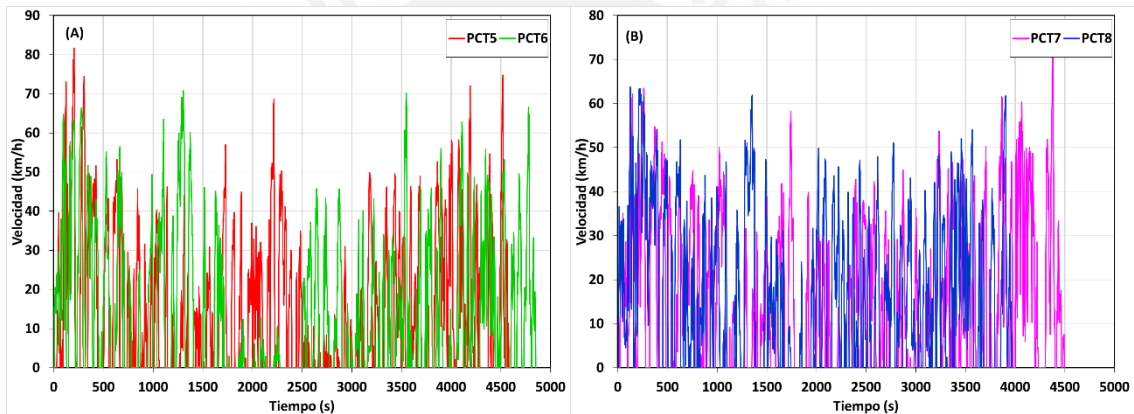


Figura 4.2 - Mediciones de velocidades en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

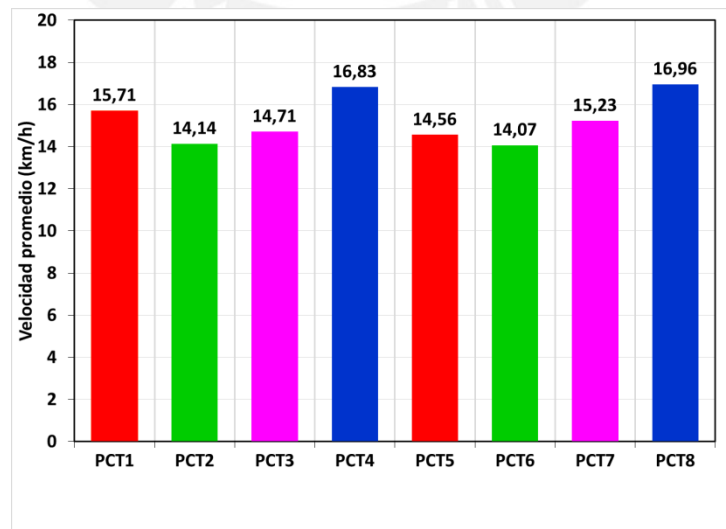


Figura 4.3 - Velocidades promedios en condiciones de tráfico.

Los resultados del flujo másico del aire de admisión se muestran en las Figura 4.4 y Figura 4.5; además, en la Figura 4.6, se muestra los respectivos valores promedios de las ocho recorridos. Para todos los recorridos presentados en la Figura 4.4 y Figura 4.5, se observa que los valores medidos del flujo de aire poseen más valores mínimos que máximos. Esto se debe que cuando el vehículo se encuentra parado, el flujo de aire es menor que cuando está en movimiento y cuando se cambia de velocidad.

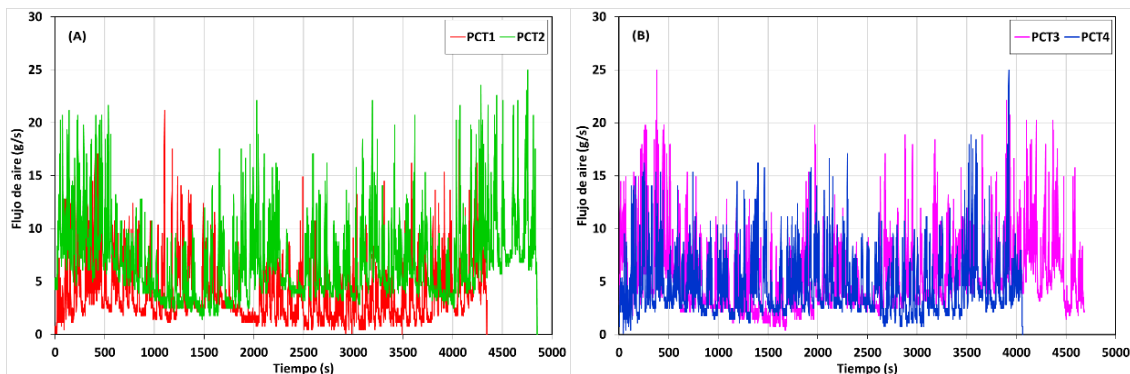


Figura 4.4 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

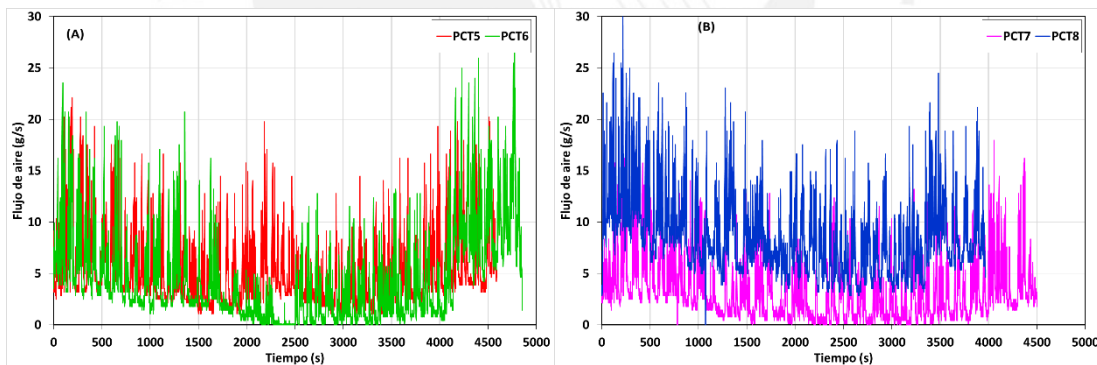


Figura 4.5 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

Al comparar los valores promedios (ver Figura 4.6), se observa que PCT8 presenta el mayor valor promedio de flujo de aire (8,57 g/s) en comparación al resto de recorridos. Asimismo, se comprueba que el incremento del etanol en la gasolina aumentó, muy poco, el valor promedio de flujo del aire. En efecto, el valor medio de los cuatros recorridos con E 7,8 fue 5,24 g/s; mientras que el promedio con E10 resultó igual a 5,31 g/s; es decir, existió una diferencia de 1,39 % con el E10. Este resultado fue causado principalmente por el mayor valor promedio obtenido con PCT8 donde, al

parecer, existiría una mayor densidad del aire provocado por el efecto del calor latente de vaporización del etanol incrementado en la mezcla de combustible.

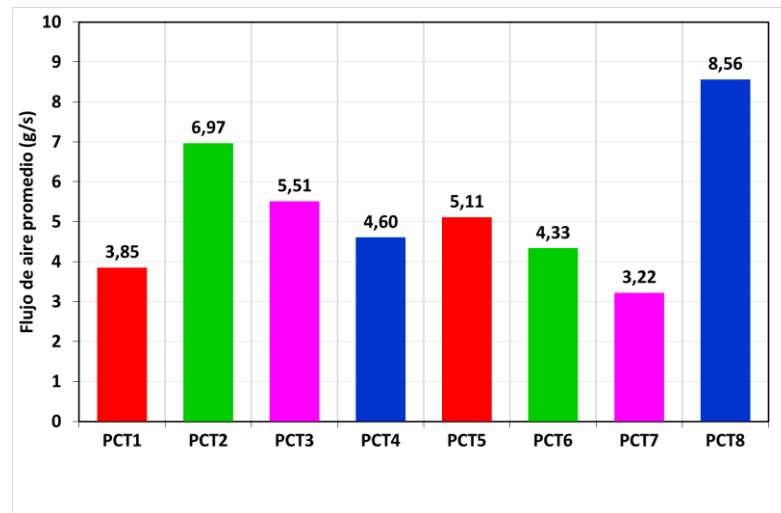


Figura 4.6 - Valores promedios de flujo de aire en condiciones de tráfico.

Las Figura 4.7 y Figura 4.8 muestran la variación de factor lambda (λ) durante los ocho recorridos en condiciones de tráfico, funcionando con E7,8 y E10 respectivamente. La Figura 4.10 muestra los valores promedios del factor lambda obtenidos a partir de la Figura 4.7 y Figura 4.8. De estas figuras, se observa que el motor trabajó, indiferente del tipo de combustible (E7,8 y E10), con mezclas aire-combustible casi estequiométricas. ($\lambda=1$).

Por otro lado, las Figura 4.9A y Figura 4.9B se aprecia los perfiles de velocidad, factor lambda y oxígeno residual de las pruebas PCT4 (entre 3500 s y 3600 s) y PCT7 (entre 3230 s y 3290 s), respectivamente. En estas dos figuras se aprecia, como lo esperado, que los perfiles del factor lambda y O_2 residual poseen las mismas tendencias. También, se observa que cuando el vehículo aceleró la mezcla aire-combustible se vuelve más pobre (exceso de aire); es decir, el factor lambda aumentó; en cambio, cuando el vehículo desaceleró ocurre todo lo contrario.

Los valores promedios de los ocho recorridos (ver Figura 4.10) son casi iguales a pesar que poseen velocidades promedios ligeramente diferentes (ver Figura 4.3).

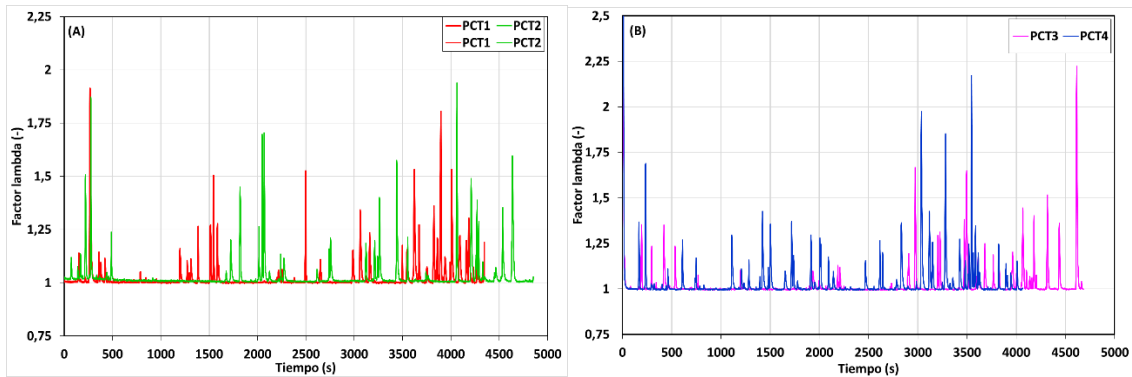


Figura 4.7 - Mediciones del factor lambda en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

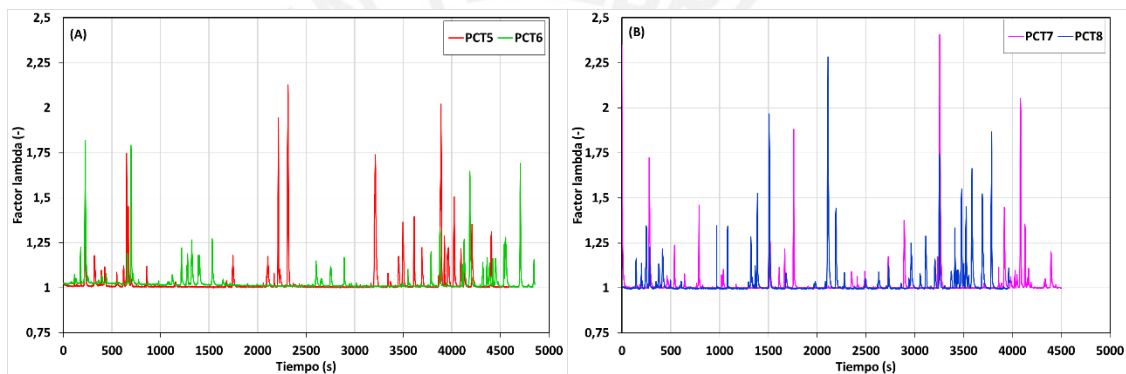


Figura 4.8 - Mediciones del factor lambda en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

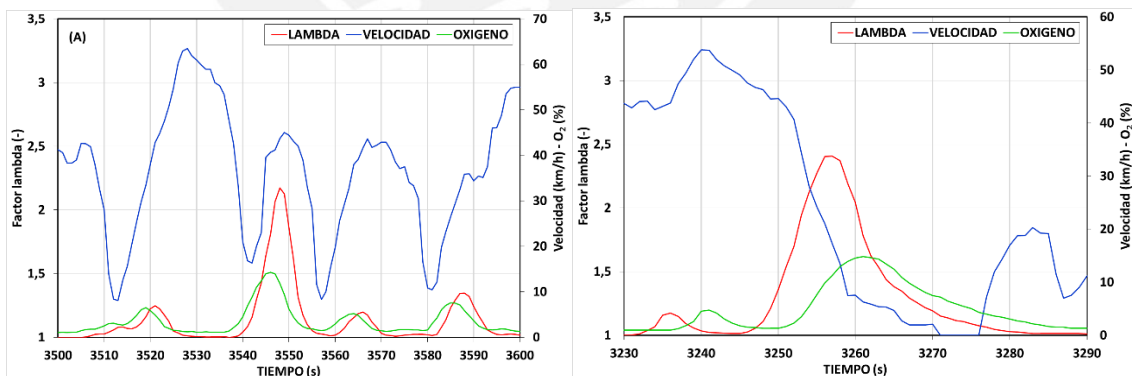


Figura 4.9 - Detalles de la variación del factor lambda, oxígeno residual y velocidad del vehículo en el tiempo. (A) Detalle de la PCT4; (B) detalle de la PCT7.

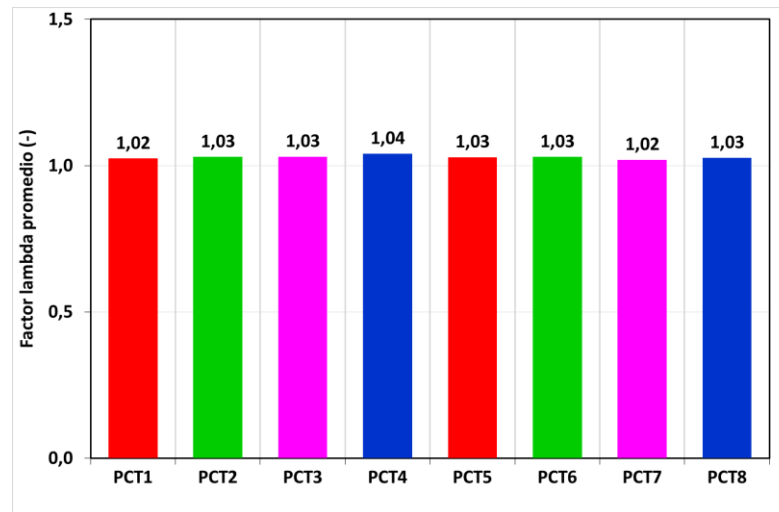


Figura 4.10 - Factores lambda promedios en el circuito en condiciones de tráfico.

Las mediciones de las concentraciones de oxígeno residual en los gases de escape del vehículo son representadas en las Figura 4.11 y Figura 4.12, a su vez sus respectivos valores promedios en la Figura 4.13. Como era de esperar, los perfiles del O_2 residual de ambos combustibles muestran que los valores máximos fueron menores a 16 %.

Ademas, los perfiles del O_2 residual (Figura 4.11 y Figura 4.12) guarda estrecha relación con los perfiles del factor lambda (ver Figura 4.7 y Figura 4.8).

La variación de los valores medidos O_2 se encuentra asociado a las aceleraciones, desaceleraciones y paradas del vehículo durante el circuito establecido. Por ejemplo, cuando el vehiculo se aceleró, aumentó el flujo de combustible, lo cual hizo que la mezcla aire-combustible se vuelva menos pobre y con ello disminuya el O_2 residual.

Por otro lado, se observa que los valores promedios del O_2 al usar E10 disminuyen ligeramente respecto a los valores con E7,8. Esto se debe a que el vehiculo funcionó con menores velocidades promedios durante la campaña (veáse Figura 4.3). Sin embargo, para las velocidades promedios altas, se cumple lo contrario; es decir, se incrementan las concentraciones de O_2 residual del E10 respecto al E7,8. Este resultado se justifica por el mayor flujo de combustible y mayor contenido de oxigenado con el E10, durante las mayores aceleraciones.

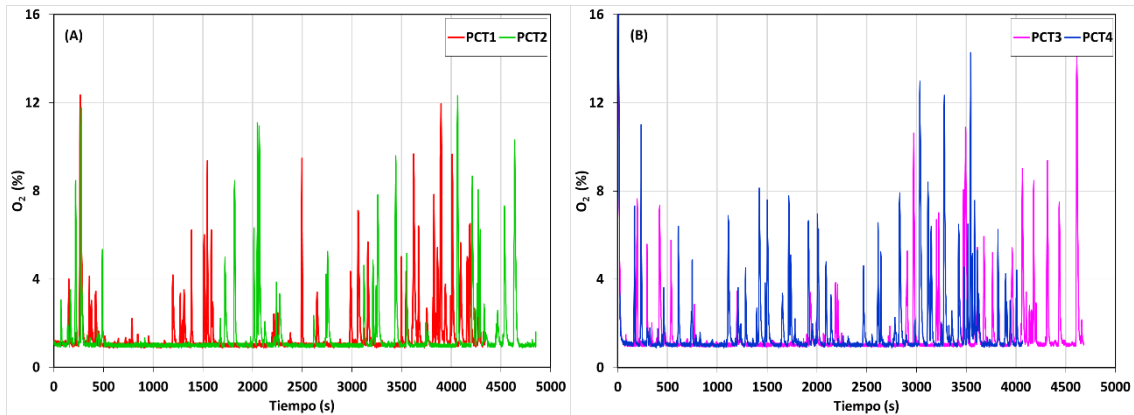


Figura 4.11 - Mediciones de O₂ en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

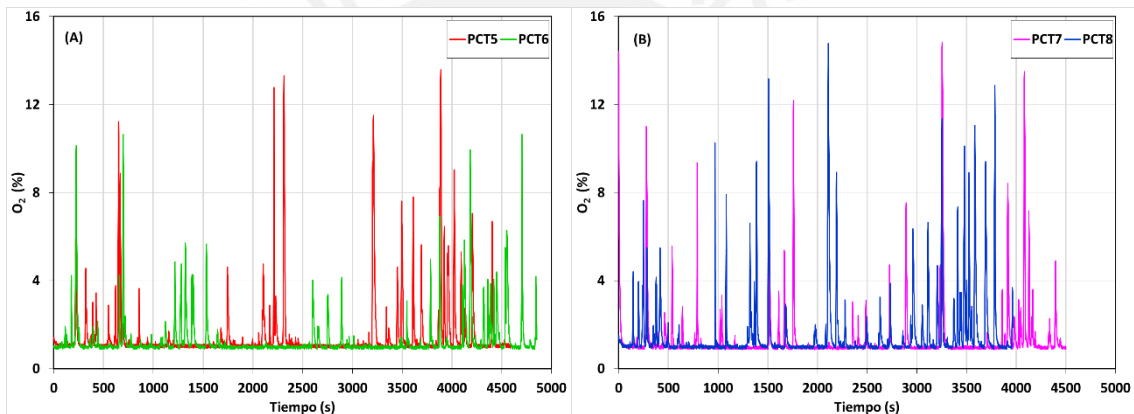


Figura 4.12 - Mediciones de O₂ en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

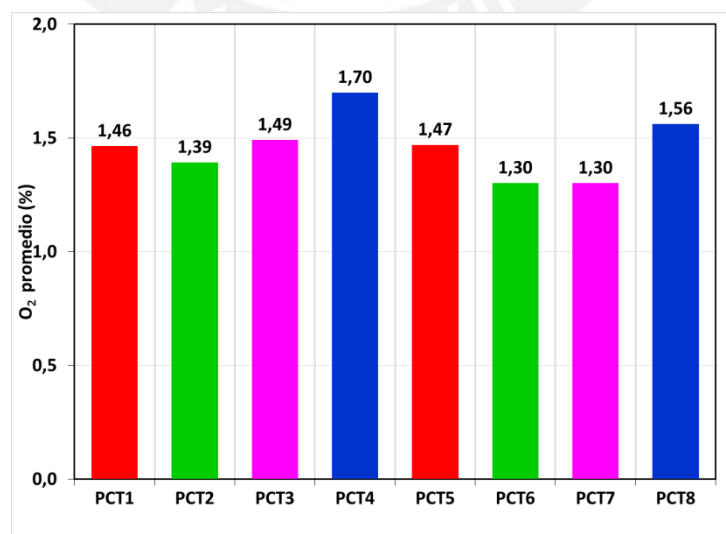


Figura 4.13 - Valores promedios de O₂ en condiciones de tráfico.

Las Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestra los valores de flujo de combustible calculado mediante la ecuación (3.18), a partir de los datos medidos del flujo de aire (ver Figura 4.4 y Figura 4.5) y del factor lambda (λ) (ver Figura 4.7 y Figura 4.8). Los perfiles de flujo de combustible son idénticos que los perfiles de flujo de aire debido a que son directamente proporcionales. En la Figura 4.16, se aprecia los valores promedios de los flujos de combustibles calculados, en donde el valor medio de los cuatros promedios usando E10 resultó prácticamente idéntico al valor medio usando E7,8 (0,36 g/s y 0,35 g/s).

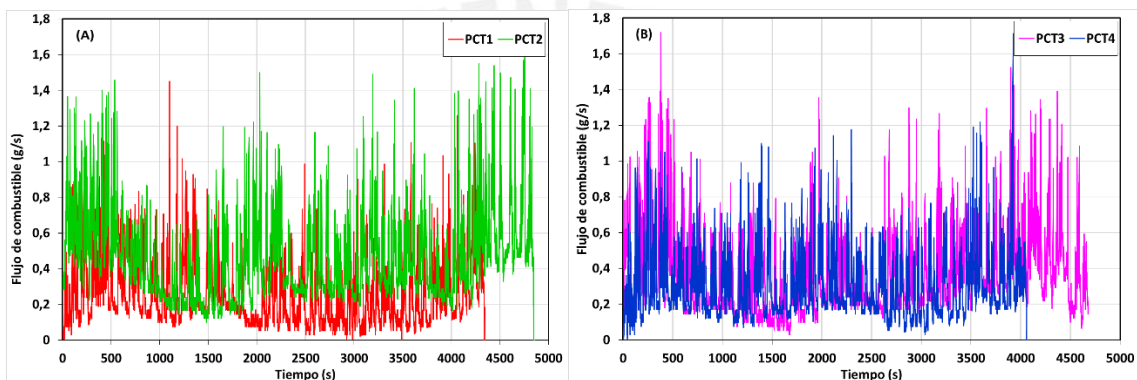


Figura 4.14 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

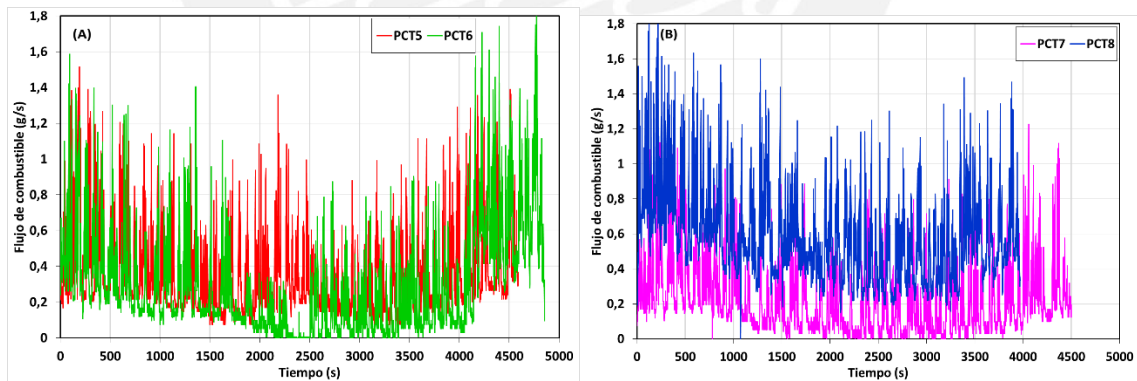


Figura 4.15 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

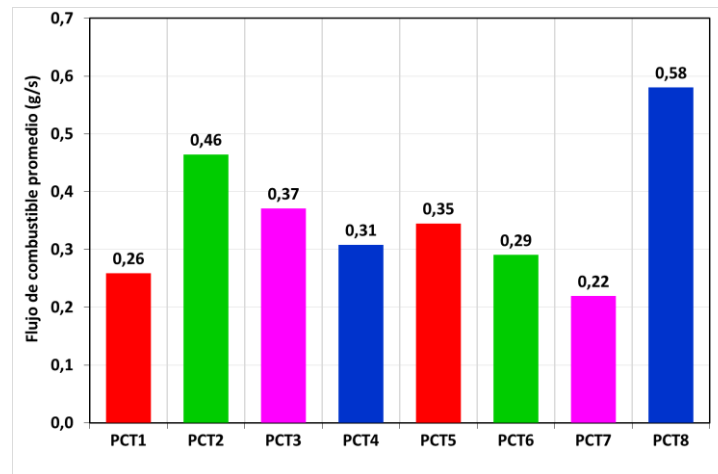


Figura 4.16 - Valores promedios de flujo de combustible en condiciones de tráfico.

La Figura 4.17, muestra el consumo promedio del vehículo en km/L de los ocho recorridos, en donde el mayor valor promedio usando E7,8 fue 13,72 km/L en el recorrido PCT1; asimismo, usando E10 se encontró que el valor superior fue 15,90 km/L con PCT7.

A modo de comparación de los valores medios de los promedios fueron 10,55 km/L y 10,84 km/L usando E7,8 y E10, respectivamente. Es decir, hubo una disminución de 2,69 % en el consumo de combustible al aumentar el contenido de etanol en la mezcla.

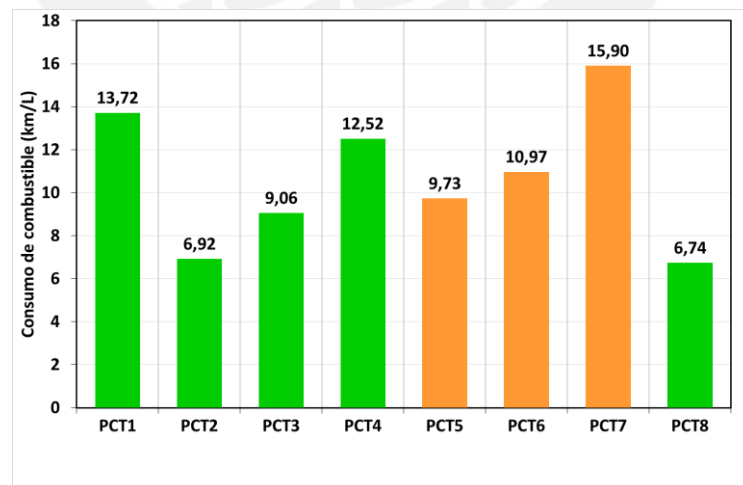


Figura 4.17 - Consumo de combustible en condiciones de tráfico.

Las Figura 4.18 y Figura 4.19 se muestra los valores de HC obtenidos durante la campaña en condiciones de tráfico. Estos valores son oscilantes durante todo el recorrido y varían entre 90 ppm a 175 ppm para E7,8 (ver Figura 4.18); en cambio,

para los valores de HC con E10 se observa una ligera disminución de niveles de oscilación entre 80 ppm a 160 ppm. Esta variación se comprueba al promediar y comparar dichos valores (ver Figura 4.20). Los valores medios de los promedios de HC con E7,8 y con E10 fueron 132 ppm y 119 ppm, respectivamente. Esto constata una reducción de 9,91 % de HC usando el E10 respecto al E7,8.

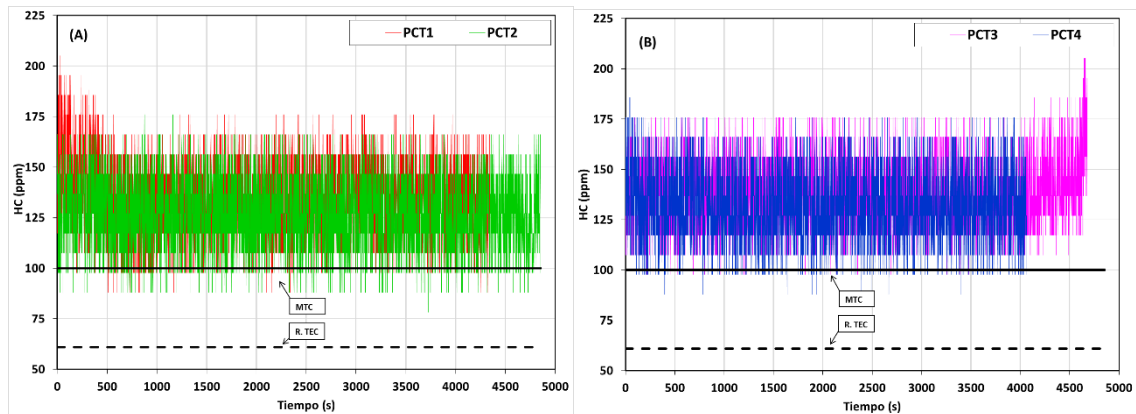


Figura 4.18 - Mediciones de HC en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

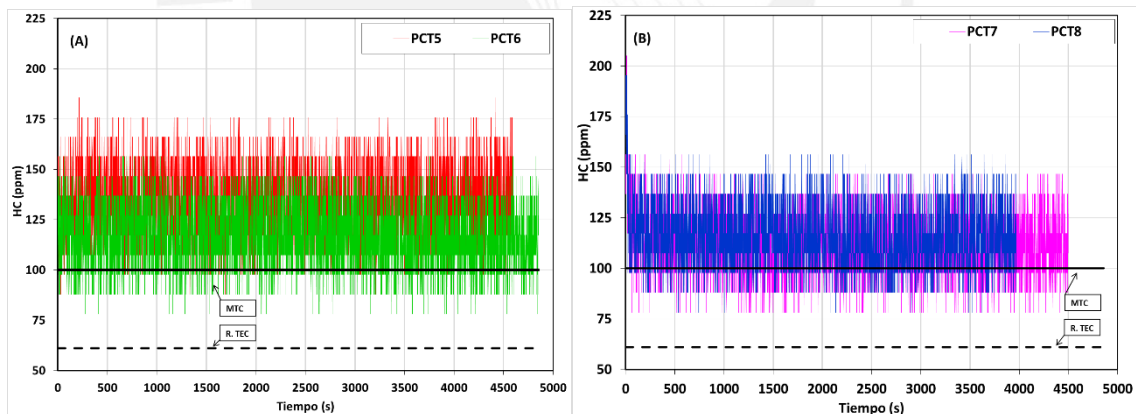


Figura 4.19 - Mediciones de HC en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

Por otro lado, a modo de comparación, en las Figura 4.18 y Figura 4.19 se han representado el límite permisible de HC (línea negra continua) según la normativa propuesta del MTC (ver Tabla 3.2) y el resultado de la prueba de HC (línea negra discontinua) en la última revisión técnica del vehículo utilizado (ver Tabla 3.3). La revisión técnica del vehículo constató que las emisiones de HC se encontraban dentro del rango permisible por el MTC. Además para las mediciones de HC con E7,8, se observa que la gran parte de los valores superan al valor permisible de 100 ppm de

HC; en cambio, para las mediciones de HC con E10, se tiene un número regular de valores que no superan al valor permisible. También, como era previsible, por la menor antigüedad del vehículo, las emisiones de HC en condiciones reales de funcionamiento fueron siempre superiores al resultado obtenido en la revisión técnica.

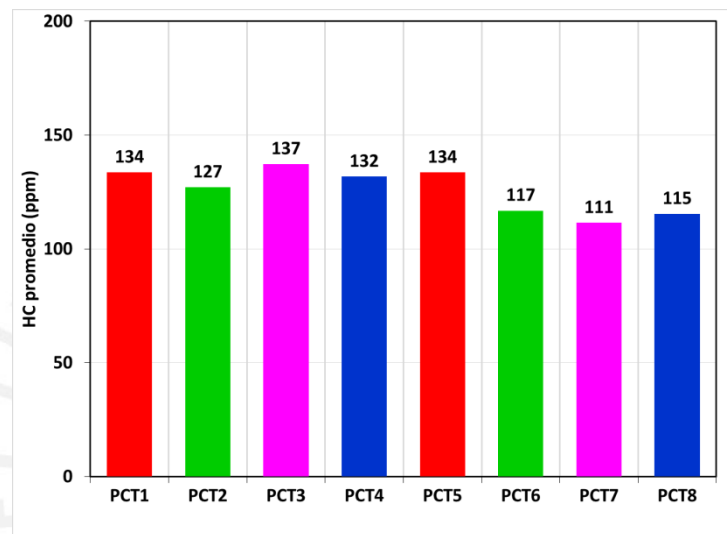


Figura 4.20 - Valores promedios de HC en condiciones de tráfico.

Los resultados de las mediciones de CO se muestran en las Figura 4.21 y Figura 4.22. En estas figuras se observa que la mayoría de perfiles de CO poseen una tendencia lineal; esto se ve más claramente para las pruebas del turno tarde con E7,8 y E10 (Figura 4.21B y Figura 4.22B). En comparación con las mediciones de HC (Figura 4.18 y Figura 4.19), las emisiones de CO mostraron mayor diferencia entre sus perfiles. Este efecto se debería a una sumatoria de diversos factores tales como condiciones ambientales, temperatura del fluido refrigerante del motor y otras variables no consideradas en este estudio.

Por otra parte, a modo de comparación, en las Figura 4.21 y Figura 4.22 se han representado el límite permisible de CO (línea negra continua) según la normativa propuesta del MTC (ver Tabla 3.2) y el resultado de la prueba de CO (línea negra discontinua) en la última revisión técnica del vehículo utilizado (ver Tabla 3.3). La revisión técnica del vehículo constató que las emisiones de CO se encontraban dentro del rango permisible por el MTC. Además se observa que todos los valores medidos de CO superan al valor permisible del MTC; con excepción de PCT6, en donde se

observa que solo en el lapso de tiempo de 250 s a 500 s los valores de CO son menores al límite permisible establecido por el MTC. También, como era predecible, por la menor antigüedad del vehículo, las emisiones de CO en condiciones reales de funcionamiento fueron siempre superiores al resultado obtenido en la revisión técnica.

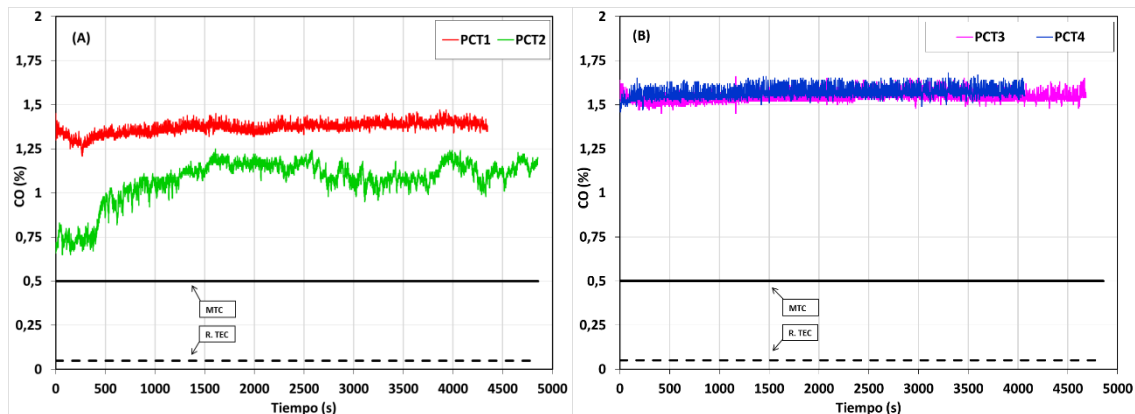


Figura 4.21 - Mediciones de CO en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

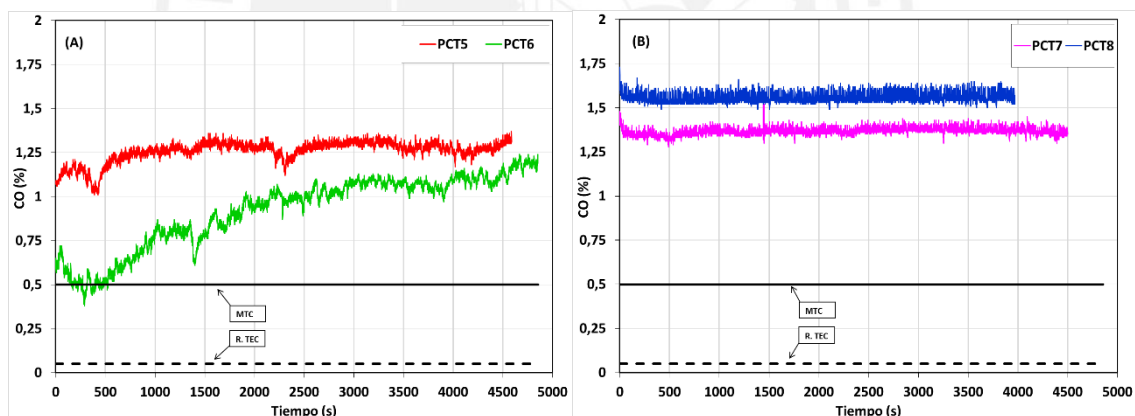


Figura 4.22 - Mediciones de CO en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana 7, am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

La Figura 4.23 muestra que el valor medio de las emisiones promedios del CO con E7,8 fueron menores en comparación a la mezcla E10 (1,38% vs 1,27 %). Esta reducción de CO es similar a los resultados de pruebas de motor en condiciones controladas y estacionarias, donde diversos autores (ver ejemplo Tipian, 2015) confirman que al aumentar el etanol en la gasolina se reduce las emisiones de CO.

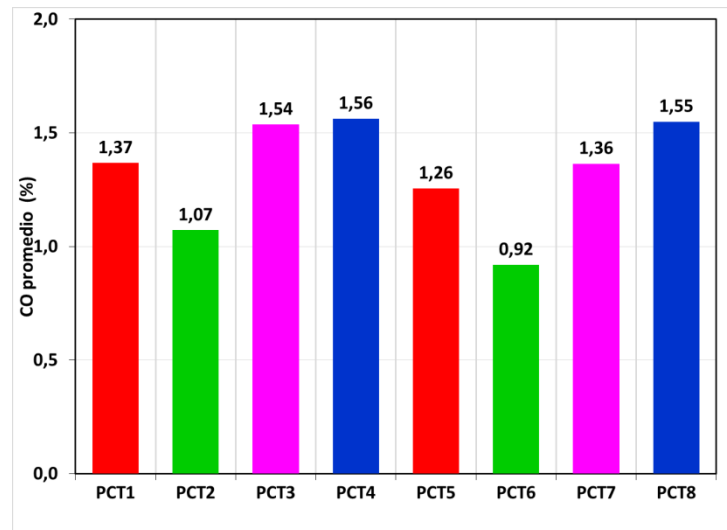


Figura 4.23 - Valores promedios de CO en condiciones de tráfico.

Los resultados de las mediciones de las concentraciones de CO₂ se muestran en las Figura 4.24 y Figura 4.25, mientras que en la Figura 4.26 se presenta sus respectivos valores promedios. De modo general, según las Figura 4.24 y Figura 4.25, no se visualiza diferencia significativa entre las mediciones transitorias de CO₂; además, en la mayoría de casos, los valores máximos de CO₂ estuvieron alrededor del 16 %.

Igualmente, al comparar los resultados promedios de E7,8 y E10 (ver Figura 4.26) se constata que estos valores que son prácticamente iguales. El valor medio las emisiones promedios de CO₂ aumentaron 0,35% al incrementar el contenido de etanol en la mezcla de E7,8 a E10, lo cual no representa una variación significativa.

Por otro lado, en las Figura 4.24 y Figura 4.25Figura 4.21 también han sido representados el límite permisible de CO₂ (línea negra continua) según la normativa propuesta del MTC (ver Tabla 3.2) y el resultado de la prueba de CO₂ (línea negra discontinua) de la última revisión técnica del vehículo utilizado (ver Tabla 3.3). Los resultados muestran que los valores instantáneos de CO₂ durante los recorridos definidos superan los valores de la revisión técnica (13,45 %) y del límite del MTC (11,5 %). Sin embargo, los valores mínimo instantáneos de CO₂ fueron menores al límite permisible establecido por el MTC y al de la prueba de revisión técnica.

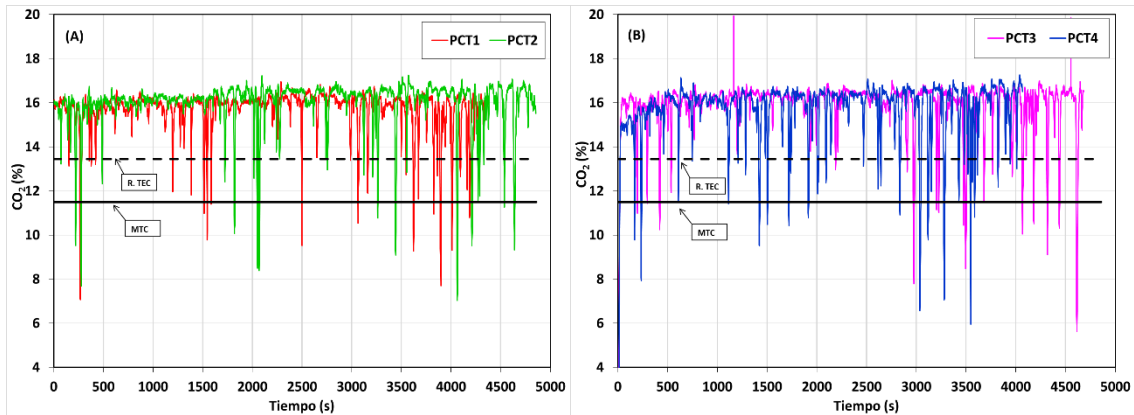


Figura 4.24 - Mediciones de CO₂ en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

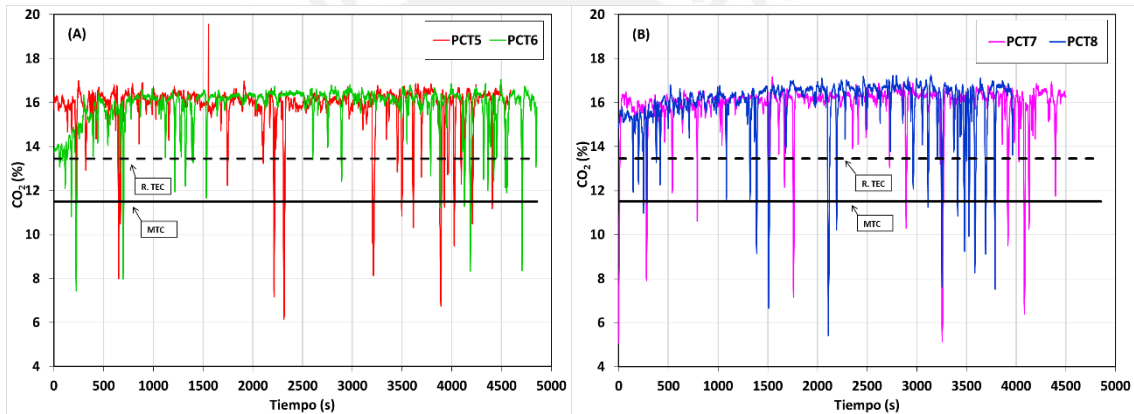


Figura 4.25 - Mediciones de CO₂ en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

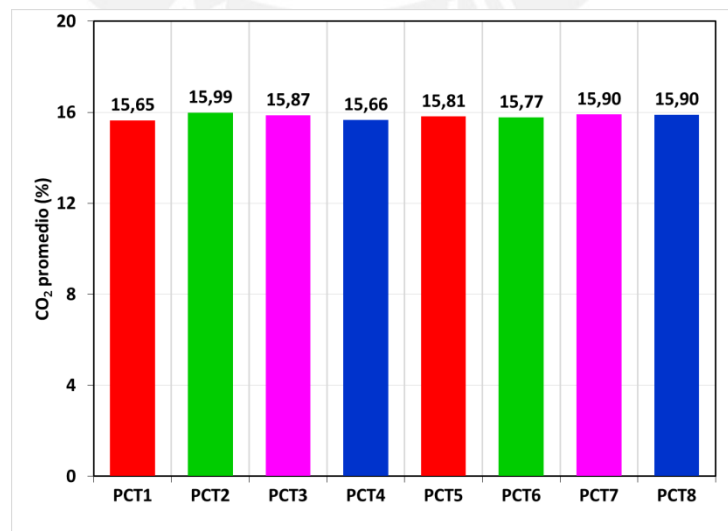


Figura 4.26 - Valores promedios de CO₂ en condiciones de tráfico.

Las Figura 4.27 y Figura 4.28 muestran los resultados de las mediciones instantáneas de NO_x , mientras que sus respectivos valores promedios se visualizan en la Figura 4.29. De un modo general, se verifica que, con excepción de algunos picos, los perfiles de NO_x fueron muy similares entre ambos combustibles, independiente del turno de la prueba. Los óxidos de nitrógeno oscilaron entre 40 ppm a 80 ppm durante el recorrido de las ocho pruebas.

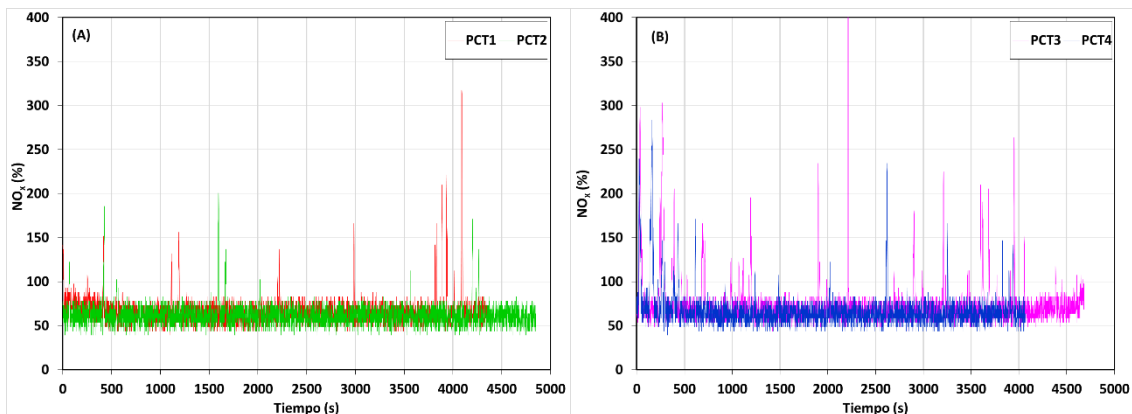


Figura 4.27 - Mediciones de NO_x en condiciones de tráfico utilizando E7,8. (A) pruebas en la mañana 7 am; (B) pruebas en la tarde 2:30 pm.

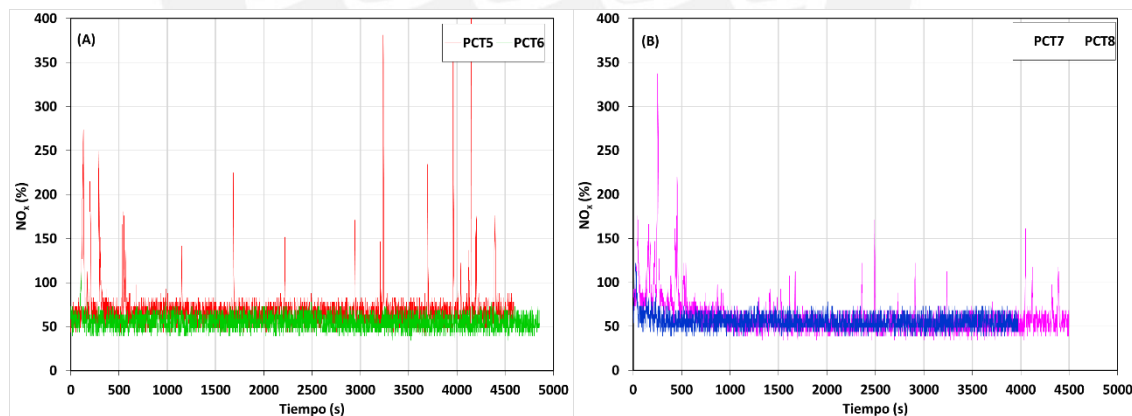


Figura 4.28 - Mediciones de NO_x en condiciones de tráfico utilizando E10. (A) Pruebas en la mañana, 7 am; (B) pruebas en la tarde, 2:30 pm.

Al calcular y comparar la mitad de los promedios (ver Figura 4.29), se comprueba que el incremento de etanol en la gasolina redujo las emisiones de NO_x en 10,25 %, ya que los valores medios de los cuatros promedios con E7,8 y E10 fueron 67 ppm y 60 ppm, respectivamente.

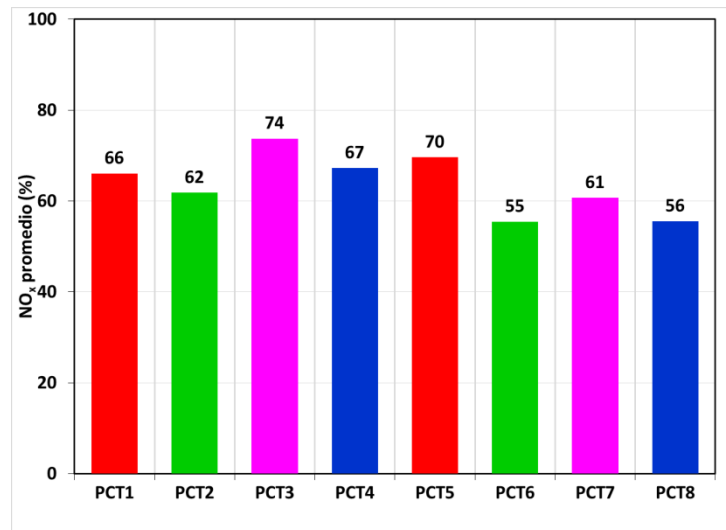


Figura 4.29 - Valores promedios de NO_x en condiciones de tráfico.

4.1.2. Índices de emisiones en condiciones de tráfico

En la Tabla 4.3 se muestran los índices de emisiones calculados en gramos de combustible por kilómetro recorrido para los circuitos en condiciones de tráfico.

Los resultados obtenidos dan a mostrar que los índices de emisiones de CO₂, NO_x, O₂, CO y HC sufren una disminución de 1,42 %, 10,63 %, 4,34 %, 4,35 % y 10,21 % al incrementar 2,2 % de etanol en el gasohol comercial (E7,8).

Tabla 4.3 - Índices de emisiones en circuito con condiciones de tráfico.

COMBUSTIBLE	PRUEBAS	ÍNDICE DE EMISIONES				
		NO _x (mg/km)	O ₂ (g/km)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	HC (mg/km)
E 7,8	PCT1	71,15	13,27	10,92	196,28	168,05
	PCT2	133,54	26,40	16,83	398,99	319,17
	PCT3	125,05	21,09	18,54	299,59	260,25
	PCT4	80,70	16,85	13,72	216,08	182,28
	PROMEDIO	102,61	19,40	15,00	277,74	232,44
E 10	PCT5	108,25	18,97	13,98	278,80	236,31
	PCT6	75,31	16,12	9,14	245,92	184,21
	PCT7	60,80	10,25	9,28	169,58	119,87
	PCT8	122,46	28,91	25,01	400,89	294,42
	PROMEDIO	91,71	18,56	14,35	273,80	208,70
AUMENTO (+)/ REDUCCIÓN (-)	TOTAL	-10,63%	-4,34%	-4,35%	-1,42%	-10,21%

4.2. Circuito a velocidad constante

4.2.1. Perfiles y valores promedios a velocidad constante

La Figura 4.30 y Figura 4.31 muestran el registro de las velocidades en las pruebas del circuito en condiciones a velocidad promedio constante, utilizando combustibles E7,8 y E10, respectivamente. La Figura 4.30A, Figura 4.30B y Figura 4.30C presentan la variación de velocidades para las condiciones requeridas de 60 km/h (PCVC1 y PCVC2), 80 km/h (PCVC3 y PCVC4) y 100 km/h (PCV100E7,8_1 y PCVC6) utilizando E7,8, respectivamente. Análogamente, la Figura 4.31A, Figura 4.31B y Figura 4.31C representan los resultados medidos para 60 km/h (PCVC7 y PCVC8), 80 km/h (PCVC9 y PCVC10) y 100 km/h (PCV100E10_1 y PCVC12) utilizando E10, respectivamente.

En las Figura 4.30 y Figura 4.31, se observa que estas velocidades instantáneas presentaron un incremento y descenso durante el inicio y final de cada recorrido. Estos datos no se tomaron en cuenta en el análisis. Asimismo; en algunos perfiles se aprecian cambios bruscos de la velocidad debido a que, por más que sea una carretera con circulación rápida, existen eventos inesperados como cruce de camiones y peatones. Por ello, los datos analizados fueron restringidos a intervalos de tiempo correspondientes a la velocidad más estable. Estos intervalos se ilustran en los perfiles mediante líneas verticales discontinuas (ver Figura 4.30 y Figura 4.31). De este modo, los intervalos para cada figura son los siguientes:

Figura 4.30A: desde 30 s hasta 500 s;

Figura 4.30B: desde 279 s hasta 446 s;

Figura 4.30C: desde 24 s hasta 360 s;

Figura 4.31A: desde 17 s hasta 480 s;

Figura 4.31B: desde 68 s hasta 413 s;

Figura 4.31C: desde 30 s hasta 365 s.

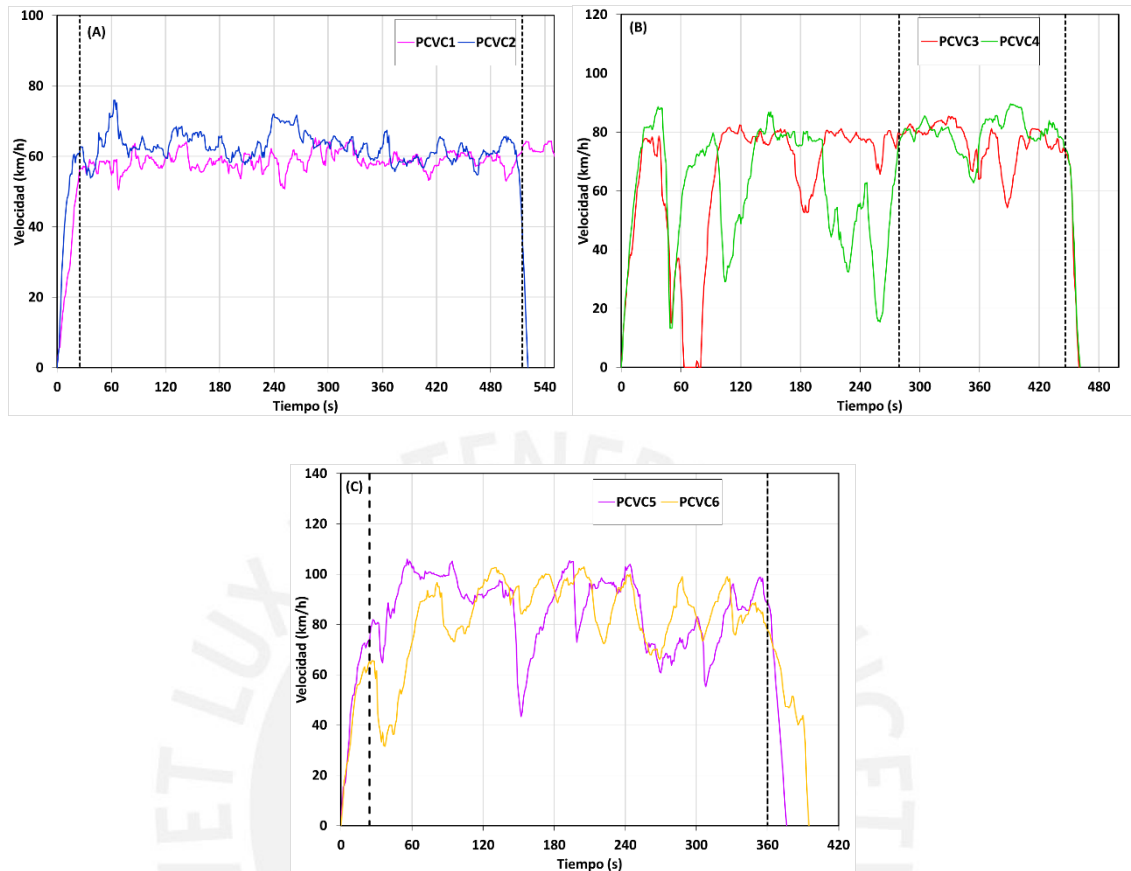


Figura 4.30 - Mediciones de velocidad en condiciones de “velocidad constante” utilizando E7,8.
(A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

Las velocidades promedio obtenidas de los intervalos impuestos según la Figura 4.30 y Figura 4.31 se presentan en la Figura 4.32. Se observa que existe una diferencia en los valores promedio reales a comparación de las velocidades requeridas. Por ejemplo, para la condición de 60 km/h se obtuvo que la velocidad promedio en PCVC60_E7,8_1 fue 58,7 km/h; en cambio, para una velocidad requerida de 100 km/h, la velocidad promedio real fue de 85,5 km/h en PCVC100_E10_2.

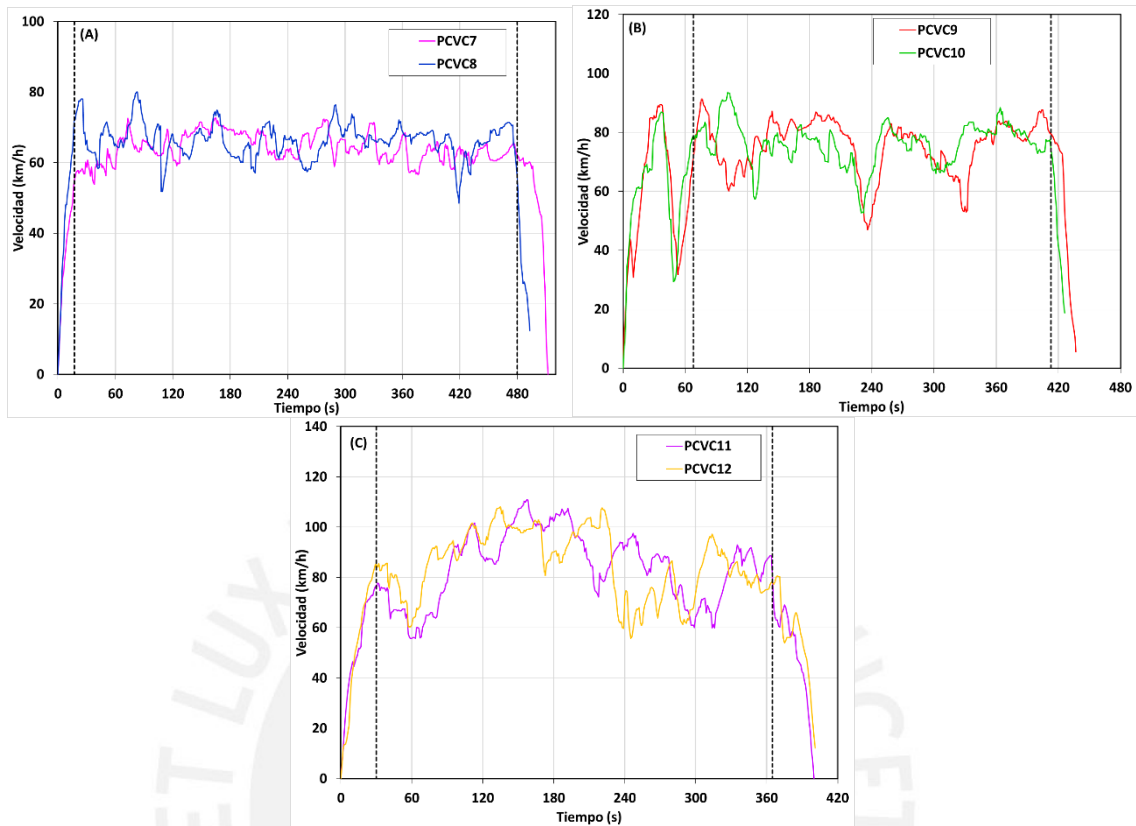


Figura 4.31 - Mediciones de velocidad en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

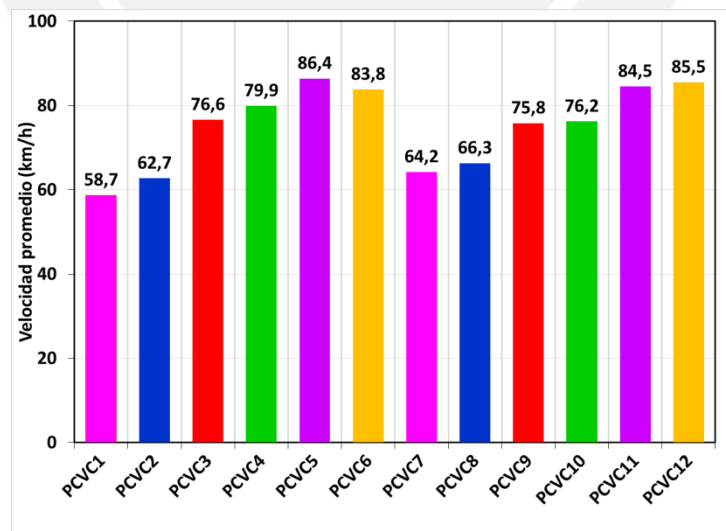


Figura 4.32 - Valores promedio de velocidad en condición de velocidad constante.

Los resultados del flujo másico de aire de admisión se muestran en la Figura 4.35 y Figura 4.34; además, en la Figura 4.35, se muestra los respectivos valores promedio de los doce recorridos. Para todos los recorridos (ver Figura 4.4 y Figura 4.5), se observa que los valores

medidos del flujo de aire poseen siempre valores altos esto se debe que el conductor estuvo pisando el acelerador del vehículo durante mayor tiempo de su recorrido

Al comparar los valores promedios (ver Figura 4.35), se observa que PCVC12 presenta el mayor valor promedio de flujo de aire (17,53 g/s) con el resto de recorridos. Además, se comprueba que el flujo de aire de admisión aumentó al incrementar el contenido de etanol en el gasohol comercial, significativamente. Para las velocidades de 60 km/h y 80 km/h (86,26 % y 25,70 %, respectivamente); en cambio, para la velocidad de 100 km/h, disminuyó solo 0,60 %. Donde, el valor medio de los seis recorridos promedios con E7,8 fue 10,58 g/s; mientras que el promedio con E10 resultó igual a 13,76 g/s.

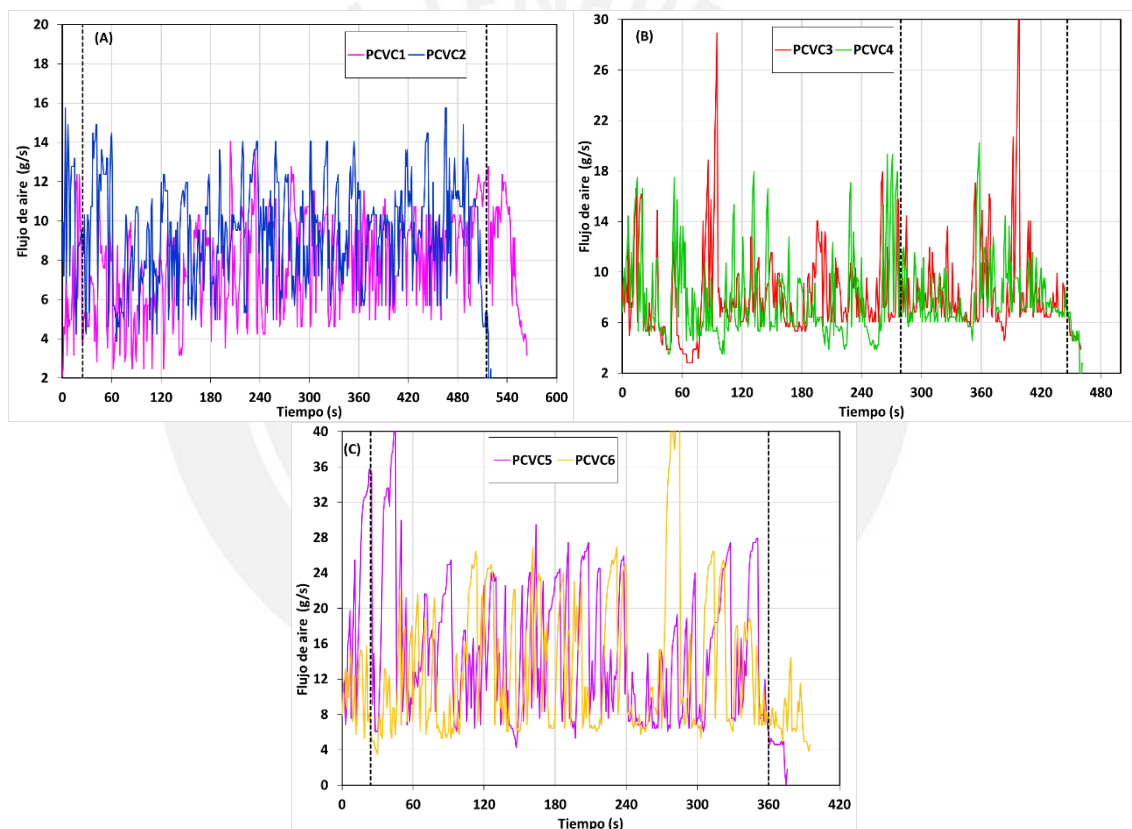


Figura 4.33 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

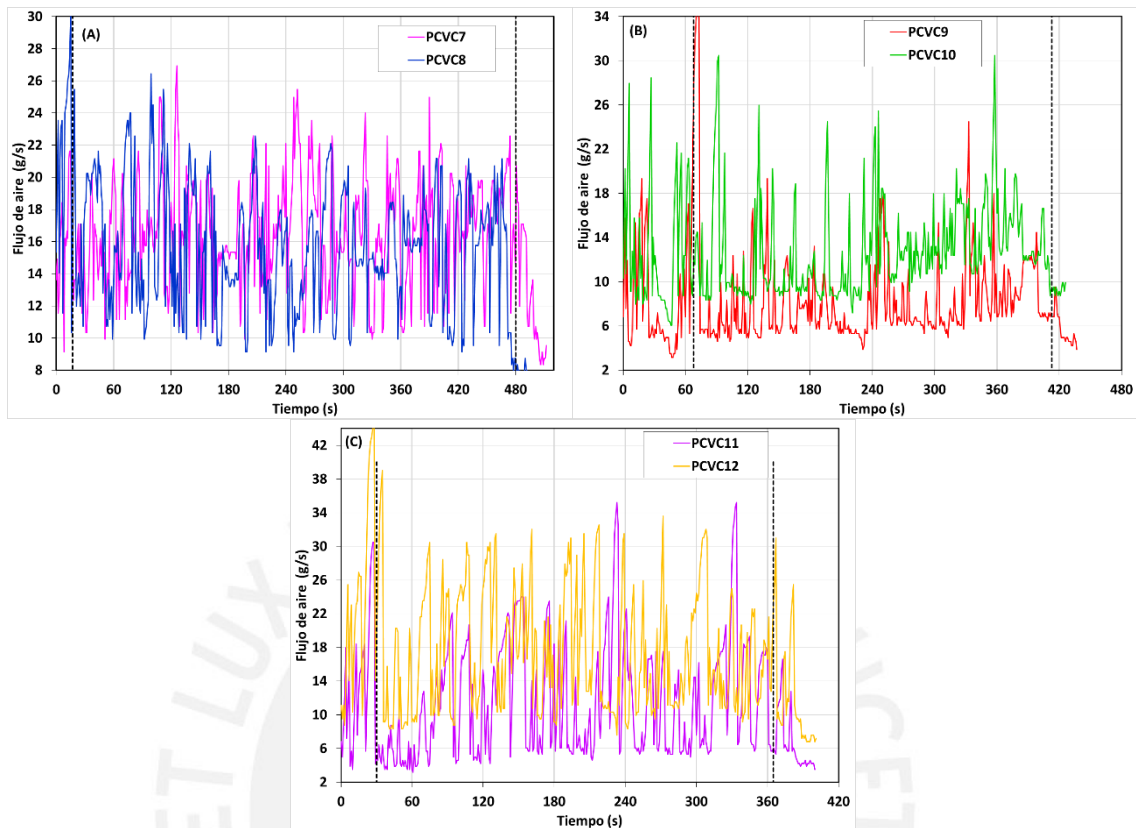


Figura 4.34 - Mediciones del flujo de aire en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

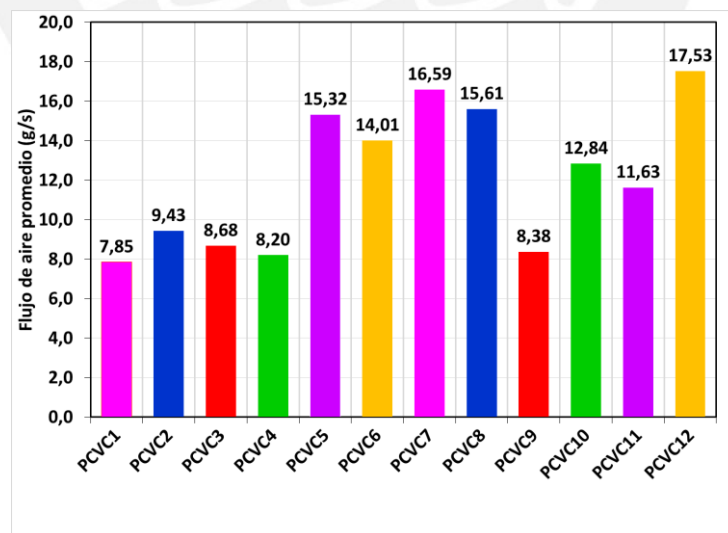


Figura 4.35 - Valores promedios del flujo de aire en condición de velocidad constante.

La Figura 4.36 y Figura 4.37 muestran la variación de factor lambda (λ) durante los doce recorridos en condiciones de velocidad promedio constante, funcionando con E7,8 y E10 respectivamente. La Figura 4.38 presenta los valores promedios del factor

lambda obtenidos a partir de la Figura 4.36 y Figura 4.37. De estas figuras, se observa que el motor trabajó, de igual manera para las condiciones de tráfico e indiferente del tipo de combustible (E7,8 y E10), con mezclas aire-combustible casi estequiométricas ($\lambda=1$).

La Figura 4.36 y Figura 4.37 ilustran un número regular de picos de los perfiles del factor lambda, debido a que el conductor siempre mantuvo presionado el acelerador intermitentemente durante todo el circuito, a fin de mantener una velocidad constante. Por ello, en esas condiciones, la mezcla aire-combustible presentó picos más pobre, como se comprobó en las Figura 4.9A y Figura 4.9B

De los doce recorridos a “velocidad constante”, se tiene que los dos mayores valores de λ ocurren con PCVC9 y PCVC10: 1,45 y 1,47 respectivamente. Esto quiere decir que para esos dos recorridos la mezcla de aire-combustible conteniendo más etanol (E10) fue, en promedio, más pobre.

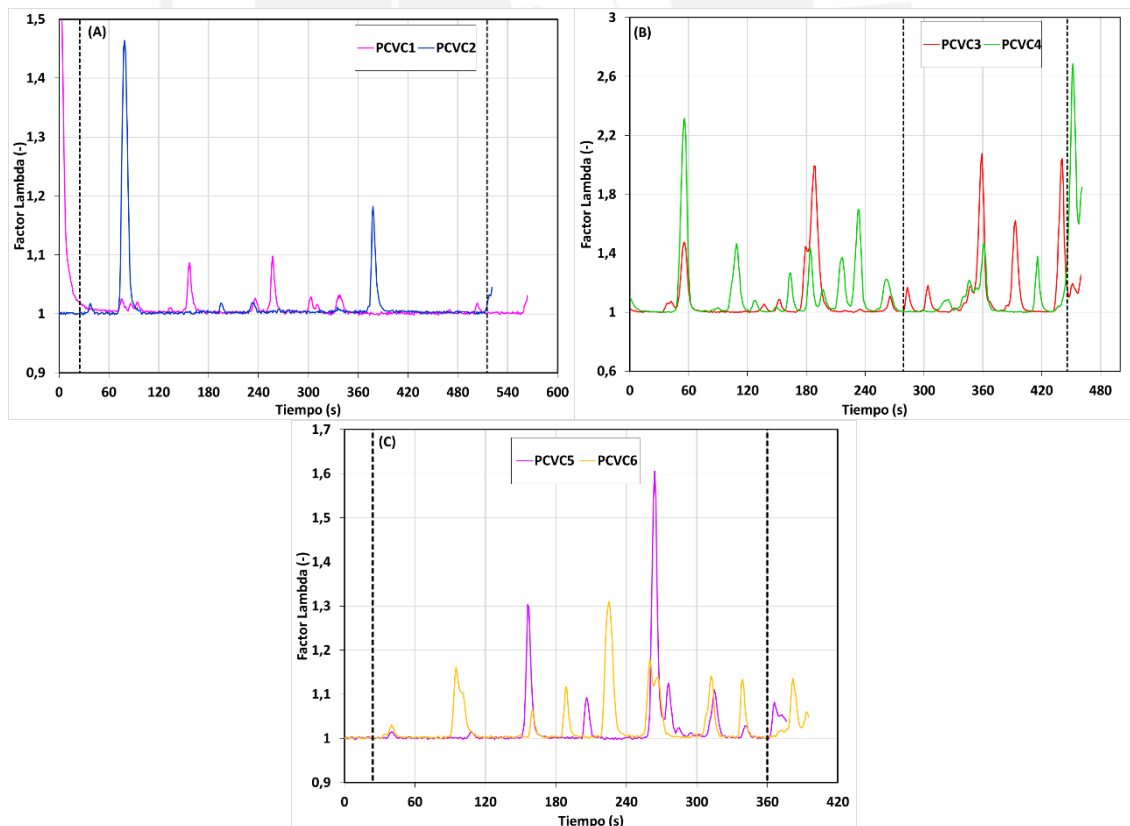


Figura 4.36 - Mediciones del factor lambda en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

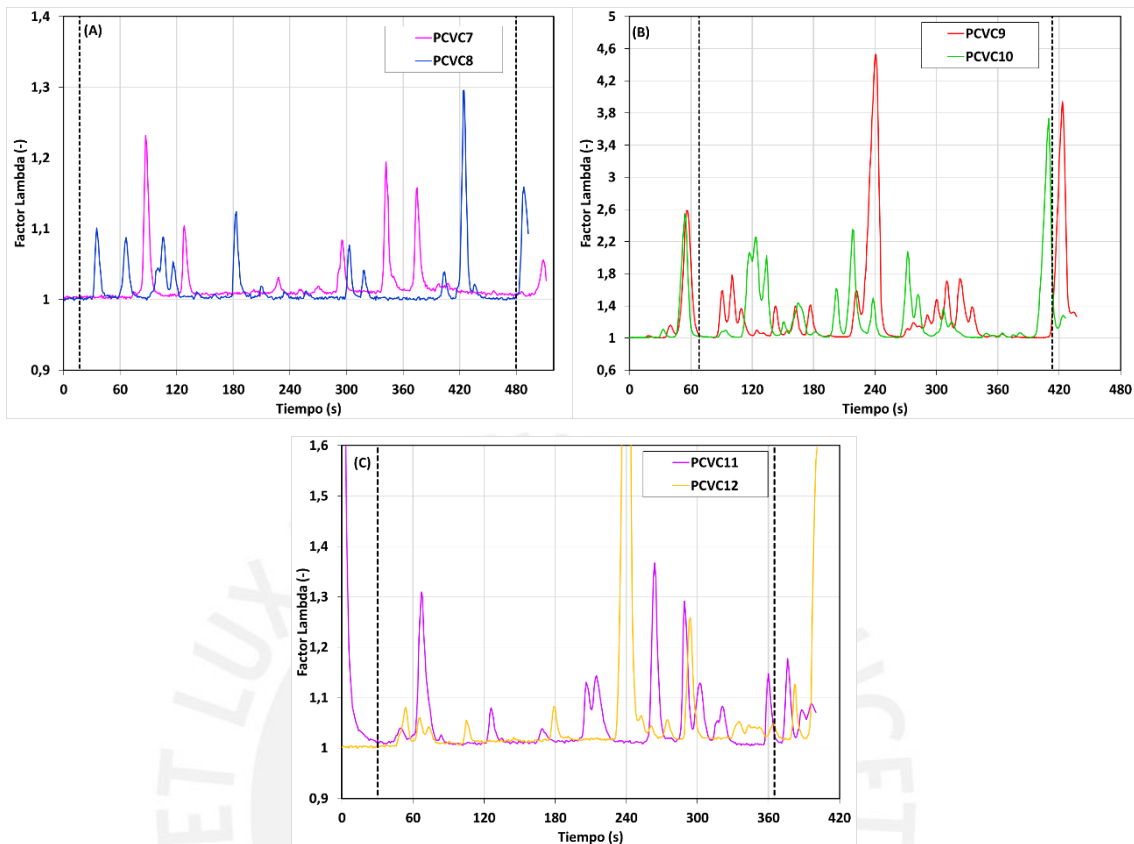


Figura 4.37 - Mediciones del factor lambda en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

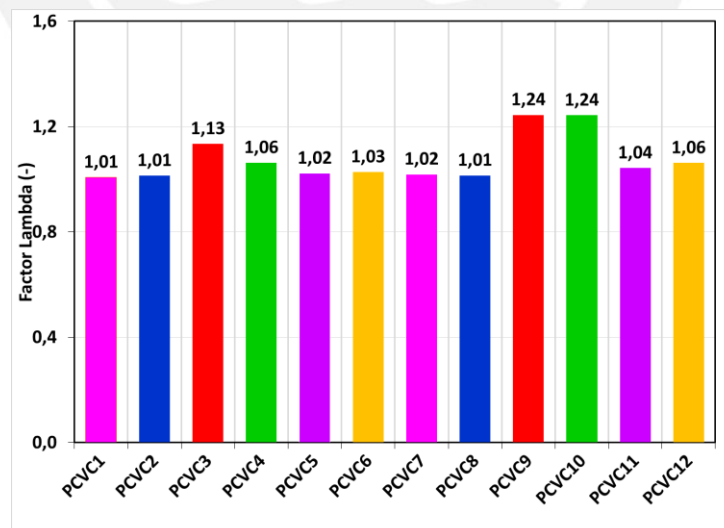


Figura 4.38 - Valores promedios del factor lambda en condición de velocidad constante.

Las mediciones de las concentraciones de oxígeno residual en los gases de escape del vehículo son representadas en las Figura 4.39 y Figura 4.40, a su vez sus respectivos valores promedios en la Figura 4.41.

Los perfiles del O_2 residual guarda una relación de directamente proporcional con los perfiles del factor lambda (Figura 4.7 y Figura 4.8).

Análogamente, con los recorridos en condiciones de tráfico, la variación de los valores medidos O_2 se encuentra asociado a las aceleraciones, desaceleraciones y paradas del vehículo durante el circuito establecido. Por ejemplo, cuando el vehículo se aceleró, aumentó el flujo de combustible, lo cual hizo que la mezcla aire-combustible se vuelva menos pobre y con ello disminuya el O_2 residual.

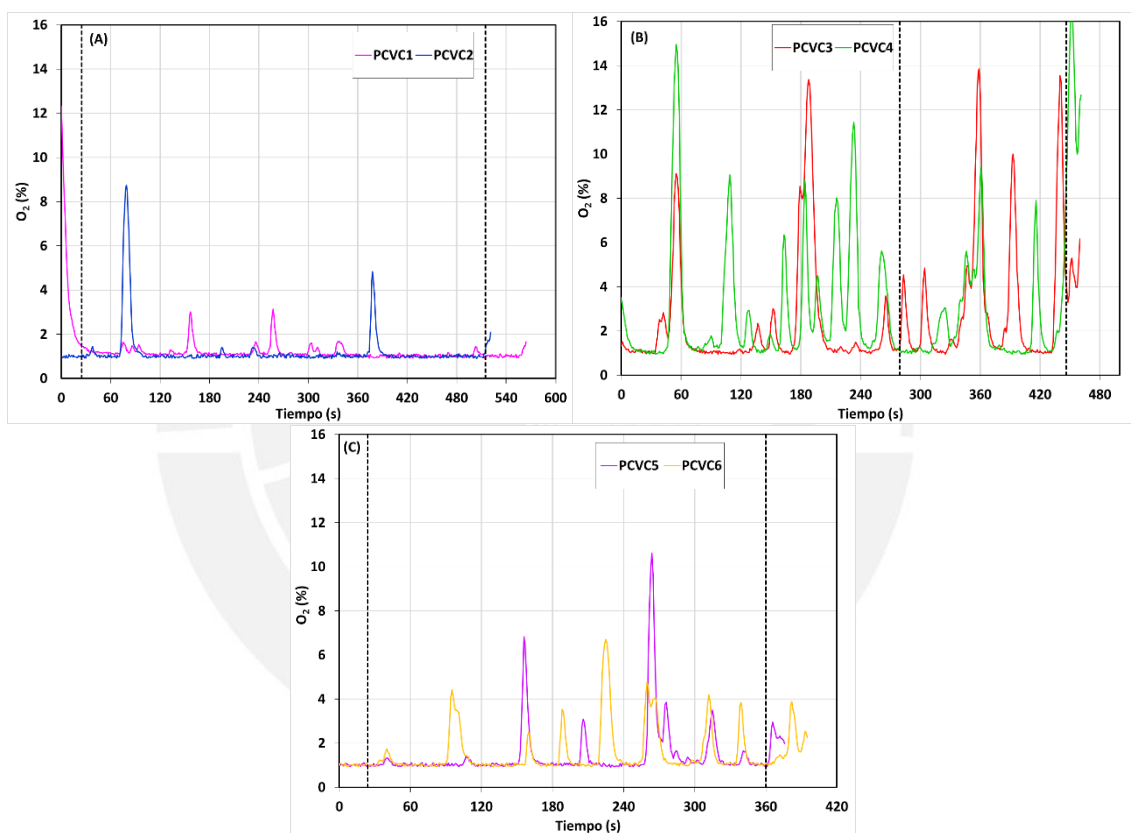


Figura 4.39 - Mediciones de O_2 en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

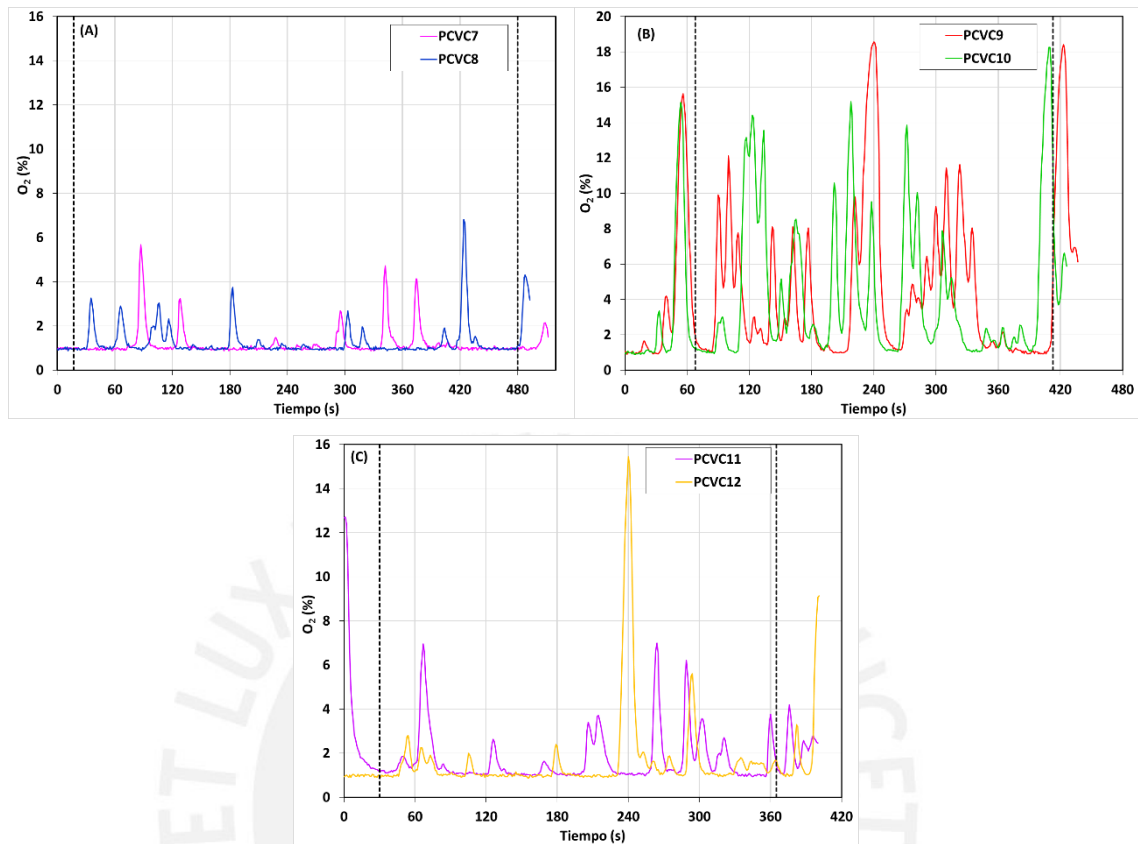


Figura 4.40 - Mediciones de O_2 en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

Por otra parte, se observa que los valores medios de los seis promedios del O_2 utilizando E10 aumentaron considerablemente en 30,65 % respecto al valor medio con E7,8. Esto se debe a que el vehículo funcionó con mayores velocidades promedio (ver Figura 4.32), mayor flujo de aire (ver Figura 4.35) y mezclas de aire-combustible más pobres (ver Figura 4.3). Este resultado se justifica por el mayor flujo de combustible y mayor contenido del oxígeno con el E10, durante las mayores aceleraciones.

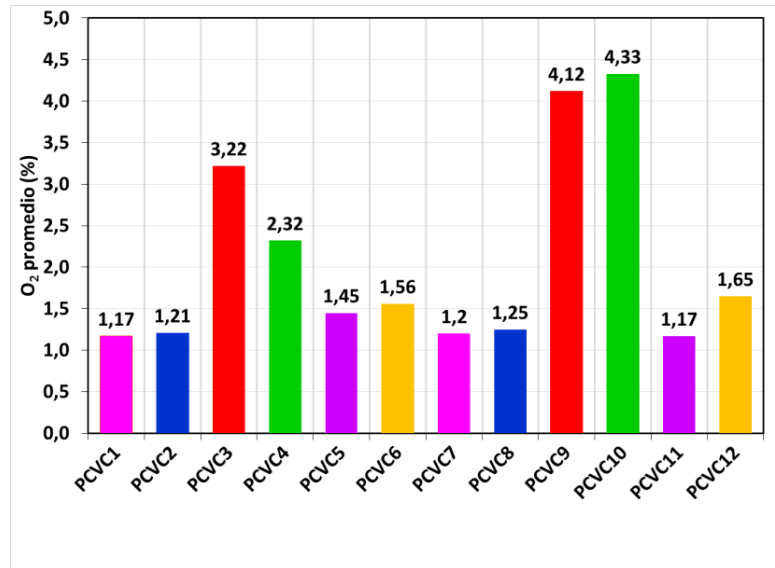


Figura 4.41 - Valores promedios de O₂ en condición de velocidad constante.

Las Figura 4.42 y Figura 4.43 muestran los valores de flujo de combustible calculados mediante la ecuación (3.18) a partir de los datos de flujo de aire (ver

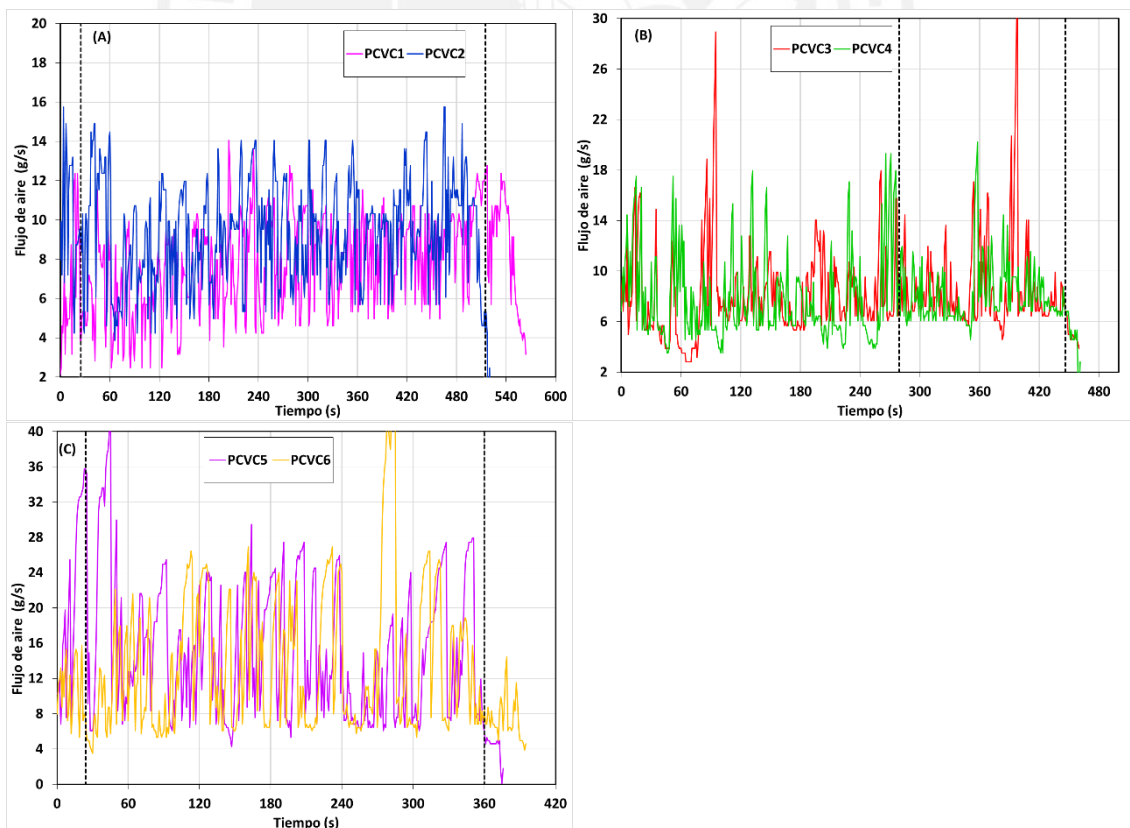


Figura 4.33 y Figura 4.34) y factor lambda (ver Figura 4.36 y Figura 4.37) obtenidos durante la campaña. Los perfiles de flujo de combustible, análogamente de los perfiles en condiciones de

tráfico, son idénticos que los perfiles de flujo de aire debido a que son directamente proporcionales.

En la Figura 4.44 se aprecia los valores promedios de los flujos de combustibles calculados, en donde se tiene un mayor promedio de flujo de combustible en PCVC12 (1,16 g/s). También, el valor medio de los seis promedios usando E7,8 fue 0,70 g/s y con E10 fue 0,90 g/s. Esto es un indicador de que el motor funcionando con E10 consumió más combustible que funcionando con E7,8, lo cual era de esperarse por el menor poder calorífico del etanol.

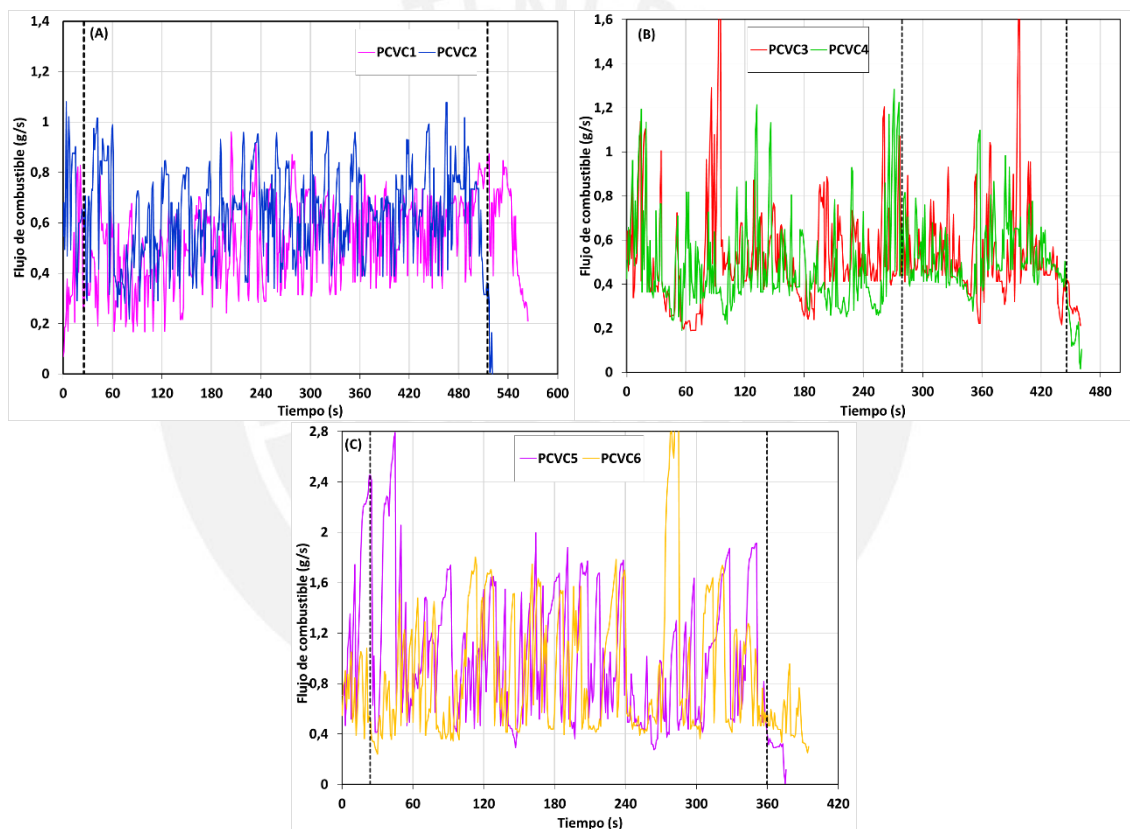


Figura 4.42 - Mediciones del flujo de combustible en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

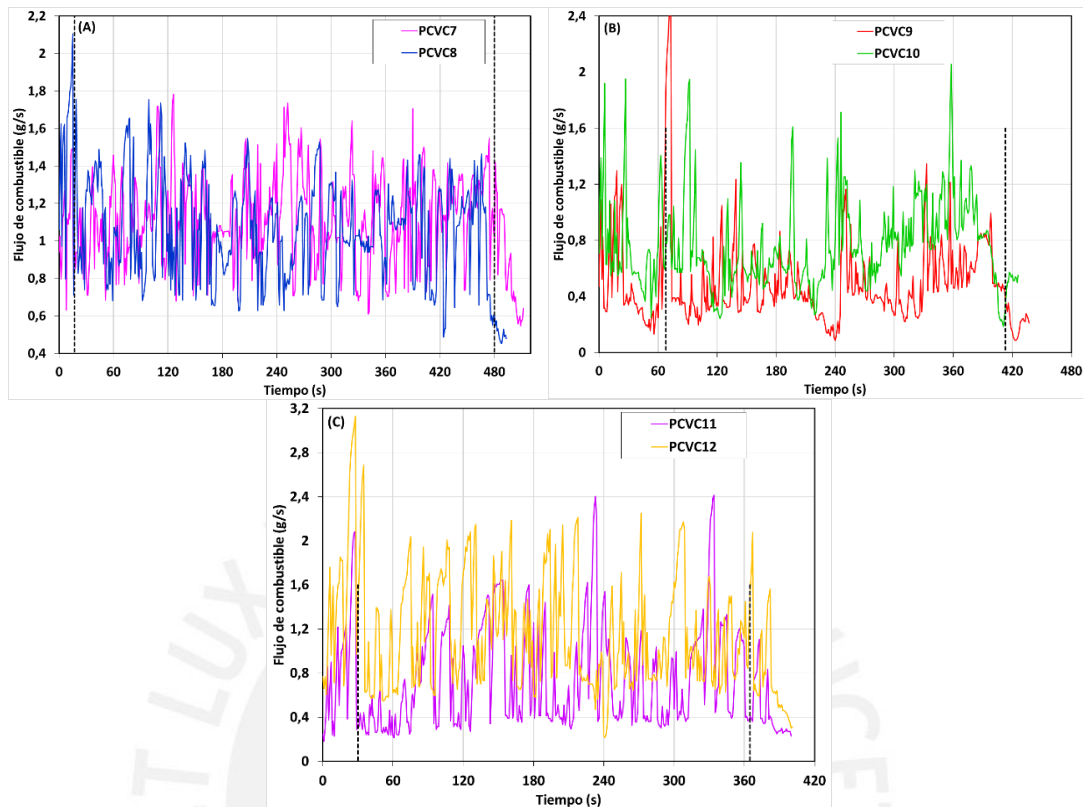


Figura 4.43 - Mediciones del flujo combustible en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

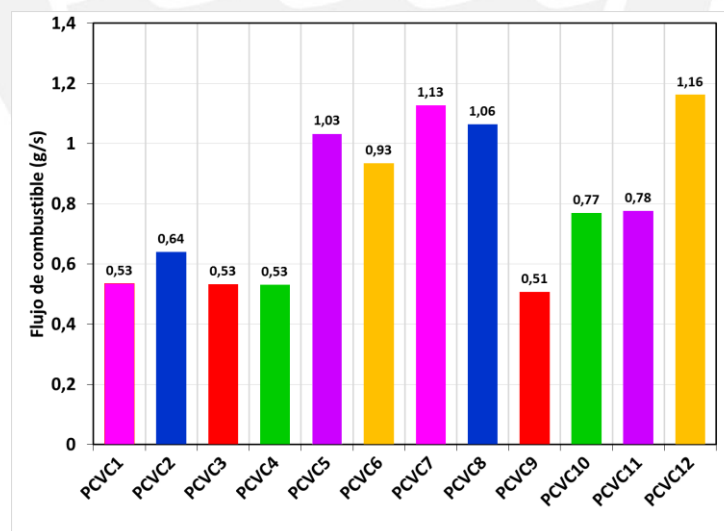


Figura 4.44 - Valores promedios de flujo de combustible en condición de velocidad constante.

La Figura 4.45 muestra el consumo promedio del vehículo en km/L de los doce recorridos, en donde existen diferencias según las velocidades de los recorridos. Es decir, para una velocidades medias a 60 km/h y 80 km/h, el consumo aumentó ,considerablemente, (41,90 % y 16,53 % respectivamente) al aumentar el contenido de

etanol en el gasohol comercial; en cambio para velocidades 100 km/h, el consumo de combustible fue menor (3,38 %). El valor medio de los seis promedios con E7,8 fue 25,08 km/L y con E10 fue 20,28 km/L. En donde se tiene una aumento de 19,11 % en el consumo de combustible al aumentar el contenido de etanol en la mezcla.

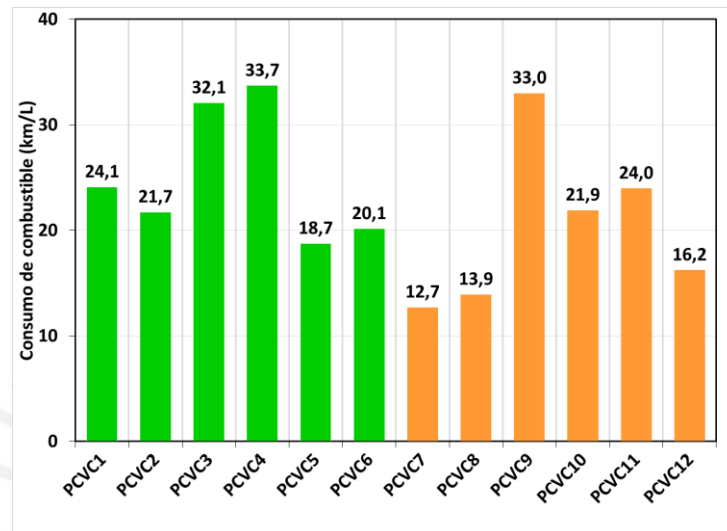


Figura 4.45 - Valores promedios de consumo de combustible en condición de velocidad constante.

La Figura 4.46 y Figura 4.47 muestran los valores de HC obtenidos durante la campaña en condiciones de velocidad promedio constante. En los intervalos o rangos establecidos previamente, estos valores son oscilantes durante todo el recorrido y varían entre 90 ppm a 180 ppm para E7,8 (Figura 4.46); en cambio, para los valores de HC con E10 se observa una variación entre 80 ppm a 140 ppm. Esta diferencia se comprueba al promediar y comparar dichos valores (ver Figura 4.48). Los seis promedios de HC con E7,8 y con E10 fueron 133 ppm y 115 ppm, respectivamente. Esto constata una reducción de 13,05 % de HC usando el E10 respecto al E7,8.

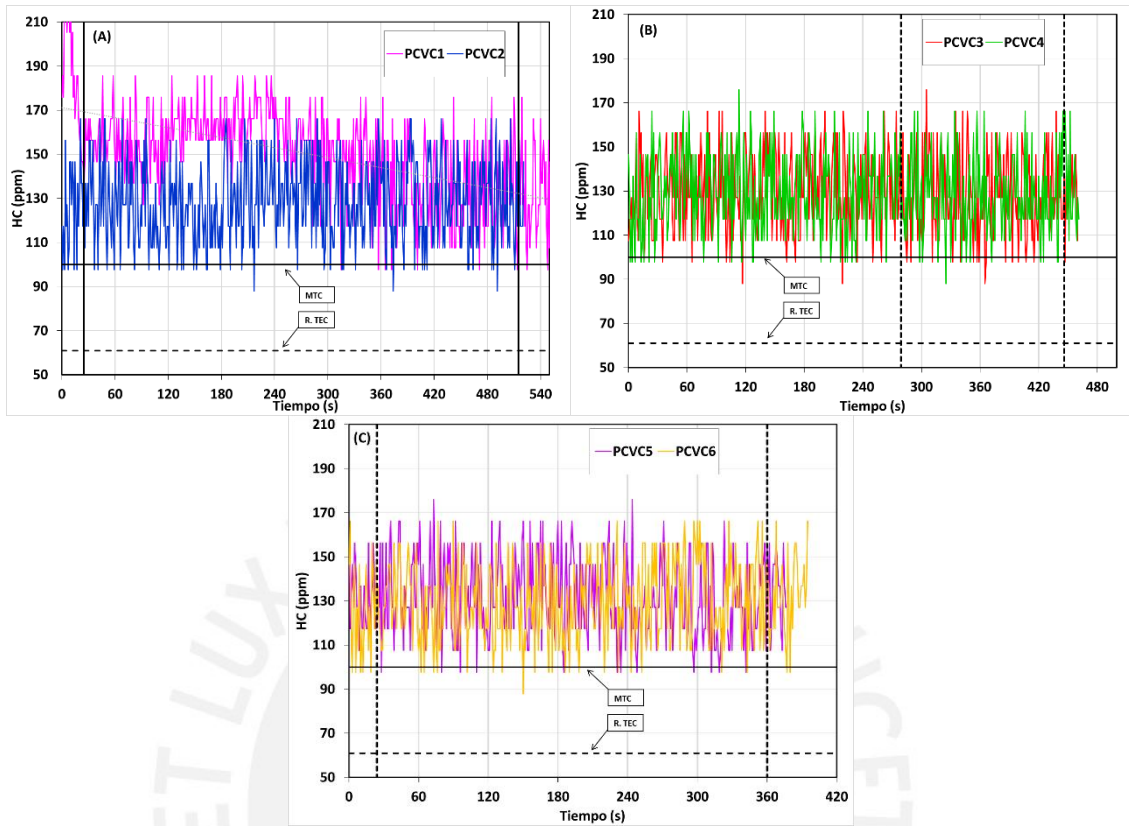


Figura 4.46 - Mediciones de HC en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

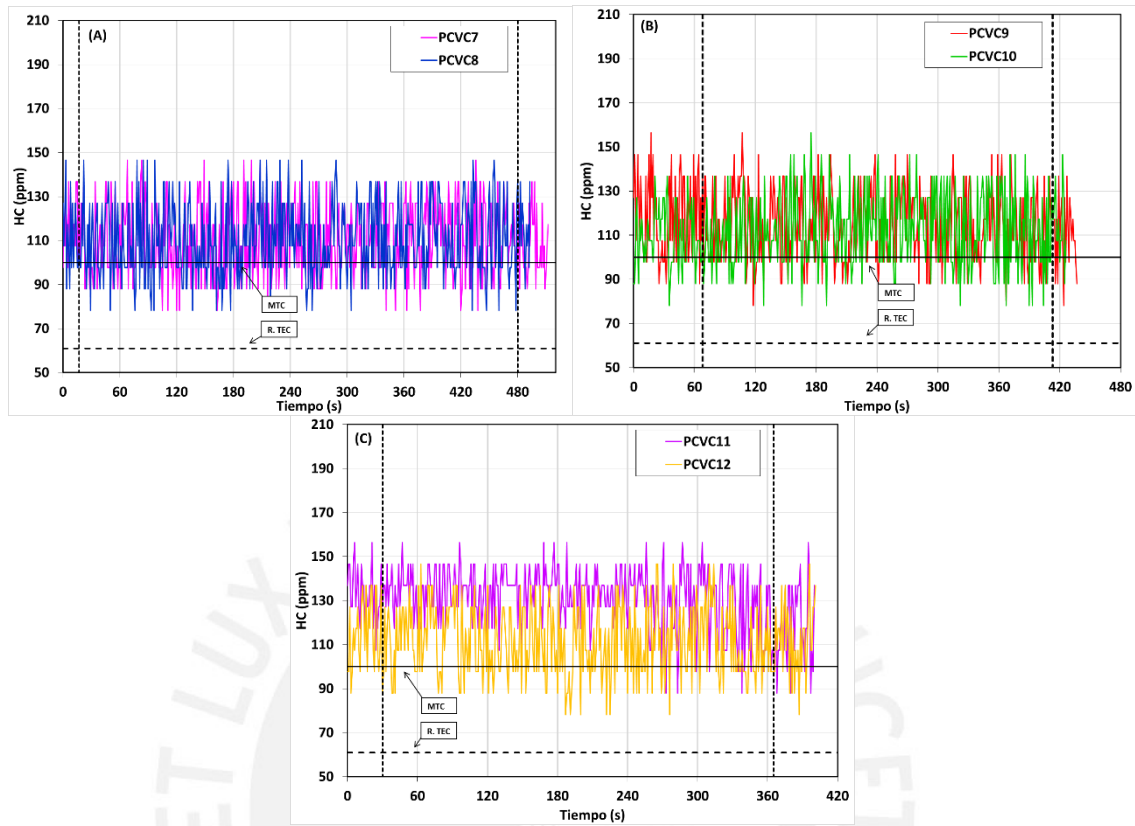


Figura 4.47 - Mediciones de HC en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

Por otro lado, a modo de comparación, en las Figura 4.46 y Figura 4.47 se han representado el límite permisible de HC (línea negra continua) según la normativa propuesta del MTC (ver Tabla 3.2) y el resultado de la prueba de HC (línea negra discontinua) en la última revisión técnica del vehículo utilizado (ver Tabla 3.3). En condiciones de tráfico, la gran parte de los valores superan al valor permisible de 100 ppm (límite de MTC); en cambio, para las mediciones de HC con E10, se tiene un número regular de valores que no superan a 100 ppm. También, como era predecible, por la menor antigüedad del vehículo, las emisiones de HC en condiciones reales de funcionamiento fueron siempre superiores al resultado obtenido en la revisión técnica (condiciones estacionarias de vacío).

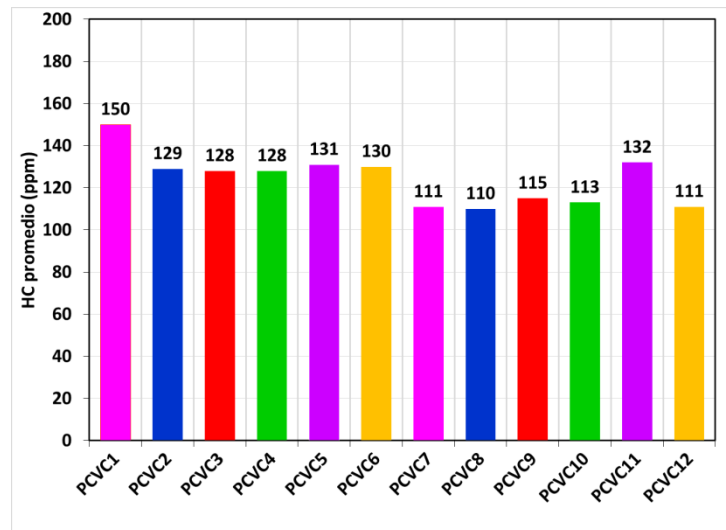


Figura 4.48 - Valores promedios de HC en condición de velocidad constante.

Los resultados de las mediciones de CO se muestran en las Figura 4.49 y Figura 4.50. En estas figuras se observa que solo los perfiles de CO utilizando E7,8 (Figura 4.49) poseen una tendencia casi constante, en cambio para los perfiles con E10 poseen una tendencia con pendientes positivas y negativas, por lapsos de tiempos. Este efecto se debería a diversos factores ya mencionados en el análisis de resultados de CO en condiciones de tráfico (sección 4.1.1).

Por otra parte, a modo de comparación, se observa que todos los valores medidos de CO superan ampliamente al valor permisible del MTC usando E7,8 y E10. Nuevamente, como era esperado, por la menor antigüedad del vehículo, las emisiones de CO en condiciones reales de funcionamiento fueron siempre superiores al resultado obtenido en la revisión técnica.

En Figura 4.51 se muestra los valores promedios de los doce recorridos, en donde se obtuvo una mayor reducción (27,11 %) en la prueba PCVC100, al aumentar 2,2 % de etanol al gasohol comercial; en cambio durante PCVC80 y PCVC60 ocurrieron reducciones de 18,25 % y 11,5 %, respectivamente.

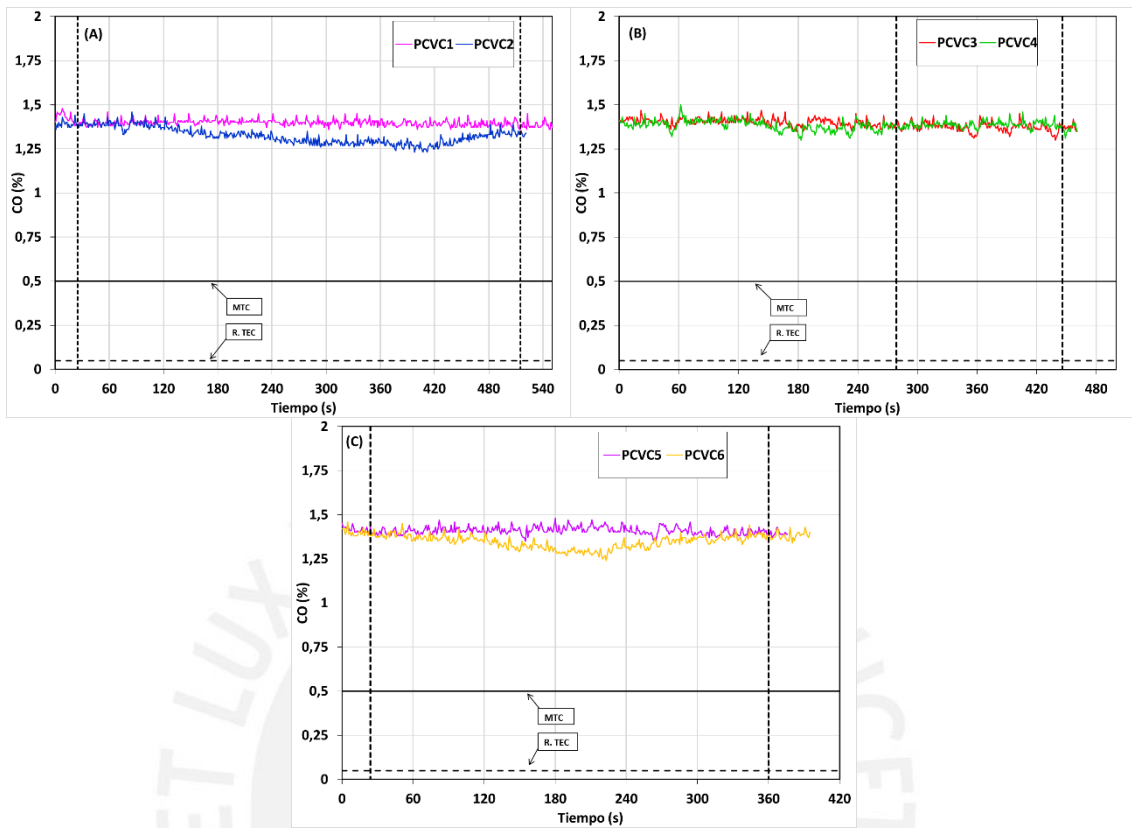


Figura 4.49 - Mediciones de CO en condiciones de velocidad constante utilizando E7.8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

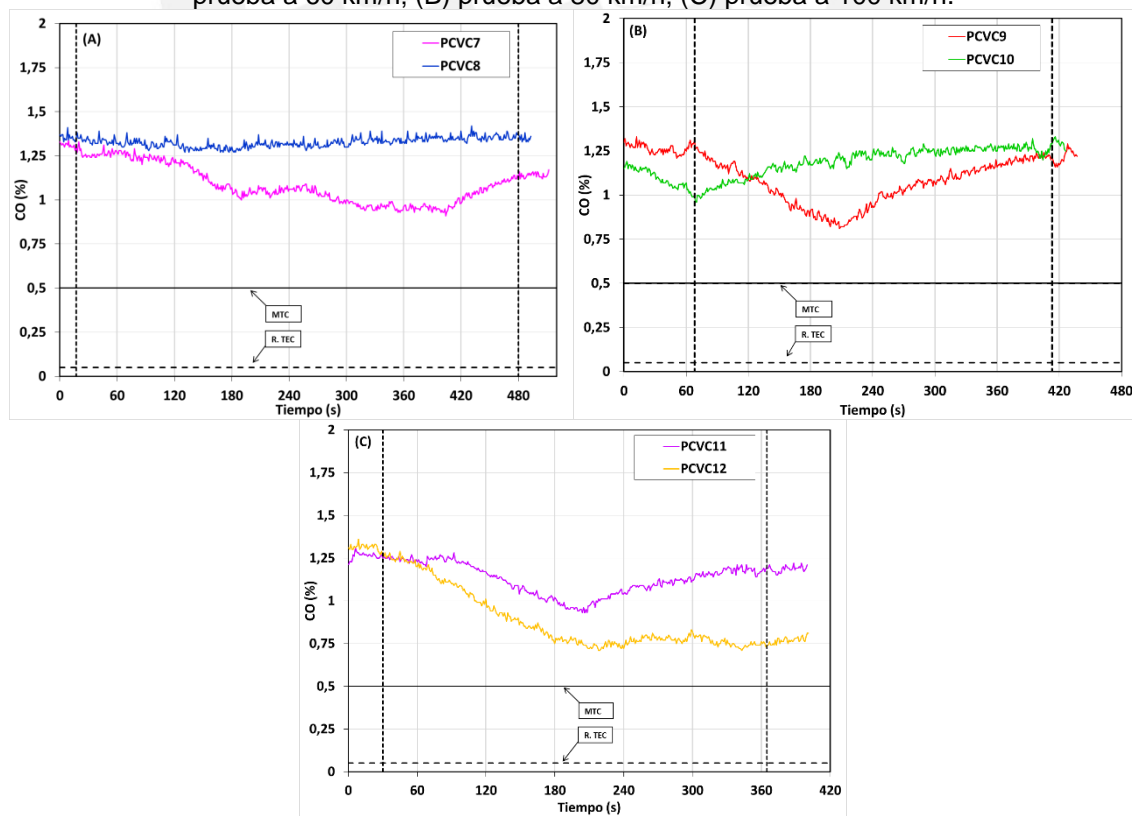


Figura 4.50 - Mediciones de CO en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

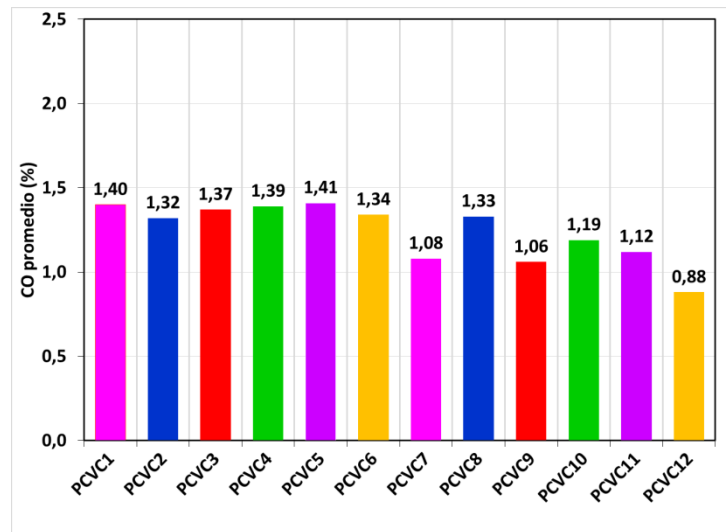


Figura 4.51 - Valores promedios de CO en condición de velocidad constante.

Los resultados de las mediciones de las concentraciones de CO₂ se muestran en las Figura 4.52 y Figura 4.53, mientras en la Figura 4.54 se presenta los respectivos valores promedios.

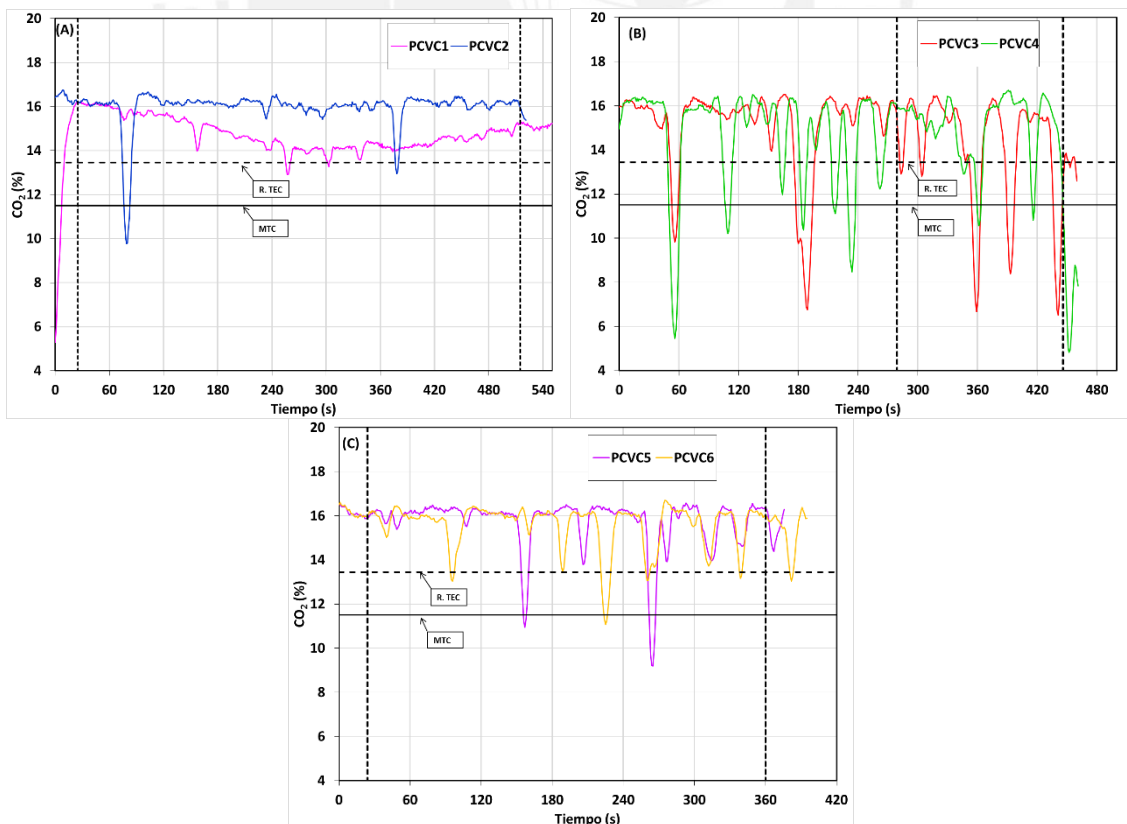


Figura 4.52 - Mediciones de CO₂ en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

De modo general, según la Figura 4.52 y Figura 4.53, no se visualiza diferencia significativa entre los perfiles de mediciones de CO_2 para cada velocidad promedio; sin embargo, en la Figura 4.52, las emisiones de CO_2 de PCVC1 fueron mayores que en PCVC2 en casi todo el recorrido

Comparando, se observa que la mayoría de los valores de CO_2 durante los doce recorridos superan el valor de 13,45 % (Revisión técnica) y el valor de 11,5 % (MTC). Sin embargo, se observa que, en las caídas de los perfiles, los valores de CO_2 son menores al límite permisible establecido por el MTC y al de la prueba de revisión técnica.

También, comparando los resultados promedios de E7,8 y E10 (ver Figura 4.54) se verifica que el valor medio las emisiones de CO_2 disminuyeron 3,07 % al usar mayor contenido de etanol en el gasohol comercial.

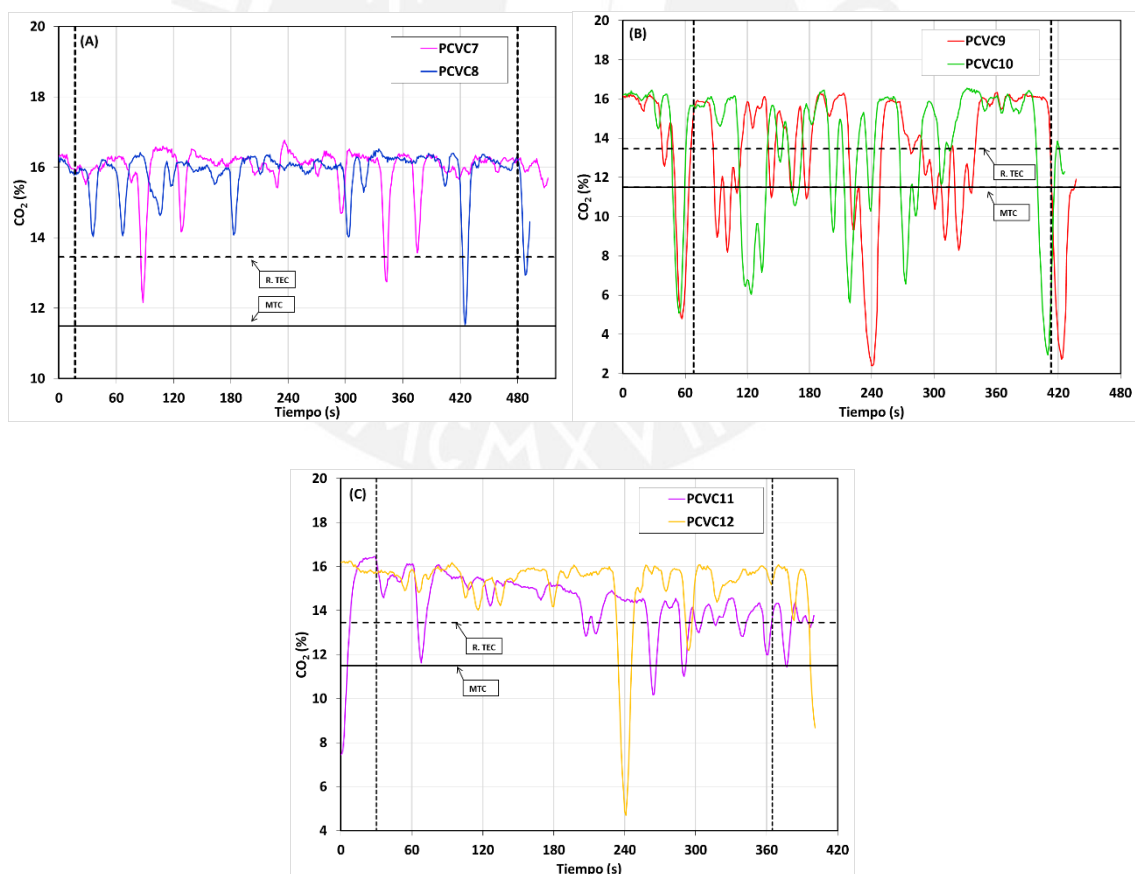


Figura 4.53 - Mediciones de CO_2 en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

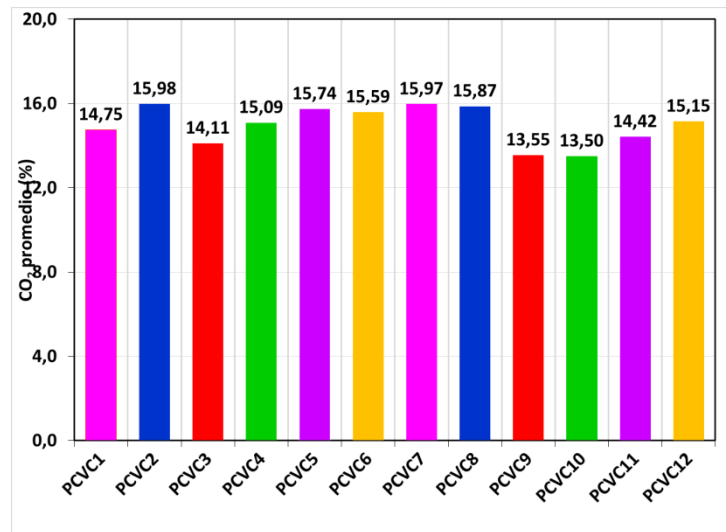


Figura 4.54 - Valores promedios de CO₂ en condición de velocidad constante.

Las Figura 4.55 y Figura 4.56 muestran los resultados de las mediciones de NO_x; mientras que sus respectivos valores promedios se visualizan en la Figura 4.57.

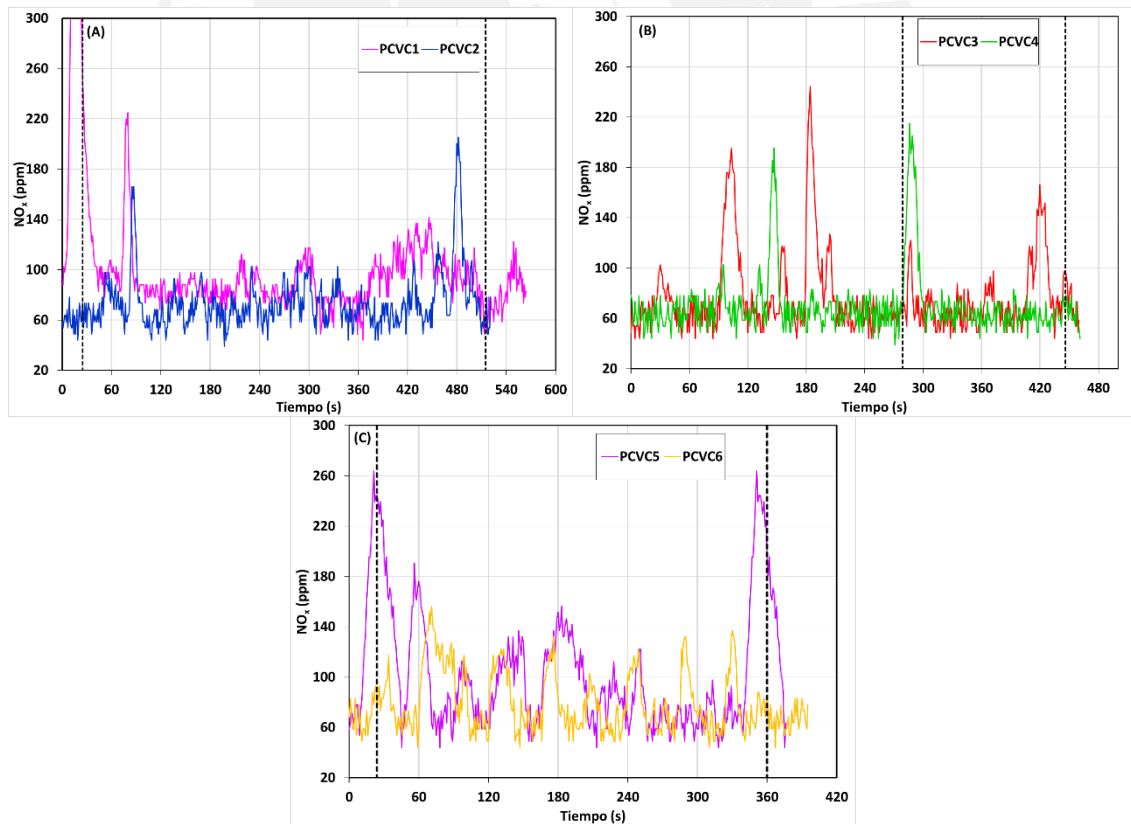


Figura 4.55 - Mediciones de NO_x en condiciones de velocidad constante utilizando E7,8. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

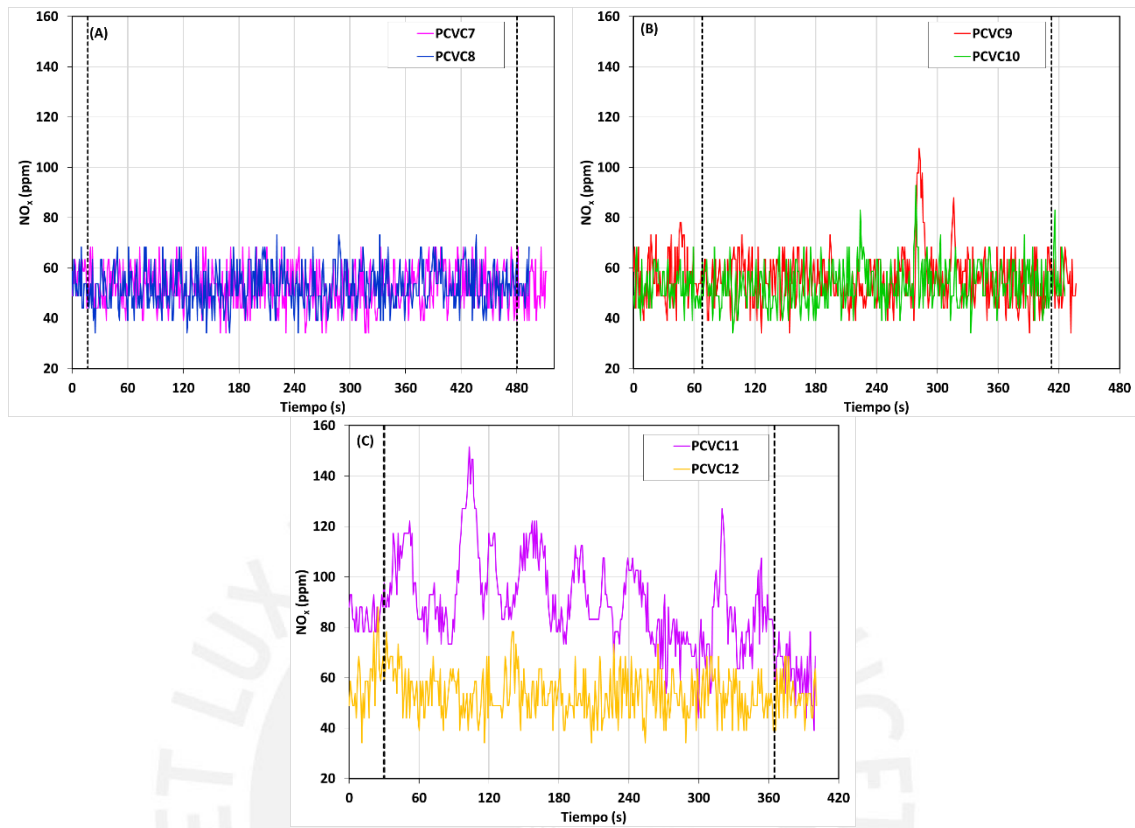


Figura 4.56 - Mediciones de NO_x en condiciones de velocidad constante utilizando E10. (A) prueba a 60 km/h; (B) prueba a 80 km/h; (C) prueba a 100 km/h.

De un modo general, los óxidos de nitrógeno oscilaron entre 40 ppm a 120 ppm durante el recorrido de las doce pruebas en los límites predefinidos. Las Figura 4.55A, Figura 4.55B, Figura 4.55C y Figura 4.56C presentaron diferencias en sus perfiles de NO_x ; en cambio, en la Figura 4.56A y Figura 4.56B se obtuvieron perfiles similares en todo sus respectivos recorridos.

Al comparar los valores promedio (ver Figura 4.57), se comprueba que el incremento de etanol en la gasolina disminuye las emisiones de NO_x en 26,06 %.ya que el valor medio de los seis recorridos con E7,8 fue 82 ppm; mientras que el valor medio con E10 resultó igual a 60 ppm.

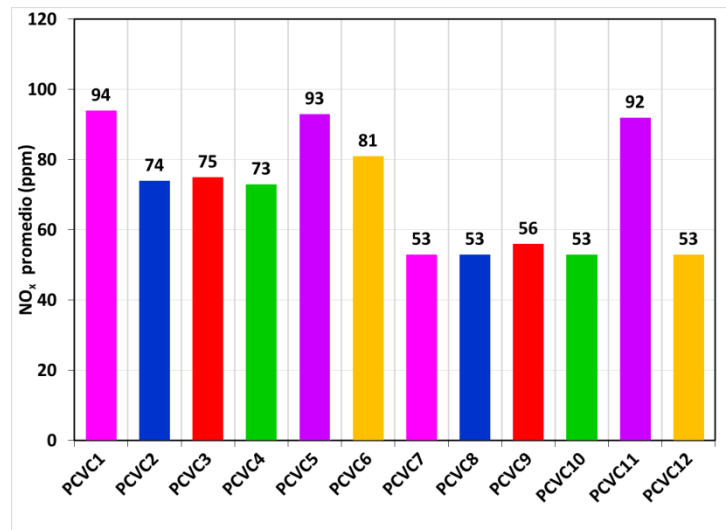


Figura 4.57 - Valores promedios de NO_x en condición de velocidad constante.

4.2.2. Índice de emisiones en condiciones a velocidad promedio constante

En la Tabla 4.4, se muestra los índices de emisiones calculados en gramos de emisiones por kilómetro recorrido en el circuito de condiciones de “velocidad constante”.

Los resultados obtenidos dan a mostrar que los índices de emisiones de CO₂, NO_x, O₂, CO y HC sufren una disminución de

De los tres valores de velocidad promedio (PCVC60, PCVC80 y PCVC100), al usar el E10 a mayor velocidad (PCVC100) dan a mostrar que los índices de emisiones de CO, NO_x, HC y CO₂ sufren una disminución de 27,43 %, 17,51 %, 6,51 % y 3,10 %, respectivamente, al aumentar el contenido de etanol en la mezcla. Sin embargo, para la menor velocidad PCVC60 se calculó un aumento de 78,90 %, 77,47 %, 51,23 %, 37,14 % y 8,34 % de los índices de emisiones de O₂ (11,46 g/km vs 6,41 g/km), CO₂ (204,25 g/km vs 115,09 g/km), CO (9,79 g/km vs 6,48 g/km), HC (142,45 mg/km vs 103,87 mg/km) y NO_x (58,36 mg/km vs 53,87 g/km) respectivamente, al incrementar el contenido de etanol.

De modo general, los resultados obtenidos a “velocidad constante” dan a mostrar que los índices de emisiones de NO_x se disminuyeron con E10 en promedio a 5,23 %. En cambio, los índices de emisiones de CO, HC, CO₂ y O₂ sufrieron un aumento de 8,47 %, 14,70 %, 31,29 %, y 53,28 % al incrementar en 2,2 % el etanol en el gasohol comercial (E7,8).

Tabla 4.4 - Índices de emisiones en circuito con condiciones a velocidad promedio constante.

COMBUSTIBLE	PRUEBA	ÍNDICE DE EMISIONES				
		NO _x (mg/km)	O ₂ (g/km)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	HC (mg/km)
E7,8	PCVC1	57,26	6,05	6,35	104,66	259,86
	PCVC2	50,48	6,77	6,60	125,52	233,16
	PROMEDIO	53,87	6,41	6,48	115,09	246,51
	PCVC3	37,58	14,99	5,14	81,31	75,30
	PCVC4	33,02	9,17	4,68	79,69	67,88
	PROMEDIO	35,30	12,08	4,91	80,50	71,59
	PCVC5	73,28	9,28	8,22	144,39	120,44
	PCVC6	57,04	10,22	7,37	134,23	111,93
	PROMEDIO	65,16	9,75	7,80	139,31	116,19
	PROMEDIO	51,44	9,41	6,39	111,63	144,76
E10	PCVC7	60,98	11,74	9,26	214,69	149,15
	PCVC8	55,75	11,19	10,32	193,82	135,76
	PROMEDIO	58,36	11,46	9,79	204,25	142,45
	PCVC9	27,84	16,00	3,99	80,04	67,08
	PCVC10	40,46	26,32	6,72	120,86	99,79
	PROMEDIO	34,15	21,16	5,36	100,45	83,44
	PCVC11	57,61	8,53	5,21	105,69	183,11
	PCVC12	49,89	12,78	6,11	164,31	207,06
	PROMEDIO	53,75	10,65	5,66	135,00	195,08
	PROMEDIO	48,75	14,43	6,94	146,57	140,32
AUMENTO (+)/ REDUCCION(-)	PCVC60	8,34%	78,90%	51,23%	77,47%	-42,21%
	PCVC80	-3,28%	75,22%	9,11%	24,79%	16,55%
	PCVC100	-17,51%	9,27%	-27,43%	-3,10%	67,90%
	TOTAL	-5,23%	53,28%	8,47%	31,29%	-3,07%

4.3. Resumen y comparación de los dos circuitos de la campaña experimental

La Tabla 4.5, presenta el resumen y comparación de los resultados de las pruebas realizadas en los dos circuitos definidos (con tráfico y a “velocidad constante”). Las velocidades promedios en las pruebas bajo condiciones de tráfico (PCT) fueron 15,4 km/h y 15,2 km/h con E7,8 y E10 respectivamente. Para las pruebas a “velocidad constante” se promedió los valores medios de los objetivos “60 km/h”, “80 km/h”, “100 km/h”. (Ver la Figura 4.30 y Figura 4.31) resultando en 74,7 km/h y 75,4 km/h para el E7,8 y E10, correspondientemente. Con estos resultados, se verificó que, indiferente

de la cantidad de etanol en la gasolina, los índices de emisiones y consumo de combustible se reducen considerablemente en condiciones a velocidades constantes. A velocidad constante, los contaminantes HC, CO y NO_x se redujeron en, promedio, 52,4 %, 54,5 % y 48,4 %, respectivamente, respecto a los índices de emisiones en condiciones de tráfico. Asimismo, el consumo de combustible, en km/L, se redujo al usar ambos combustibles (E7,8 y E10) en 112,4% en promedio.

Tabla 4.5 – Resumen y comparación de los valores promedios de los índices de emisiones y consumo de combustible en los dos circuitos (con tráfico y a “velocidad constante”) durante la campaña experimental.

COMBUSTIBLE	CIRCUITO	VELOCIDAD PROMEDIO (km/h)	ÍNDICE DE EMISIONES					CONSUMO DE COMBUSTIBLE (km/L)
			NO _x (mg/km)	O ₂ (mg/km)	CO (mg/km)	CO ₂ (mg/km)	HC (mg/km)	
E 7,8	PCT	15,4	102,61	19,40	15,00	277,74	232,44	8,51
	PCVC	74,7	51,44	9,41	6,39	111,63	97,22	29,27
	AUMENTO / REDUCCION	385,1 %	-49,9%	-51,5%	-57,4%	-59,8%	-58,2%	243,8%
E 10	PCT	15,2	91,71	18,56	14,35	273,80	208,70	8,48
	PCVC	75,4	48,75	14,43	6,94	146,57	111,50	25,99
	AUMENTO/ REDUCCION	396,1 %	-46,8%	-22,3%	-51,7%	-46,5%	-46,6%	206,6%

CONCLUSIONES

Todas las pruebas fueron realizadas en un periodo aproximado de dos semanas desde el 21/06/16 hasta 24/06/16, tratando de asemejar las condiciones de operación: hora de inicio, carga del vehículo (50 % de carga útil) y condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Estas pruebas fueron realizadas en dos circuitos representativos de Lima Metropolitana en un vehículo de la marca Hyundai, modelo Santa Fe, accionado por un motor de encendido por chispa. El motor funcionó con dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10. Según los resultados obtenidos en el capítulo 4 (Análisis de resultados) se concluye lo siguiente:

1. Se logró desarrollar una metodología experimental que permite evaluar, en condiciones reales de funcionamiento, el consumo promedio de combustible e índices de emisiones de los vehículos que circulan en Lima Metropolitana.
2. Se logró evaluar, estadísticamente, datos de emisiones y consumo de combustible, tomados a cada segundo, durante circuitos reales de conducción de vehículos livianos mediante un sistema de adquisición de datos.
3. Los ocho recorridos en el circuito bajo condiciones de tráfico desarrollaron un tiempo promedio similar (1 h 14 min) y distancia promedio similar (21 km) en donde no hubo una diferencia de intensidad de tráfico entre el turno mañana y turno tarde. En cambio, los doce recorridos en el circuito a “velocidad constante” se desarrollaron en tiempos y distancias diferentes, debido a las maniobras de conducción para intentar mantener las velocidades constantes (60 km/h, 80 km/h y 100 km/h) en las condiciones reales de tránsito.
4. El flujo de aire de admisión promedio aumentó, ligeramente, en 1,39 % para el circuito en condiciones de tráfico al incrementar el contenido de etanol. En cambio, para el circuito en a “velocidad constante”, el flujo de aire promedio aumentó, en 30,04 %. Esto se debe que para velocidades altas, la válvula de admisión de aire este mayor tiempo abierta por causa del tiempo más prolongado del pedal del acelerador en una determinada posición.
5. Análogo al resultado del aire, el factor lambda promedio disminuyó, levemente en 0,47 % para el circuito en condiciones de tráfico al incrementar el contenido de etanol. En cambio, para el circuito en condiciones a velocidad constante, el factor lambda promedio aumentó en 5,70 %. Esto reafirma que velocidades altas y más

constantes, las mezclas de aire-combustible se vuelven más pobres (exceso de aire).

6. El flujo de combustible promedio, en g/s, prácticamente no fue alterado, para el circuito en condiciones de tráfico al aumentar el contenido de etanol al gasohol. En cambio, para el circuito en condiciones a “velocidad constante”, el flujo de combustible promedio aumentó en 28,55 %. Por ello, en estas condiciones, existe la influencia del menor poder calorífico del etanol en la composición de E10.
7. Se calculó el consumo de combustible, en km/L, del vehículo liviano funcionando con dos mezclas gasolina y etanol: E7,8 y E10. Este consumo de combustible tampoco tuvo una variación en condiciones de tráfico al usar E10 por E7,8 (10,84 km/L vs 10,55 km/L respectivamente). En cambio, en condiciones de “velocidad constante”, ocurrió un aumento del consumo de combustible en 19,11 % al aumentar el contenido de etanol en la mezcla de gasohol.
8. Se calculó los índices de emisiones, en g/km, del vehículo liviano funcionando con dos mezclas gasolina y etanol: E7,8 y E10. La mayoría de los índices de emisiones presentan una ligera mejor reducción con E10 bajo condiciones de tráfico. ya que con E10 se obtuvo un índice de emisión de 91,71 mg/km de NO_x, 208,70 mg/km de HC, 14,24 g/km de CO y 273,80 g/km de CO₂, mientras que utilizando E7,8 el vehículo emitió 102,61 mg/km de NO_x, 232,44 mg/km de HC, 15,00 g/km de CO y 277,74 de CO₂.
9. Se concluye que el consumo de combustible y todos los índices de emisiones disminuyeron, significativamente, más de 110 % y 36 % respectivamente, indiferente del tipo de combustible E7,8 o E10, en condiciones a “velocidad promedio constante” respecto a las condiciones de tráfico.

Finalmente, se concluye que desde los puntos de vista económicos y ambientales es viable del uso del E10 para las condiciones de manejo en el centro urbano de Lima Metropolitana. Respecto a la viabilidad técnica, según *WORLD FUEL CHARTER COMMITTEE*, recomienda el uso del E10 en cualquier tecnología vehicular sin la necesidad de algunas modificaciones. Asimismo, se destaca la disponibilidad local del bioetanol, cuya producción nominal superan lo demanda.

RECOMENDACIONES

Para posteriores estudios acerca de la comparación de uso de la mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10, se presenta las siguientes recomendaciones:

- Se podría realizar pruebas con un mismo vehículo comparando como afecta el consumo e índice de emisiones utilizando diferentes conductores.
- Se podría realizar más estudios de los efectos de la mezcla E10 sobre el E7,8 variando la altitud desde costa hasta sierra.
- Se recomienda comparar las diferentes tecnologías de vehicular como la antigüedad, modelo y si son con sistemas de inyección electrónica o carburados.
- Se recomienda desarrollar pruebas experimentales a diversas épocas del año para analizar los efectos del etanol variando las condiciones ambientales como las variables de humedad relativa y temperatura
- Se recomienda realizar pruebas para analizar los efectos de variación de cargas adicionales al vehículo como utilizar el aire acondicionado y cambiar la carga útil del vehículo.
- Se sugiere analizar los efectos de los arranques en frío y en caliente del motor utilizando la mezcla E10 en comparación a la mezcla E7,8.

BIBLIOGRAFÍA

- AVL**
2001 Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. Austria.
- BOSCH**
2015 Hot-film air-mass meter, Type HFM 5 (hoja técnica).
- CARRASCO MARCO**
2001 Efectos Ambientales del Uso del Metil Terc Butil Eter (MTBE) como Oxigenante en la Formulación de Gasolinas. Carabobo: Universidad de Carabobo
- CIFP SOMESO**
2015 Análisis de gases. Xunta Galicia.
<http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/ANALISIS+DE+GASES.pdf>
- EKG ONZ Regulamin nr 83**
2012 Jednolite przepisy dotyczace homologacji pojazdów w zakresie emisji zanieczyszczen w zaleznosci od paliwa zasilajacego silnik. Dz. U. UE L42, Tom 55, 15 lutego 2012.
- EPA**
2005 United States Enviroment Protection Agency. Viernes 8 de Enero del 2016. Agency.www.epa.gov/iris/subst/index.htm
- G. P. DINGA**
1968 The elements and derivation of their names and symbols. American Chemical Society
- GIACOSA DANTE**
1964 Motores endotérmicos. Editorial: Hoepli
- GROVE**
2015- Especificaciones técnicas de GPS.
http://www.seeedstudio.com/wiki/Grove_-_GPS#Specification
- HERNANDEZ MARCEL**
2014 Fuel economy and emissions of light – duty vehicles fueled with etanol-gasoline blends in a Mexican City. Monterrey: Tecnológico de Monterrey, Departamento de Ingeniería Química.
- HEYWOOD J. B.**
1988 Internal Combustion Engine Fundamentals. Mc Graw-Hill, Inc.
- HUNICZ J.**
2014 An experimental study of negative valve overlap injection effects and their impact on combustion in a gasoline HCCI engine. FUEL, Part A; (117):236-250.
- INDUSTRIAS MONFEL, S**
2005 Datos de Seguridad: Alcohol Etílico. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- INFRARED INDUSTRIES**
2015 User´s Manual FGA 4500 XDS. Hayward.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)**
2015 Parque automotor en circulación a nivel nacional.
<http://series.inei.gob.pe:8080/sirtod-series/>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)**
2015 Producción anual del etanol.
<http://series.inei.gob.pe:8080/sirtod-series/>

JOSEPH H

- 2007 Sustainable Biofuels: Prospects and challenges. The Royal Society. Jueves 4 de Febrero del 2016.
https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7980.pdf

KITTELSON DAVID

- 2007 Demonstration and driveability project to determine the feasibility of using E20 as a motor fuel. Minnesota: University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering.

KURANC ANDRZEJ

- 2015 Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter. Lublin: University of Life Sciences.

LOZA JAVIER Y FREIRE DIEGO

- 2013 Comportamiento de un motor a gasolina utilizando alcohol anhidro como combustible de aporte. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.

MAHA

- 1999 Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG. Technical Handbook Motor Gas Tester MGT 5 Five-Gas Tester.

MARIA NEIRA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE SALUD (OMS)

- 2014 OMS: Lima tiene el aire más contaminado de América Latina. Perú 21. Miércoles 14 de junio del 2015.
<http://peru21.pe/actualidad/oms-lima-tiene-aire-mas-contaminado-america-latina-2182172>

MELLO, D

- 2006 Impactos del alcohol carburante, experiencia brasilera. Seminario Internacional en Biocombustibles y Combustibles Alternos. Bogotá, Colombia

MENCHACA TORRE, HILDA LIZETTE

- 2013 Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo de una ciudad mexicana. Monterrey: Tecnológico de Monterrey, Departamento de Ingeniería Química.

MINISTERIO DE AMBIENTE

- 2012 Parque automotor ocasiona el 70% de la contaminación en el Perú. Comercio. Ciencias. Miércoles 14 de junio del 2015.
<http://elcomercio.pe/ciencias/planeta/parque-automotor-ocasiona-70-contaminacion-peru-noticia-1388897>

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES

- 2012 Modificación del Decreto Supremo N° 047-2011-MTC. Lima, 18 de diciembre.

MONTOYA, C

- 2006 Fundamentos y Situación Actual del Uso de Etanol Anhidro Como Oxigenante de Gasolinas en Costa Rica. San José, Costa Rica.

NICHOLS, R

- 2003 The Methanol and Ethanol History: A sustainable Fuel for the future. Methanol Institute

PAIVI AAKKO-SAKSA

- 2011 Biogasoline Options – Possibilities for Achieving High Bio-share and Compatibility with Conventional Cars. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

PEMEX

2004 Auditoría de Seguridad Industrial y protección ambiental, Gasolina Pemex Magna

PEREZ, O

2007 Etanol como Combustible Automotor del Parque Venezolano. Colegio de Ingenieros de Venezuela.

SIMPSON ESPINOZA EDWIN ALLAN

2010 Adquisición de bienes consistentes en etanol anhidro para oxigenar gasolinas en la zona metropolitana de Guadalajara, bajo la modalidad de contrato abierto sujeto a ajuste de precios para los años 2011-2015. Guadalajara, Jalisco.

REFINERÍA LA PAMPILLA S.A.A.

2006 Ficha de datos de seguridad de GASOHOL 95 PLUS. Repsol.

SAE

2010 Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles. Surface vehicle recommended practice.

SETAME

2011 ¿Cómo vamos en la movilidad y transporte?. Miércoles 15 Julio de 2016
<http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2012/09/InformeLimaComoVamos2011-13MovilidadyTransporte.pdf>

TIPIAN TIPIAN GIANCARLO

2015 Análisis experimental del uso de mezclas etanol-gasolina en motores de encendido por chispa. Tesis para optar título de ingeniero mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

2014 Estudio de tecnologías disponibles para incentivar el uso del gas combustible en el sector transporte.

UNIVERSIDAD TECNOLOGIA DE PEREIRA

2010 Estudio del comportamiento de vehículos de carburador e Inyección con mezclas de gasolina y etanol (E0, E10, E12 y E15).

VERTIN KEITH

2005 Comparative emissions testing of vehicles aged on E0, E15 and E20 fuels. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

WEI-DONG Hsieh

2001 Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. Tainan: National Cheng-Kung University, Department of Mechanical Engineering.

WORLD FUEL CHARTER COMMITTEE

2009 Ethanol Guidelines

TORRES JAIME

2002 Estudio de la Mezcla de Gasolina con 10% de Etanol Anhidro. Evaluación de Propiedades Físicoquímicas. Bucaramanga: Ecopetrol Instituto Colombiano de Petróleo.