

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y
EMISIONES DE DOS VEHÍCULOS LIVIANOS FUNCIONANDO
CON DOS MEZCLAS DE GASOLINA Y ETANOL (E7,8 Y E10)
BAJO CONDICIONES DE MANEJO EN CUSCO Y LIMA
METROPOLITANA**

Tesis para optar el Título de INGENIERO MECÁNICO, que presenta el bachiller:

SOLIN EPIFANIO PUMA CORBACHO

ASESOR: Dr. Julio Cesar Cuisano Egúsquiza

Lima, mayo de 2016

Resumen

El presente trabajo de tesis realiza un análisis de la evaluación del consumo de combustible y emisiones de dos vehículos livianos, marca Kia Rio y motor de encendido por chispa, funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7,8 y E10). Uno de los vehículos transitó en Lima Metropolitana, mientras que el otro en la ciudad del Cusco.

Ambos vehículos fueron instrumentados adecuadamente, para obtener un registro de las emisiones y trayectoria del circuito de conducción. Además, se obtuvo el valor promedio del consumo de combustible. Las pruebas fueron realizadas en diferentes días y horas. Con los resultados obtenidos durante los ensayos, tanto en Lima Metropolitana y Cusco, se puede inferir que el consumo de combustible aumenta de acuerdo al tráfico de la ciudad (+15%) y la altitud de la zona (+17,8%). Del mismo modo, mientras más se aumente el contenido de etanol a la mezcla, el consumo de combustible sufre un ligero incremento de 18%; ya que el etanol, a diferencia de la gasolina, posee un poder calorífico inferior; en tal sentido, el motor necesitará un mayor consumo de combustible para desarrollar la misma potencia.

Con respecto a las emisiones gaseosas expulsadas por el vehículo, se observa un aumento de CO (+60%) y HC (+80%) debido a las condiciones de tráfico y un mayor consumo de combustible. Por otro lado, el incremento de etanol en la mezcla de combustible influyó que las emisiones de CO presentaran un descenso; caso contrario sucedió que las emisiones de NO_x se incrementaran ligeramente. De igual forma, el efecto de altitud provocó menores emisiones de CO, NO_x y HC en gramos por kilómetro, ya que en Cusco el porcentaje de oxígeno disminuye a 67% en volumen de aire a causa de la presión atmosférica que cae a 67,2 atm. Finalmente, las emisiones de CO₂ no sufrieron mucha influencia por el aumento de etanol, ni por efecto de la altura.



Dedicatoria

A mis padres, Epifanio e Isabel, como retribución a todo su esfuerzo y apoyo incondicional en todo momento.

A mi hermana Melissa por el cariño que me tiene.

Agradecimientos

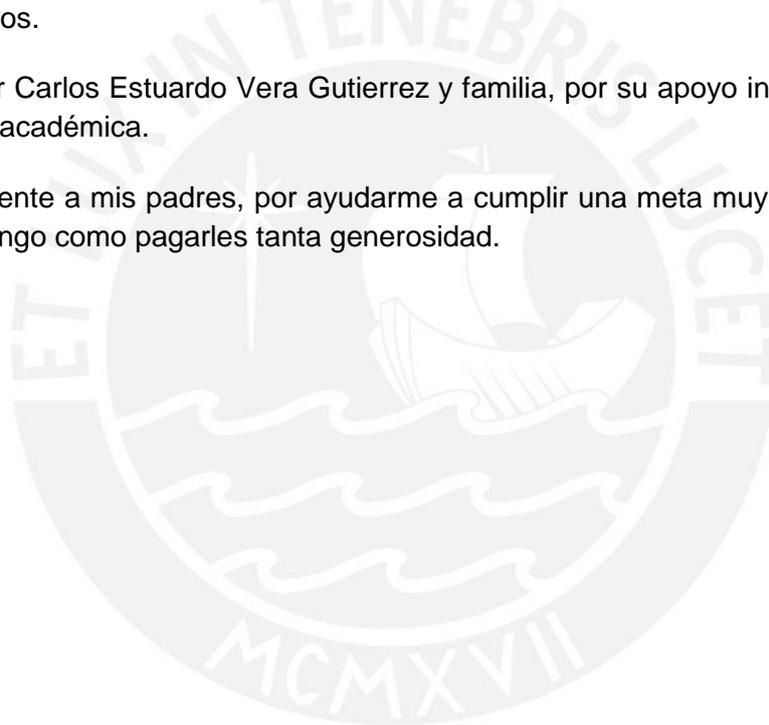
Primeramente a Dios, porque a pesar del momento difícil, donde crees que no existe solución, él te muestra una luz, te da su mano para que camines con él; no te abandona en ningún momento.

A mi asesor de tesis, el Dr. Julio César Cuisano Egúsqüiza, más que un asesor, un amigo, por haber dedicado gran parte de su tiempo en apoyarme, no solo en lo académico sino también en lo personal.

A mis familiares y amigos, ya que gracias a su ayuda durante todo el transcurso de mi carrera universitaria, me han apoyado de alguna u otra manera para poder cumplir con mis objetivos.

Al profesor Carlos Estuardo Vera Gutierrez y familia, por su apoyo incondicional en mi formación académica.

Especialmente a mis padres, por ayudarme a cumplir una meta muy importante en mi vida, no tengo como pagarles tanta generosidad.



ÍNDICE

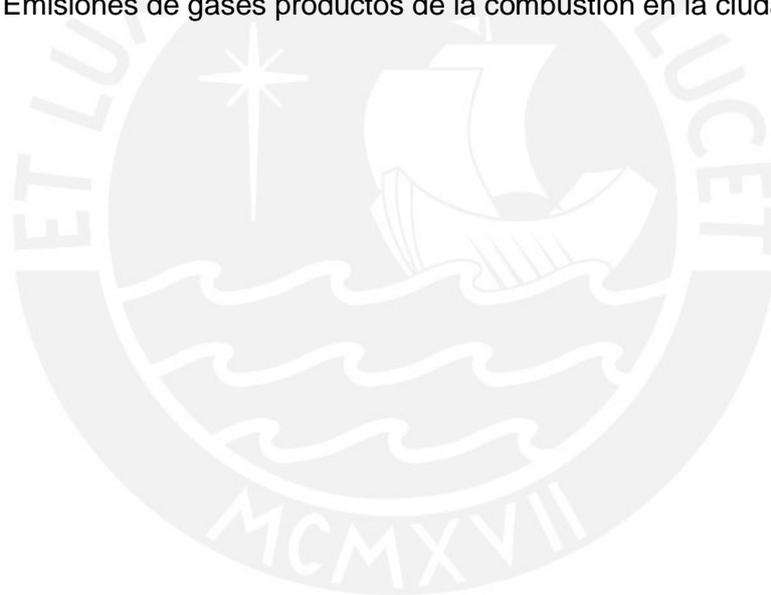
I. Contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
Lista de Símbolos.....	x
I. Introducción	1
I.1 Hipótesis.....	4
I.2 Definición del problema y propuesta solución	4
I.3 Justificación	4
II. Objetivos.....	5
II.1 Objetivo general.....	5
II.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO 1	6
1.1. Gasolina.....	6
1.1.1. Definición	6
1.1.2. Composición de la gasolina	6
1.1.3. Clasificación de la gasolina	7
1.2. Etanol.....	8
1.2.1. Definición	8
1.2.2. Materia prima	9
1.3. Proceso.....	10
1.4. Propiedades de los combustibles.....	11
1.5. Motor encendido por chispa.....	12
1.5.1. Definición.....	12
1.5.2. Catalizador.....	15
1.6. Gases fundamentales	16
1.6.1. Óxidos de nitrógeno	17
1.6.2. Hidrocarburos no quemados	18
1.6.3. Monóxido de Carbono.....	19
1.6.4. Dióxido de carbono	20

1.6.5. Oxígeno	21
CAPÍTULO 2	23
CAPÍTULO 3	41
3.1. Definición del circuito.	41
3.1.1. Circuito de Pruebas en Cusco.....	43
3.1.2. Circuito de Pruebas en Lima	45
3.2. Preparación de las mezclas de etanol y gasolina.	47
3.3. Vehículos de prueba y experimentación.....	49
3.4. Expresiones para cálculo de parámetros	57
CAPÍTULO 4	62
4.1. Resultado de la campaña de pruebas en Lima Metropolitana.	64
4.2. Resultados de la campaña de prueba en el área metropolitana de Cusco.	72
4.3. Comparación entre los resultados obtenidos en Lima Metropolitana y Cusco.	81
4.4. Análisis comparativo del consumo promedio de combustible.....	82
Conclusiones.....	85
Recomendaciones.....	87
Bibliografía	88
ANEXOS	1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. 1. Límites máximos permitidos [3].	2
Tabla 1.1. Propiedades de la gasolina y etanol [12]	12
Tabla 2.1. Comparación del consumo de combustible al utilizar E05R, E05P, E15R y E15P	26
Tabla 3.1. Ficha técnica del Sistema de Posicionamiento Global, GPS [15].....	42
Tabla 3. 2. Combustibles en el ensayo.....	48
Tabla 3.3. Ficha técnica del vehículo Kia Rio.	50
Tabla 3.4. Características del analizador de gases portátil [15]......	52
Tabla 3.5. Rango de medición para los diversos sensores del analizador de gases [15]......	53
Tabla 3.6. Rango de medición del OBDlin MX.....	55
Tabla 4.1. Cronograma y datos meteorológicos de la campaña en Lima.....	63
Tabla 4.2. Cronograma y datos meteorológicos de la campaña en Cusco.	63
Tabla 4.3. Emisiones de gases productos de la combustión en la ciudad de Lima.....	83
Tabla 4.4. Emisiones de gases productos de la combustión en la ciudad de Cusco....	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Refinación de petróleo [7].....	8
Figura 1.2 - Vías tecnológicas para la producción de bioetanol [9].....	10
Figura 1.3 - Ciclo del motor MECH [13].....	14
Figura 1.4 - Diagrama de ciclo del motor [14].....	14
Figura 1.5 - Diagrama de oxidación catalítica [15].....	16
Figura 1.6 - Relación entre NO _x y lambda [15].....	18
Figura 1.7 - Relación entre HC y lambda [15].....	19
Figura 1.8 - Relación entre CO y lambda [15].....	20
Figura 1.9 - Relación entre CO ₂ y lambda [15].	21
Figura 1.10 - Relación oxígeno residual y lambda [15].....	21
Figura 1.11 - Relación lambda y gases en el tubo de escape [15].....	22
Figura 2.1 - Comparación de las emisiones de HC, NO _x , CO y CO ₂ durante el arranque en frío (figura superior) y en arranque en caliente (figura inferior) [16].	24
Figura 2.2 - Circuito de conducción seguida en la ciudad de Monterrey [17].	25
Figura 2.3 - Composición química de los gases de escape durante el arranque en frío utilizando E0 (premium), E05P y E15P [18].....	27
Figura 2.4 - Emisiones de CO, THC y NO _x del motor con carburado [19].....	28
Figura 2.5 - Emisiones de CO, THC y NO _x del motor con sistema de inyección electrónico [19].....	28
Figura 2.6 - Emisiones de hidrocarburos aromáticos en el motor carburado y motor de inyección electrónica [19].	29
Figura 2.7 - Emisiones de CO para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].....	30
Figura 2.8 - Emisiones de UHC para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].....	30
Figura 2.9 - Emisiones de NO _x para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].....	31
Figura 2.10 - Emisiones de CO ₂ para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].....	31
Figura 2.11 - Emisiones de CO ₂ para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 7:1 [20].....	32
Figura 2.12 - Emisiones de UHC para distintas concentraciones de etanol en la gasolina relación de compresión 7:1 [20].	32
Figura 2.13 - Torque vs tiempo de encendido y RPM [21].....	33
Figura 2.14 - Emisiones de CO ₂ vs tiempo de encendido y RPM [21].	34
Figura 2.15 - Emisiones de CO vs tiempo de encendido y RPM [21].....	34
Figura 2.16 - Emisiones de HC vs tiempo de encendido y RPM [21].....	35
Figura 2.17 - Emisiones de NO _x vs tiempo de encendido y RPM [21].....	35
Figura 2.18 - Superficie de respuesta empleada por Chen y colaboradores [22] para encontrar la mejor relación de porcentaje de etanol en función de la velocidad del vehículo y el parámetro definido como “deseabilidad” (basado en rendimiento y emisiones del motor).....	37

Figura 2.19 - Efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre el torque a diferentes relaciones de compresión [23].	38
Figura 2.20 - Efectos de la mezcla gasolina-etanol en el consumo específico de combustible [23].	38
Figura 2.21 - Los efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre el HC a diferentes relaciones de compresión [23].	39
Figura 2.22 - Los efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre las emisiones de NO _x a diferentes relaciones de compresión [23].	39
Figura 2.23 - Emisiones de acetaldehído a 2000 rpm (a) y 3000 rpm (b) para la mezcla gasolina-etanol [24].	40
Figura 4.1 - Mediciones de velocidades durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	65
Figura 4.2 - Valores promedio de las medidas de velocidad durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	65
Figura 4.3 - Mediciones del factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	66
Figura 4.4 - Valores promedios del factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	66
Figura 4.5 - Mediciones de HC durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	67
Figura 4.6 - Valores promedios de HC durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	67
Figura 4.7 - Mediciones de CO durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	68
Figura 4.8 - Valores promedios de CO durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	68
Figura 4.9 - Mediciones de NO _x durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	69
Figura 4.10 - Valores promedios de NO _x durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	69
Figura 4.11 - Mediciones de CO ₂ durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	70
Figura 4.12 - Valores promedios de CO ₂ durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	70
Figura 4.13 - Mediciones de O ₂ durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	71
Figura 4.14 - Valores medios de O ₂ y factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.	72
Figura 4.15 - Mediciones de velocidad durante las 8 campañas de prueba en Cusco.	73
Figura 4.16 - Valores promedios de la velocidad durante las 8 campañas de prueba en Cusco.	74
Figura 4.17 - Mediciones del factor lambda durante las 8 campañas de prueba en Cusco.	75
Figura 4.18 - Valores promedios del factor lambda durante las 8 campañas de prueba en Cusco.	75

Figura 4.19 - Mediciones de HC durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	76
Figura 4.20 - Valores promedios de HC durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	76
Figura 4.21 - Mediciones de CO durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	77
Figura 4.22 - Valores promedio de CO durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	77
Figura 4.23 - Mediciones de NO _x durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	78
Figura 4.24 - Valores promedio de NO _x durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	79
Figura 4.25 - Mediciones de CO ₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	80
Figura 4.26 - Valores promedios de CO ₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	80
Figura 4.27 - Mediciones de O ₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	81
Figura 4.28 - Valores medios de O ₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.....	81
Figura 4.29 - Consumo de combustible obtenidos durante las campañas realizadas en Lima metropolitana y Cusco.....	82



Lista de Símbolos

C	Carbono
CH ₂ O	Formaldehído
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO _{0%}	Porcentaje promedio de las emisiones de CO [%]
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2%}	Porcentaje promedio de CO ₂ [%]
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C _n H _{2n}	Hidrocarburos saturados de cadena cerrada
C _n H _{2n+2}	Hidrocarburos saturados de cadena abierta
C ₈ H ₁₈	Octano
D	Desplazamiento del motor en [litros]
d	Distancia recorrida durante la prueba [km]
ETBE	Etil-tert-butil.-ter
Eth	ETBE (etil-tert-butil-eter)
E0	Combustible contiene 0% de etanol y 100% de gasolina en volumen
E5	Combustible contiene 5% de etanol y 95% de gasolina en volumen
E7,8	Combustible contiene 7,8% de etanol y 92,2% de gasolina en volumen
E10	Combustible contiene 10% de etanol y 90% de gasolina en volumen
E12,5	Combustible contiene 12,5% de etanol y 87,5% de gasolina en volumen
E15	Combustible contiene 15% de etanol y 85% de gasolina en volumen

E17,5	Combustible contiene 17,5% de etanol y 82,5% de gasolina en volumen
E20	Combustible contiene 20% de etanol y 80% de gasolina en volumen
E30	Combustible contiene 30% de etanol y 70% de gasolina en volumen
E60	Combustible contiene 60% de etanol y 40% de gasolina en volumen
E85	Combustible contiene 85% de etanol y 15% de gasolina en volumen
E100	Combustible contiene 100% de etanol y 0% de gasolina en volumen
E	Emisiones del gas [g/s]
FFV	Vehículos flexibles
Fe	Dosado estequiométrico
H	Hidrógeno
HC	Hidrocarburos (ppm)
MTBE	Metil-ter-butil-eter
M_{CO}	Masa molecular de CO [g/mol]
M_{HC}	Masa molecular de HC [g/mol]
M_{NOx}	Masa molecular de NO _x [g/mol]
M_{CO_2}	Masa molecular de CO ₂ [g/mol]
M_{O_2}	Masa molecular de O ₂ [g/mol]
m_{comb}	Masa de combustible [kg]
m_{aire}	Masa de aire [kg]
\dot{m}_{aire}	Flujo de masa de aire [g/s]
\dot{m}_{comb}	Flujo de masa de combustible [g/s]
NO _x	Óxidos de nitrógeno [ppm]
NO _x %	Porcentaje promedio de NO _x [%]

n	Velocidad del motor (rpm)
O_2	Oxígeno
$P_{\text{ambiental}}$	Presión ambiental [atm]
PCI_{etanol}	Poder calorífico del etanol [kJ/kg]
PCI_{gasolina}	Poder calorífico de la gasolina [kJ/kg]
R	Constante universal de los gases [0.08206 atm-L/ mol-K]
T	Temperatura de los gases de combustión en el escape del vehículo [K]
$T_{\text{ambiental}}$	Temperatura en el tubo de escape [K]
T_0	Tiempo inicial [s]
T_f	Tiempo final [s]
v	Velocidad del vehículo (km/h)
Y_i	Fracción molar del compuesto i en los gases de combustión.
Suscritos a letras griegas	
λ	Factor lambda
i	Número de ciclos por vuelta [motor de 4 tiempos, $i=0,5$]

I. Introducción

La contaminación ambiental se ha convertido en uno de los más grandes problemas en los últimos años, debido principalmente a las emisiones contaminantes liberadas por las fuentes móviles.

En nuestro país, las emisiones de gases contaminantes provocadas por los vehículos de transporte se han ido incrementando durante los últimos años, constituyéndose en la principal fuente de contaminación ambiental de nuestros principales centros urbanos. La flota de vehículos está en constante crecimiento y, a la vez, en fase de envejecimiento. Según datos del Ministerio de Transporte [1], por ejemplo, solo en Lima Metropolitana circulan casi un millón y medio de vehículos y la flota tiene, en promedio, 15 años de antigüedad; además, la cantidad de vehículos ha crecido considerablemente (véase Figura 1).

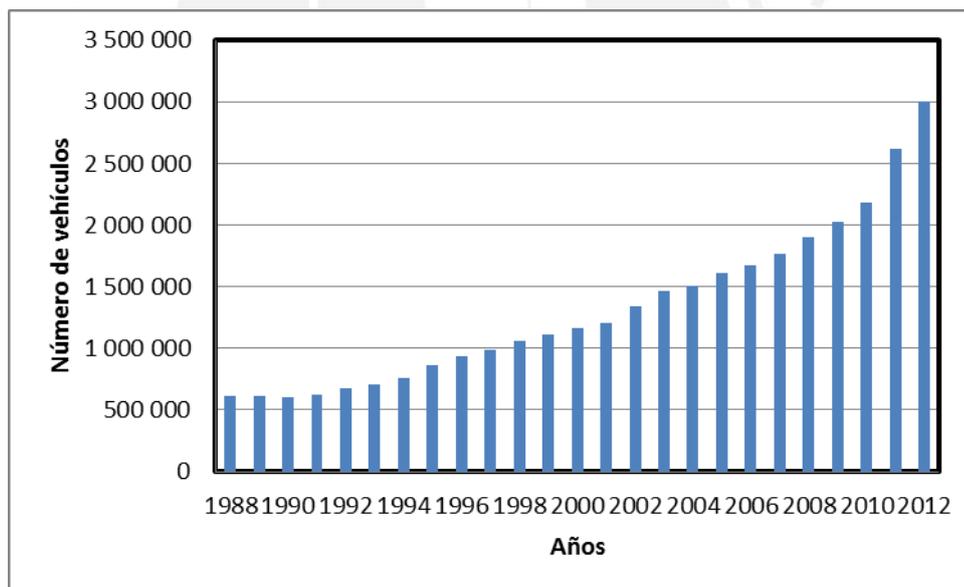


Figura 1. Cuadro del parque automotor nacional 1988-2012 [1].

Además de la antigüedad de la flota de vehículos livianos, la calidad de los hidrocarburos que se produce y/o comercializa en el país se constituye como una de las principales trabas al ingreso de vehículos modernos con sistemas de post-tratamiento de escape. La gasolina y el diesel comercializados en el territorio nacional poseen altos contenidos de azufre (llegando a valores de hasta 5000 ppm) lo cual inhibe la eficiencia de reducción del monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no

quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) por medio de catalizadores de 3 vías instalados en el sistema de escape [2] Actualmente, en el Perú, los límites permisibles para la contaminación generada por vehículos livianos es establecida por el Ministerio del Medio Ambiente que se ve en la Tabla 1.

Tabla I. 1. Límites máximos permitidos [3].

Año/ Modelo de vehículos	CO %	HC ppm	CO+CO₂ % mínimo
Hasta modelo 89	4.5 %	600 ppm	10 %
Modelo 90 al 2001	3 %	400 ppm	10 %
Modelo 2002 en adelante deberá cumplir con las normas XX ¹	0.5 %	100 ppm	12 %

Por otra parte, el Perú cuenta con diversos combustibles alternativos y/o renovables, destacando el gas natural y etanol.

En nuestro país, el uso de gas natural destinado al sector de transporte es principalmente utilizado en vehículos livianos impulsados por motores de encendido por chispa. Muchos de estos vehículos tienen, inclusive, la opción de trabajar en el modo dual, es decir, utilizando un sistema de inyección original (a gasolina) o empleando un sistema adaptado para el gas natural.

Por otra parte, la producción nacional de etanol atiende la demanda requerida. Este combustible es utilizado como aditivo para la mezcla de gasolina, donde sus aportes volumétricos son del 7,8 %, definiendo la mezcla que comercialmente se conoce como gasohol. En la actualidad, existen dos empresas dedicadas a la producción de etanol en la ciudad de Piura. En primer lugar, se encuentra Maple (actualmente Grupo Gloria) que es una importante productora de etanol con una inversión de 280 millones de dólares y una capacidad de producción de 130 millones de litros por año. Por otro lado, con una inversión de 210 millones de dólares, se encuentra Caña Brava, la cual cuenta con una capacidad de planta de 350 000 litros por día.

Respecto al uso de etanol en las mezclas con la gasolina, cabe citar aquí una referencia internacional: *World Wide Fuel Charter* (WWFC, 2009). Donde se afirma que los vehículos livianos no necesitan de ninguna modificación cuando utilizan hasta el 10% de etanol en la composición de la gasolina (E10) [4].

Estudios realizados recientemente en la PUCP muestran el potencial de reducción de CO y HC al usar un mayor porcentaje de etanol en la mezcla con gasolina (Tipian, 2015) [5]. Los estudios fueron realizados sobre un motor carburado instalado en banco de pruebas.

Sin embargo, es necesario cuantificar los efectos que podrían ocasionar el uso del E10 en condiciones reales de funcionamiento con vehículos de tecnología superior a la del motor carburado.



I.1 Hipótesis.

La mezcla E10 (90% de gasolina y 10% de etanol) reducirá las emisiones de CO y HC, sin alterar drásticamente el consumo de combustible en condiciones urbanas de manejo en la ciudad de Lima Metropolitana y en Cusco.

I.2 Definición del problema y propuesta solución

a) Problema.

No existe inventario sobre las emisiones y el consumo de combustible al emplear el etanol en la composición de la gasolina utilizada por el parque automotor urbano de Lima y Cusco. Por tanto, no es posible cuantificar sus efectos ambientales y económicos.

b) Propuesta solución.

Realizar estudios experimentales de campo utilizando un modelo de vehículo liviano representativo de la flota urbana, el cual utilizará dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10. Para ello se instalarán equipos *on-board* dentro del vehículo con la intención de registrar en tiempo real las emisiones, trayecto, velocidad y consumo de combustible en un ciclo urbano de Lima y Cusco.

I.3 Justificación

El etanol es una fuente de energía renovable producida en el país. El uso de un mayor porcentaje en la mezcla con la gasolina, además de reducir la importación del petróleo y/o derivados, provocaría una reducción de las emisiones contaminantes producidas por el parque automotor de Lima Metropolitana.

Los resultados del estudio permitirán cuantificar los diversos efectos relativos a la concentración de gases contaminantes y a la mayor o menor economía en el consumo de combustible del vehículo.

Además, con la experiencia por adquirirse, estudios similares podrían ser realizados en otros centros urbanos localizados en diferentes condiciones de altitud.

II. Objetivos

II.1 Objetivo general

Evaluar el consumo de combustible y los niveles de emisiones de dos vehículos livianos funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7,8 y E10) bajo condiciones de manejo en los centros urbanos de Cusco y Lima metropolitana.

II.2 Objetivos Específicos

- Definir una metodología experimental para mediciones, en tiempo real, de niveles de emisiones y parámetros de desempeño de dos vehículos livianos funcionando sobre circuitos de conducción urbana en las ciudades de Lima y Cusco.
- Obtener una aproximación de los parámetros del rendimiento promedio de dos vehículos livianos al utilizar dos mezclas gasolina-etanol: E7,8 y E10.
- Obtener una aproximación de los índices de emisiones, en g/km, de dos vehículos livianos consumiendo dos mezclas gasolina-etanol: E7,8 y E10.
- Cuantificar los efectos, sobre dos motores de aplicación automotriz, debido al uso de un mayor contenido de etanol en el gasohol comercial.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1. Gasolina

1.1.1. Definición

La gasolina es una mezcla compleja volátil e inflamable de hidrocarburos líquidos, donde el intervalo de ebullición varía desde 50 a 200 °C; además predominan las parafinas (hidrocarburos alifáticos) [6].

1.1.2. Composición de la gasolina

La gasolina es el primer corte o fracción obtenida por la destilación del petróleo crudo; esto es conformada por una mezcla de hidrocarburos comprendidos entre el butano C_4 y el decano C_{10} [6].

En una gasolina existen 5 tipos de compuestos que pueden estar presente: ciclo pentanos, ciclo hexanos, parafinas normales o ramificadas y benceno con sus derivados. Los hidrocarburos que conforman la gasolina en un motor son las parafinas, isoparafinas, naftenos y aromáticos. Las isoparafinas y los aromáticos aportan el mayor octanaje a la gasolina [6].

1.1.3. Clasificación de la gasolina

1.1.3.1. Gasolina primaria

Es la primera fracción que se obtiene al destilar el petróleo a presión atmosférica. Está compuesto por los hidrocarburos compuestos por el butano C_4 y decano C_{10} . No contiene moléculas complejas aromático-nafticos, ya que presentan un punto de ebullición superior al límite del punto de ebullición de la gasolina. Está compuesto por parafinas, naftenos y aromáticos en menor proporción (Ver Figura 1.1) [6].

1.1.3.2. Gasolina de cracking o refinado

Los procesos de cracking se basan en el fraccionamiento de las moléculas más grandes de los hidrocarburos, que constituyen fracciones menos volátiles, mediante temperatura y presiones relativamente elevadas, con catalizador o sin él [6].

1.1.3.3. Gasolina de reformación catalítica

Por este proceso de la reformación catalítica de la gasolina, se logra la deshidrogenación de naftenos¹, el hidrocraqueo de las parafinas² y la hidrogenación de olefinas³. El resultado obtenido es un hidrocarburo muy rico en aromáticos, lo cual significa que tiene un alto octanaje [6].

¹Naftenos: hidrocarburos saturados de cadena cerrada que no tienen doble, ni triple enlace con la fórmula general de C_nH_{2n} .

²Parafinas: hidrocarburos saturados de la cadena abierta que no tienen ni doble ni triple enlace de la cadena abierta, cuya fórmula general es C_nH_{2n+2} .

³Olefinas: hidrocarburos de la cadena abierta no saturada con presencia de doble enlace carbono-carbono, cuya fórmula general es C_nH_{2n} .

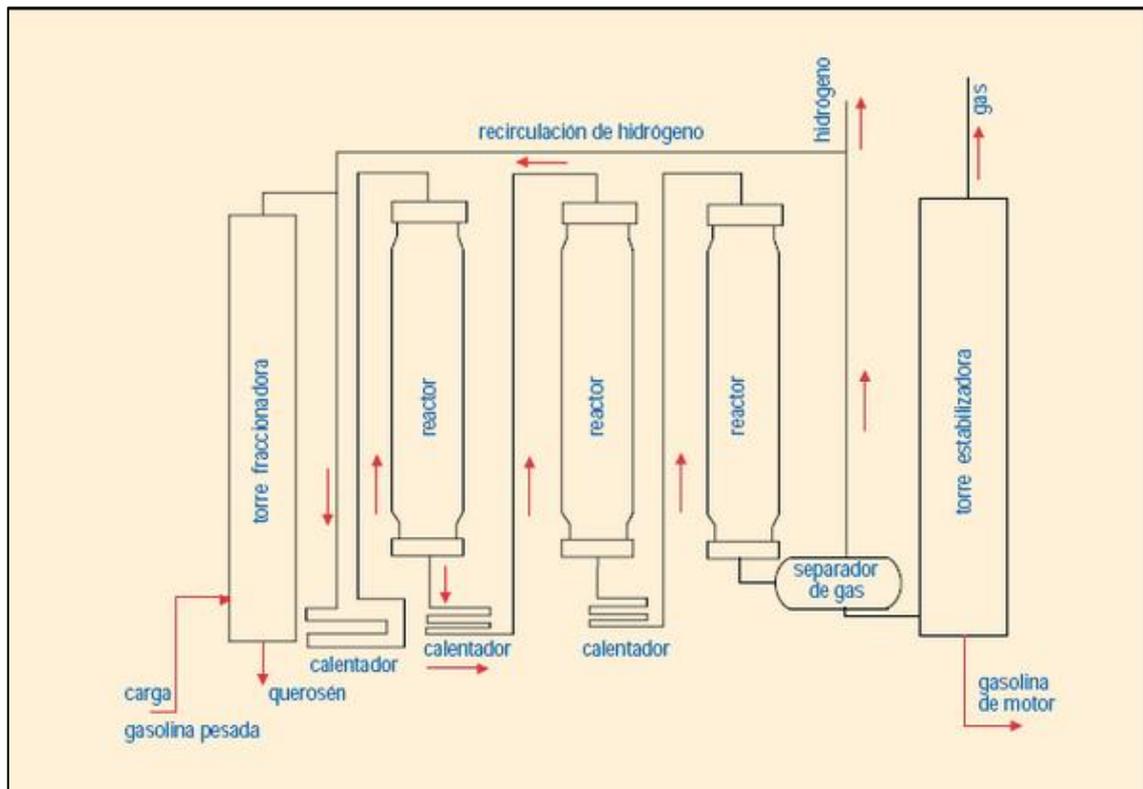


Figura 1.1 - Refinación de petróleo [7]

1.2. Etanol

1.2.1. Definición

El etanol (alcohol etílico) es un líquido incoloro de olor característico. En soluciones diluidas tiene un sabor dulce y en soluciones concentradas tiene un sabor fuerte. El etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) está formado por una cadena de dos carbonos y el grupo funcional hidroxilo (OH), que caracteriza a los compuestos orgánicos denominados alcoholes.

Se denomina etanol al alcohol que se produce del almidón de granos; al que se produce a partir de materiales como biomasa celulósica se le denomina bioetanol y al que se produce a partir de caña de azúcar se le conoce como alcohol de caña [8].

El etanol se divide de acuerdo al porcentaje de agua en su contenido y estos son etanol hidratado y etanol anhidrido. El primero corresponde al alcohol con una concentración baja pero importante de agua; por ejemplo, la obtención de etanol a partir de la destilación se obtiene típicamente una concentración de 96% de etanol y

4% de agua. Este alcohol se puede utilizar en los motores de combustión interna realizando algunas modificaciones y con rendimientos análogos que se obtienen utilizando gasolina. Por otro lado, el etanol anhidro se obtiene a través de métodos alternativos con concentraciones superiores al 99.9%. Este alcohol se puede utilizar en la mezcla con gasolina para aumentar el índice de octano y producir el gasohol [8].

El etanol también se puede usar para la síntesis del ETBE⁴, el cual es un sustituto del MTBE⁵, aditivo de las gasolinas que incrementa el número de octano; las ventajas del ETBE es que posee una menor volatilidad, menos solubilidad en agua, mejor eficiencia térmica en el MTBE. Además, tiene un índice de octano y un poder calorífico más elevado y evita problemas de toxicidad y corrosión asociados al uso del metanol [8].

1.2.2. Materia prima

La materia prima del etanol se puede obtener a partir de la sacarosa, almidón y celulosa [8].

1.2.2.1. Sacarosa

Se encuentra en la caña de azúcar, la melaza, el sorgo dulce, etc. La caña de azúcar es muy utilizada en la fabricación del etanol, ya que los azúcares se encuentran en una forma simple de carbohidratos fermentables (Ver Figura 1.2) [8].

Se estima que de una tonelada de melaza se produce 230 litros de alcohol. Por otro lado, de una tonelada de caña de azúcar se produce entre 30 y 40 kg de melaza que a su vez generaría entre 6,9 y 9,2 litros de alcohol [8].

1.2.2.2. Almidones

Se encuentran en cereales como maíz, trigo, cebada, etc., y en tubérculos como yuca, camote y papa. Los almidones contienen carbohidratos de mayor complejidad molecular que necesitan ser transformados en azúcares más simples mediante un proceso de conversión (sacarificación), introduciendo un paso adicional en la producción de etanol, con lo que se incrementan los costos de capital y de operación.

⁴ETBE: etil-ter-butyl-eter, usado como aditivo oxigenado en el petróleo para la producción de la gasolina.

⁵MTBE: metil-ter-butyl-eter, utilizado para el incremento del octanaje en la gasolina.

No obstante, existen algunos cultivos amiláceos como la yuca, que pueden ser desarrollados con una mínima cantidad de insumos y en tierras marginales donde generalmente no se desarrollan otras especies [8].

1.2.2.3. Celulosa

Se encuentra en la madera, residuos agrícolas y forestales. Las materias primas ricas en celulosa son las más abundantes, sin embargo la complejidad de sus azúcares hacen que la conversión a carbohidratos fermentables sea difícil y costosa. Es importante destacar que la producción mundial de celulosa asciende a 100 mil millones de toneladas por año, de los cuales, se estima que sólo es utilizado el 11% [8].

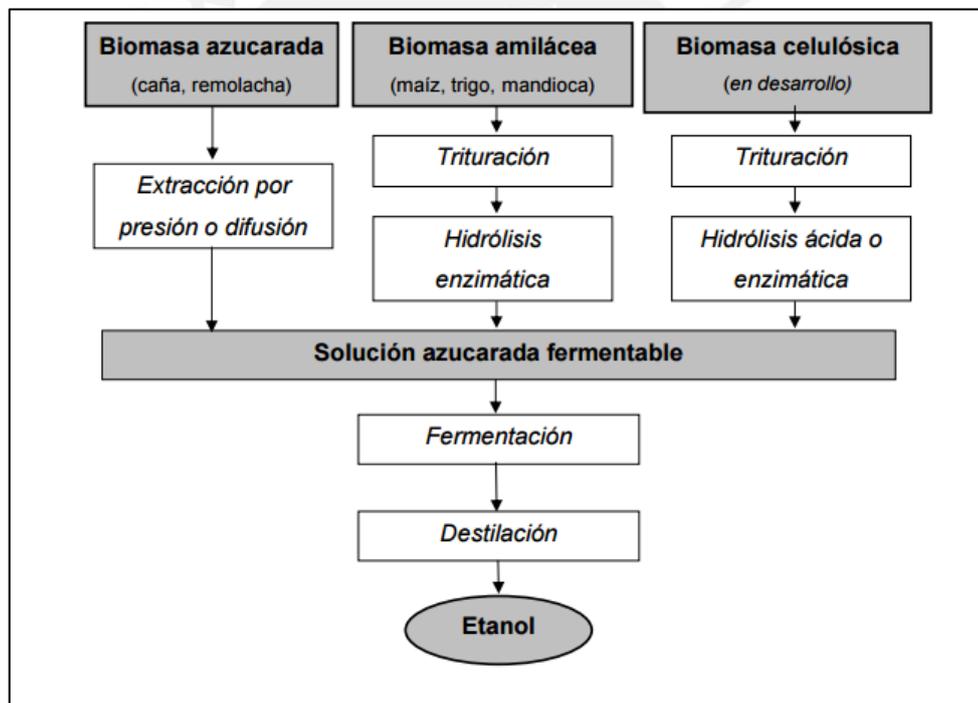


Figura 1.2 - Vías tecnológicas para la producción de bioetanol [9]

1.3. Proceso

Una vez obtenido el mosto azucarado y las levaduras en ausencia de oxígeno, se transforman la glucosa en etanol. Por cada 100 g de glucosa se obtienen 51,1 g de etanol y 48,9 g de CO₂. Como consecuencia de este proceso se obtiene un “vino” con

una concentración de etanol variable (del 10 al 15%). En este vino se encuentra, además de agua y etanol, numerosos compuestos orgánicos y restos de las células de las levaduras que, una vez alcanzado el límite de su tolerancia al etanol, mueren. La separación del etanol se realiza normalmente mediante un proceso de destilación que comprende dos fases: la primera, mediante arrastre con vapor de agua donde se obtiene etanol hidratado (4 a 5 % de agua) y la segunda fase consiste en retirar el agua del etanol, lo que se logra mediante un disolvente intermediario (normalmente benceno), que separa el etanol del agua. Luego se recupera dicho disolvente quedando ya el etanol deshidratado (con una pureza superior al 99,8 % en volumen). Actualmente, para producir 1 litro de etanol se requiere gastar 4,22 Mcal de combustible primario. Sin embargo, las nuevas plantas de producción de etanol incorporan sistemas de deshidratación avanzados (basados en tamices moleculares en lechos de zeolitas) con lo cual se podría reducir notablemente dicho consumo de energía [10].

1.4. Propiedades de los combustibles.

En el experimento a realizarse se va a utilizar como fuente de energía la mezcla de gasolina y etanol. Las propiedades de dichos combustibles son presentadas en la Tabla 1.1.

El etanol es un combustible que libera significativas cantidades de calor al quemarse. Sin embargo, este presenta pequeñas diferencias en comparación con la gasolina. La principal diferencia es el contenido de oxígeno, el cual representa el 35% del contenido de la masa del etanol. Las características del etanol posibilitan un mejor desempeño en el motor y generar una combustión más limpia cuando es mezclado con la gasolina [11].

Tabla 1.1. Propiedades de la gasolina y etanol [12]

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32.180	22.350
Densidade	kg/litro	0,72 – 0,78	0,792
Octanaje RON (<i>Research Octane Number</i>)	–	90 – 100	102 – 130
Octanaje MON (<i>Motor Octane Number</i>)	–	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330 – 400	842 – 930
Relación aire/combustible estequiométrica		14,5	9,0
Presión de vapor	kPa	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad en agua	% en volumen	~ 0	100

De la Tabla 1.1 se observa que el etanol posee un elevado calor latente de evaporización, lo cual significa que se necesita una mayor cantidad de calor para su evaporización. Esta energía será absorbida del aire admitido en el cilindro, lo cual ocasionará una menor eficiencia volumétrica del motor; y por ende, una ligera disminución del desempeño del motor.

Por otro lado, la temperatura de ebullición del etanol (78°C) es mayor que la de hidrocarburos livianos de la gasolina. Esta diferencia dificulta el funcionamiento del motor en condiciones de arranque en frío, debido a la mayor resistencia a la evaporización del etanol.

1.5. Motor encendido por chispa.

1.5.1. Definición.

El motor de encendido por chispa (MECH) es un motor de combustión interna, el cual se caracteriza por que el inicio de la combustión es debido al aporte de energía externa que es realizado a través de electrodos de la bujía.

En los motores de encendido por chispa convencionales, la formación de la mezcla aire-combustible se da en la admisión, el cual recibe el nombre de combustión premezclada homogénea. El proceso de formación de mezcla y el de combustión

están suficientemente separados en el tiempo, o en el ciclo del motor, para aceptar esta homogeneidad. Por otro lado, en los motores de encendido por chispa con inyección directa de combustible en determinadas condiciones de operación se provoca la estratificación de la carga. Adicionalmente y simultáneamente al proceso de combustión premezclada existen fenómenos de difusión másica que en cualquier caso no modifican esencialmente el concepto de combustión premezclada [2].

Para el caso de los MECH la combustión se divide en tres fases:

- Fase inicial con combustión laminar
- Fase principal con combustión turbulenta
- Fase terminal con combustión laminar

En la combustión premezclada laminar, la mezcla aire-combustible se encuentra bien en reposo o bien con una velocidad pequeña y, en todo caso, con un nivel de turbulencia bajo o nulo. Para estas condiciones un frente de llama se propaga hacia la mezcla fresca, a medida que su temperatura se difunde hacia esta, lo que provoca un aumento de la velocidad de reacción por efecto conjunto de una mayor temperatura y de la acción de radicales químicos producidos por la llama. Por otro lado, los valores de velocidad de combustión laminar (u_{CL}) para combustibles típicamente empleados en MECH (motor de combustión interna) están en el rango de 0,1-1 m/s; dependiendo del tipo de combustible, el dosado, la cantidad de inertes y condiciones termodinámicas. A su vez el espesor de orden de llama es de alrededor de 1mm [2].

En la combustión turbulenta, la velocidad de combustión premezclada turbulenta es cuantitativamente similar a la velocidad lineal media del pistón. Esta combustión turbulenta aumenta el frente de llama y la velocidad de combustión. Por un lado, en la combustión premezclada, el efecto de la turbulencia es la quiebra o dobles del frente de llama, lo que significa un incremento de la superficie del frente de llama.

Por otro lado, la velocidad de combustión turbulenta depende de la velocidad de combustión laminar de la turbulencia [2].

La mayoría de los motores de combustión interna utilizan el principio de émbolo reciprocante, mostrado en la Figura 1.3. Según lo mostrado, un émbolo se desliza dentro de un cilindro, hacia atrás y hacia delante transmitiendo fuerza a la flecha motriz, mediante un simple mecanismo de biela manivela. El ciclo de trabajo del motor

encendido por chispa puede ser de 4 o 2 tiempos. Para el ciclo de trabajo, de 4 tiempos, el ciclo termodinámico del MECH, también conocido como ciclo Otto se distribuye en 4 etapas: admisión, compresión, expansión y escape (véase Figura 1.4). Cuatro carreras, girando el cigüeñal 180 grados por cada una; es decir, 720 grados por ciclo.

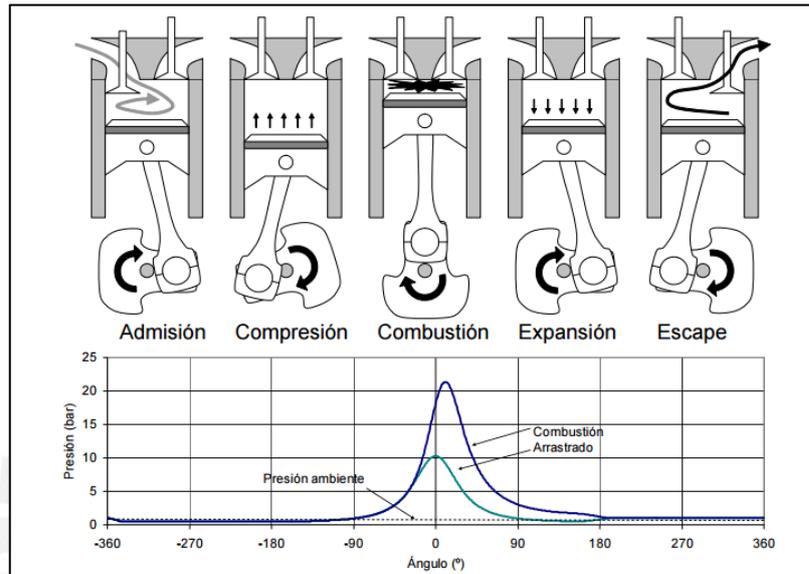


Figura 1. 3 - Ciclo del motor MECH [13]



Figura 1.4 - Diagrama de ciclo del motor [14]

- De $A \rightarrow B$: Proceso de admisión donde ocurre el ingreso de la mezcla aire-combustible al cilindro, la válvula de admisión se encuentra abierta.
- De $B \rightarrow C$: Proceso el cual se produce una compresión del volumen del cilindro pistón. En esta fase se comprime el fluido que está formado por aire tomado del exterior, el combustible inyectado en el múltiple de admisión y los gases residuales tomados del ciclo anterior. Durante la compresión las diferencias de temperatura y velocidad del fluido son muy elevadas, por lo que se puede considerar un proceso adiabático y reversible.
- De $C \rightarrow D$: Proceso de la combustión donde el motor genera energía en forma de trabajo. En el momento que el pistón está a punto de llegar al PMS (punto muerto superior) la bujía inicia una chispa que es el detonante de toda la combustión, para este escenario la mezcla aire-combustible llega a altas presiones y elevadas temperaturas, y de manera instantánea surge una elevada presión en el interior del cilindro. La combustión a alta presión ocasiona el descenso del pistón hacia el PMI, trasladando el movimiento hacia el cigüeñal por medio de una biela.
- $D \rightarrow E$: Proceso de expansión adiabática, el cual se suscita después de la combustión causando que el pistón desciende hacia el PMI (punto muerto inferior). Este proceso debido a las elevadas diferencias de temperaturas y velocidades del fluido se puede considerar mecánicamente reversible.
- $E \rightarrow A$: Proceso de escape que inicia antes de finalizar la expansión, lo cual provoca una menor presión. Este fenómeno es conocido como pérdida de escape expulsa entre 1 y 3 % del calor aportado producto de la combustión.

1.5.2. Catalizador

El primer intento de reducir los niveles de emisiones en los motores vehiculares fue tratar de alcanzar la relación de mezcla aire - combustible lo más estequiométrica posible. Es posible que motores diseñados para producir bajas emisiones de gases contaminantes y que operen adecuadamente no tengan los suficientes niveles de emisiones de HC y CO que cumplan con los estándares de aire limpio. Por esta razón, el catalizador **acelera**, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma [15].

Los catalizadores, en nuestro caso, deben ser utilizados para catalizar los gases contaminantes que salen por el tubo de escape del vehículo como CO, NO_x, HC y otras sustancias en menor proporción como benceno, aldehídos y partículas [15].

Los catalizadores utilizados en los automoviles contienen una combinacion de metales nobles como platinum, palladium y rhodium, los cuales son aplicados en pequeños granos a materiales cerámicos deflectados; estos materiales cerámicos, llamados también sustratos, proveen una gran área superficial que permite a los gases de escape entrar en contacto con los metales nobles del catalizador [15].

Durante la operación, los gases de escape son catalizados en proceso conocido como oxidación catalítica; en dicho proceso se aumenta O_2 a la estructura molecular de HC y CO produciendo la siguiente reacción: el CO es convertido en CO_2 , EL HC se transforma en H_2O y CO_2 ; la Figura 1.5 muestra la ecuación para dicho proceso. Por otro lado, la oxidación de algunos elementos requiere abundancia de O_2 ; por lo que los motores son equipados con un sistema de aire auxiliar, típicamente, llamado "Reaccion de inyección de aire" que es suministrada por un compresor o sistema de pulso de aire; esto sirve para inyectar aire adicional dentro catalizador, lo cual provee el oxígeno necesario para tomar lugar al proceso de oxidación [15].

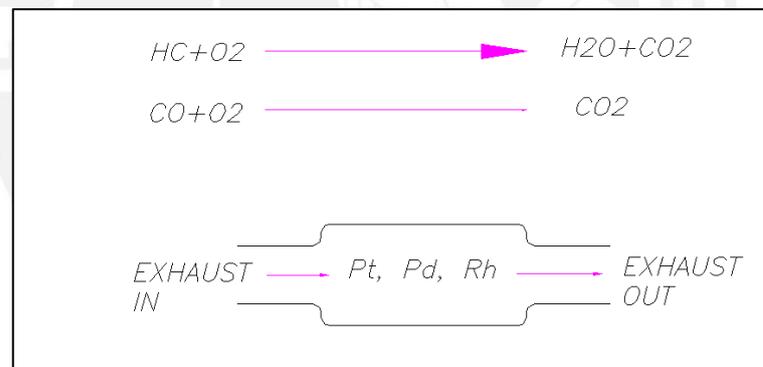


Figura 1.5 - Diagrama de oxidación catalítica [15].

1.6. Gases fundamentales

La relación ideal de aire-combustible en los motores de encendido por chispa (MECH) es 14,66:1. Esto es conocido gracias a la ecuación estequiométrica bajo una perfecta combustión de aire-combustible. De dicha reacción química, se obtiene dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y nitrógeno (N_2), los cuales son los productos más completos de la combustión. Por consiguiente, si nosotros medimos los gases de escape en un motor MECH y encontramos solamente CO_2 , H_2O y N_2 ; nosotros podemos asumir que el motor ha estado operando en niveles óptimos de una combustión ideal. Pero, como la combustión interna en motores no es del 100%

eficiente, otras especies son formadas en la cámara de combustión y expulsadas por el motor. Los productos de combustión producidas que se encuentran en el mundo real son los siguientes:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Hidrocarburos (HC)
- Oxígenos (O_2)

El monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos producidos en la combustión, y expulsados del motor por el tubo de escape, están relacionadas con problemas para la salud y medio ambiente [15].

1.6.1. Óxidos de nitrógeno

El nitrógeno ocupa cerca del 78 % del aire atmosférico terrestre; y por consiguiente, cerca del 78% del aire en la cámara de combustión es nitrógeno. Este gas inerte no contribuye o detrae a la combustión. Cuando el nitrógeno y oxígeno se combinan forman óxidos perjudiciales para la salud, tales como el nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). Esto es posible cuando ambos elementos gaseosos son calentados por encima de 1371 °C.

Bajo ciertas condiciones del motor, la temperatura de combustión dentro de la cámara puede exceder 1371 °C que combina oxígeno y nitrógeno, lo cual forma NO_x .

La Figura 1.6 muestra la concentración de NO_x en función al factor lambda. En dicha figura se observa que las emisiones más elevadas de NO_x están situadas para mezclas ligeramente pobres con factor lambda alrededor de 1,08. Por otro lado, las emisiones de NO_x no afectan el rendimiento del motor; en cambio, algunos dispositivos usados para prever la formación de éste pueden afectar el rendimiento y contribuir a altos niveles de HC y CO, en caso no sean controlados adecuadamente [15].

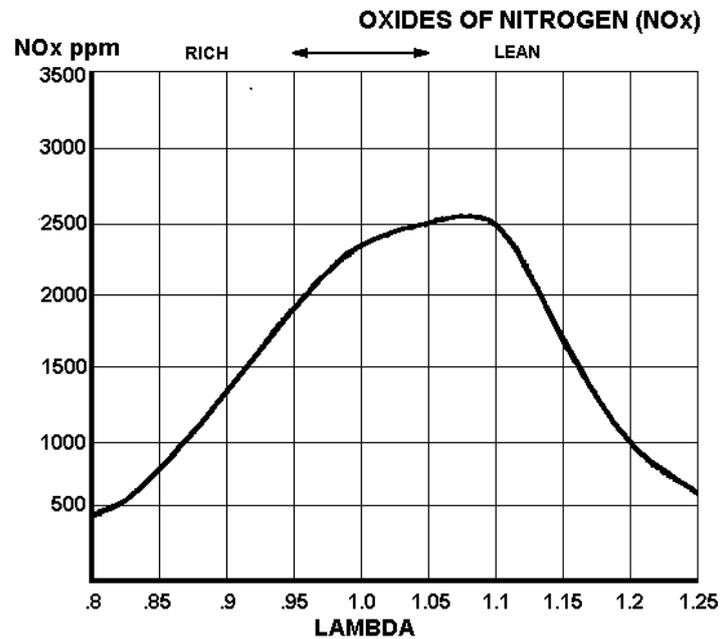


Figura 1.6 - Relación entre NO_x y lambda [15].

1.6.2. Hidrocarburos no quemados

Los hidrocarburos no quemados (HC) son componentes orgánicos formados por átomos de hidrógeno y carbono; dichos hidrocarburos no quemados son gases productos de una combustión incompleta en los motores MECH. Esto es debido a que la gasolina no es quemada completamente y, por tanto, expulsada en los gases de escape, lo cual se mide en partículas por millón (ppm). Los niveles de HC, debido a la combustión, varían de acuerdo a la relación aire-combustible. Esto se puede observar en la Figura 1.7, la cual muestra la relación de HC en función al factor lambda donde se observa que las emisiones de HC más bajas es para mezclas de aire-combustible ligeramente pobres (lambda de 1.05 a 1.15). Finalmente, los niveles de emisiones de HC del motor depende del diseño de éste; y la gasolina evaporada desde el carburador y el tanque de combustible son, también, fuentes de emisiones de HC.

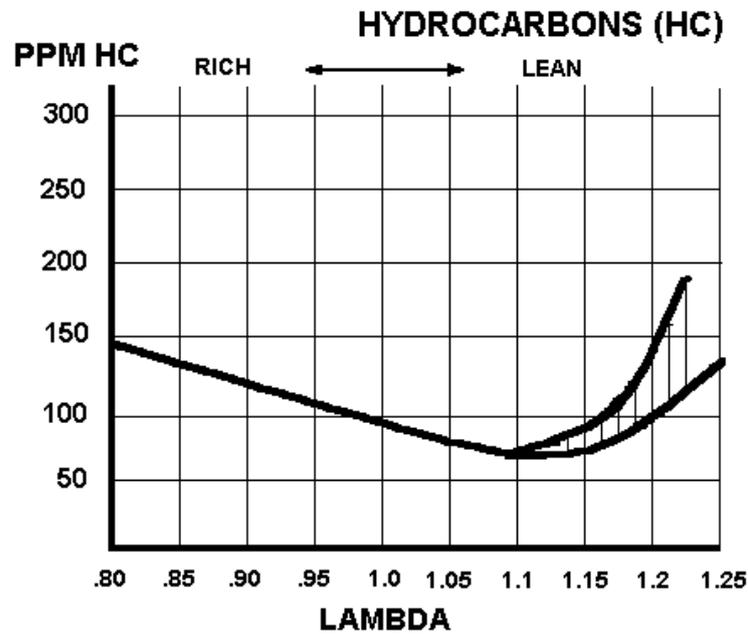


Figura 1.7 - Relación entre HC y lambda [15].

1.6.3. Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono (CO) es un producto formado cuando la combustión presenta un volumen con baja concentración de oxígeno (mezcla rica de combustible). Además, el carbono dentro de la cámara de combustión es suministrado por el combustible; mientras que el oxígeno proviene del aire inducido. La Figura 1.8 muestra que las emisiones de CO decrecen para un factor lambda cada vez más alto; en cambio, dichas emisiones se incrementa para un factor lambda cada vez más bajo. Por esta razón, CO es un buen indicador del uso de mezclas ricas, pero un mal indicador para mezclas pobres [15].

Estos hechos presentados en 1.6.3 y 1.6.4 hacen que el contenido de HC y CO sean buenos indicadores para el rendimiento del motor y eficiencia del catalizador.

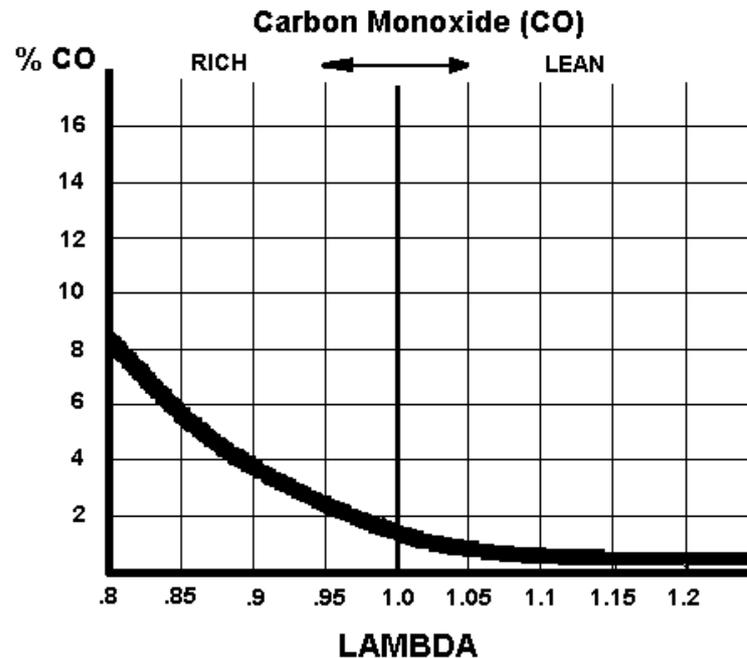


Figura 1.8 - Relación entre CO y lambda [15].

1.6.4. Dióxido de carbono

Dióxido de carbono (CO_2) es la combinación de un átomo de carbono y dos de oxígeno (oxígeno molecular) durante la combustión, y también, es producto de la oxidación de CO en el catalizador. A diferencia de las emisiones de CO, el CO_2 es inofensivo; es más, los mamíferos expulsamos CO_2 al ambiente debido a la respiración. El CO_2 es un buen indicador de la eficiencia de combustión porque su volumen obtenido es un indicativo de una mezcla estequiométrica [15].

En la Figura 1.9, se observa que el porcentaje de CO_2 varía de acuerdo la mezcla aire-combustible alcanzando su valor máximo para una mezcla estequiométrica y disminuyendo su concentración cuando la mezcla es rica o pobre de acuerdo al factor lambda.

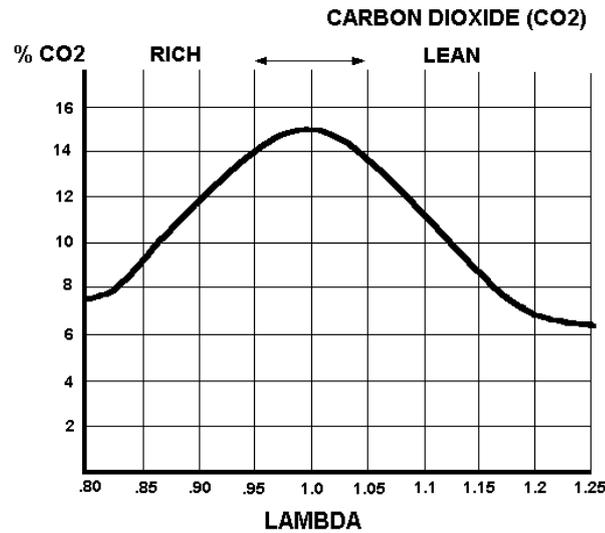


Figura 1.9 - Relación entre CO₂ y lambda [15].

1.6.5. Oxígeno

El oxígeno (O₂) ocupa el 21% de la composición del aire en la atmósfera; por ende, la misma composición en el aire de la cámara de combustión. Los niveles de O₂ residuales, producto de los gases de escape, pueden ser un indicador que la mezcla aire-combustible es rica o pobre durante la combustión. Por otro lado, la Figura 1.10 muestra que el O₂ es bien bajo para mezclas ricas, ya que todo el oxígeno es consumido, mientras para mezclas pobres siempre queda residuo de oxígeno [15].

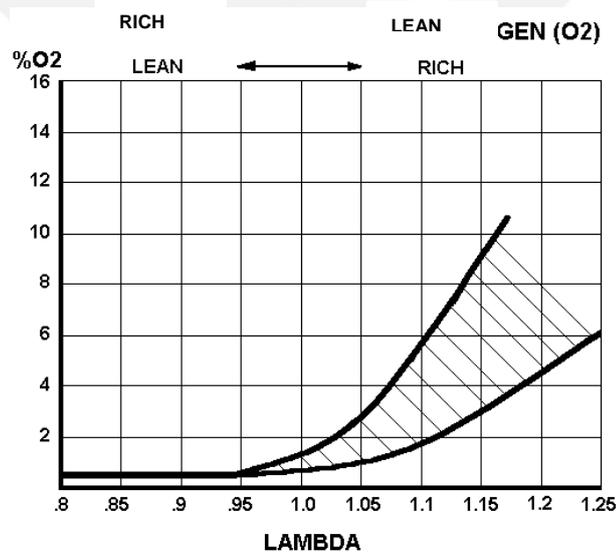


Figura 1.10 - Relación oxígeno residual y lambda [15].

La Figura 1.11 agrupa todos los resultados de la Figura 1.6 a 1.10. Aquí se muestra la relación que existe entre la mezcla aire-combustible y los gases del tubo de escape del vehículo. Además, se puede observar que los niveles de HC son bajos cuando la mezcla aire-combustibles tiende a ser ideal porque la mayor parte del combustible es consumido durante la combustión. Por un lado, una composición de mezcla pobre o rica puede ser ocasionada debido a problemas de inyección de combustible, lo que causa que el HC incremente debido a una combustión incompleta. Por otro lado, Los gases de CO_2 aumentan cuando la relación aire-combustible es ideal y decrece cuando son mezclas ricas o pobres. Finalmente, observamos que los niveles de CO son aproximadamente cero cuando la mezcla tiende a ser pobre ya que se produce una combustión mucho más completa, contrariamente a lo que ocurre con el O_2 , ya que se produce oxígeno residual [15].

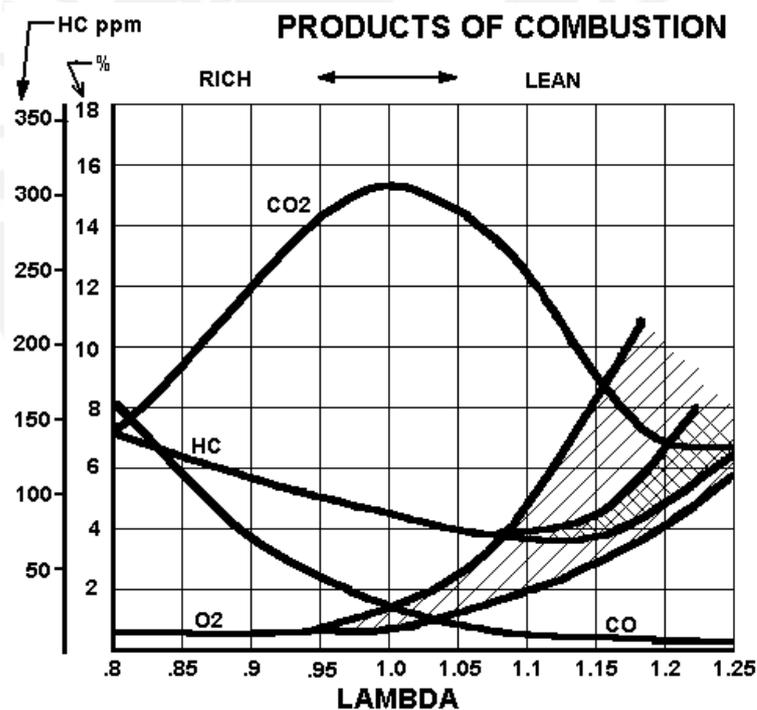


Figura 1.11 - Relación lambda y gases en el tubo de escape [15].

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, los motores de combustión interna han mejorado sus prestaciones gracias a las nuevas tecnologías desarrolladas. De igual forma, la calidad de los combustibles fue mejorada. Pese a ello, la contaminación ambiental debido al parque automotor se ha mantenido en continuo aumento debido al incremento de la flota vehicular, principalmente en los grandes centros urbanos.

Tanto el rendimiento de los vehículos como las emisiones gaseosas que estos producen son afectados por diversos factores. Por un lado, la conducción urbana en ciudad posee un conjunto de factores influyentes, debido a las paradas constantes por uso de semáforos, rompemuelleres y eventos inesperados; en cambio, en carretera se tiene una vía libre. Por otro lado, el estilo de manejo del conductor influye mucho en el rendimiento del vehículo, ya que si el conductor dirige de manera inadecuada podría gastarse hasta un 40% más de combustible. Además de existir otro tipo de variables como el tipo de pavimento, calidad del combustible y mantenimiento del vehículo.

Otro aspecto muy importante es el estudio de la contaminación atmosférica generada por los vehículos. La mayoría de las normas de emisiones vehiculares limitan los niveles de hidrocarburos no quemados (HC), óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Estas emisiones deben monitorearse en diversas condiciones de funcionamiento del vehículo, tales como: arranque en frío,

arranque en caliente y sobre condiciones controladas de laboratorio y condiciones reales de tránsito.

Según estudios, los arranques en frío producen una mayor contaminación que los arranques en caliente. Esto se debe a que el sistema de pos tratamiento de gases de escape (catalizador) necesita alcanzar una temperatura de operación entre 200 °C y 400 °C para reducir eficientemente los gases contaminantes; y eso, solamente, es posible después de un intervalo de tiempo luego del arranque en frío.

Menchaca y colaboradores [16] realizaron pruebas de arranque en frío y arranque en caliente en un vehículo liviano, marca Civic, modelo híbrido; ellos constataron que las emisiones de los gases como HC, NO_x, CO y CO₂ son mucho mayores durante el arranque en frío que en caliente (véase Figura 2.1).

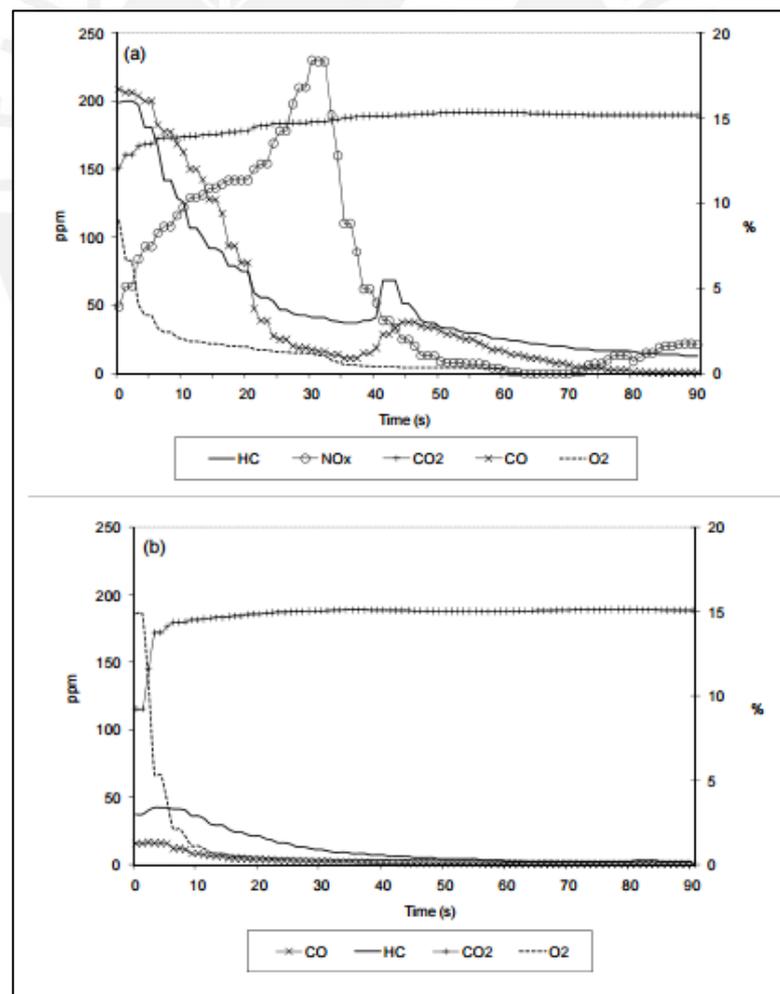


Figura 2.1 - Comparación de las emisiones de HC, NO_x, CO y CO₂ durante el arranque en frío (figura superior) y en arranque en caliente (figura inferior) [16].

Hernández, Menchaca y Mendoza [17] realizaron pruebas experimentales en tres distintos vehículos en México, ciudad de Monterrey (altitud media de 530 m.s.n.m.). Los vehículos del estudio fueron Nissan Tsuru, VW Derby y un Jeep Compas; además se utilizó 2 tipos de combustibles: gasolina regular (87 octanos, R) y gasolina Premium (92 octanos, P). Ambos combustibles fueron mezclados con etanol anhidro formando las mezclas E05R, E05P, E15R y E15P, los cuales contienen 5% y 15% de etanol en volumen respectivamente.

Las pruebas fueron realizadas en tres rutas de 1 kilómetro cada una en la ciudad de Monterrey, México (ver circuito en la Figura 2.2). Según el estudio, la mezcla gasolina-etanol disminuyó el desempeño del motor a medida que se pasó de 0 % a 15% de etanol en la mezcla con la gasolina. Además, el desempeño del motor con mezclas gasolina-etanol se ve más afectado a mayor antigüedad del vehículo (véase Tabla 2.1).

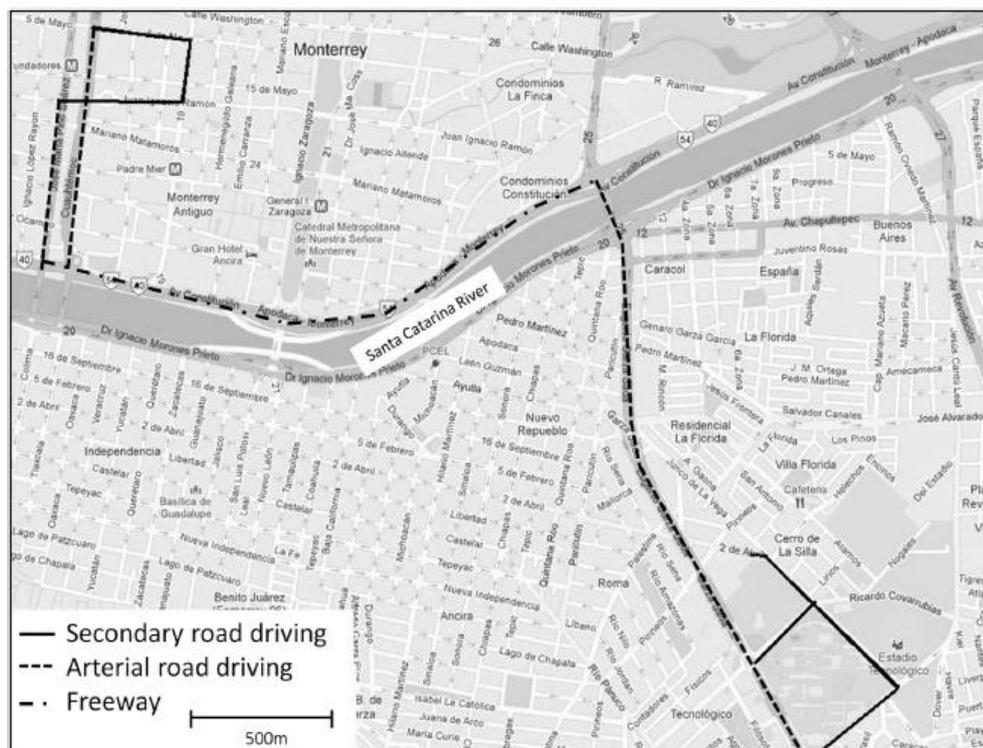


Figura 2.2 - Circuito de conducción seguida en la ciudad de Monterrey [17].

Tabla 2.1. Comparación del consumo de combustible al utilizar E05R, E05P, E15R y E15P [17].

Fuel blend	2004 Tsuru	2005 Derby	2008 Compass
Regular	10.86 ± 0.08	9.53 ± 0.12	6.61 ± 0.22
E05R	10.48 ± 0.12 (-3.5%)	9.11 ± 0.06 (-4.4%)	6.34 ± 0.07 (-4.1%)
E15R	9.79 ± 0.13 (-9.9%)	8.88 ± 0.20 (-6.8%)	6.27 ± 0.12 (-5.1%)
Premium	10.15 ± 0.10	9.33 ± 0.05	7.28 ± 0.09
E05P	9.89 ± 0.04 (-2.6%)	9.06 ± 0.08 (-2.9%)	7.26 ± 0.03 (-0.3%)
E15P	9.66 ± 0.09 (-4.8%)	8.82 ± 0.05 (-5.5%)	7.06 ± 0.05 (-3.0%)

En otro estudio, Hernández, Menchaca y Mendoza [18] evaluaron las emisiones durante el arranque en frío para dos tipos de vehículos (Tsuru del 2004 y Compass del 2008); las pruebas fueron realizadas en la ciudad de Monterrey. De los experimentos se encontró que las emisiones de gases en el arranque en frío del automóvil más antiguo eran mayores que en el más moderno. De la Figura 2.3, se muestra como el contenido de CO₂ se incrementa en el primer segundo, después del arranque, para luego estabilizarse en el tiempo. En el caso de CO, HC y NO_x, se obtiene que al inicio existe una subida rápida hasta alcanzar un pico y luego empiezan a decrecer hasta establecerse en el tiempo. Además, los autores demuestran que las emisiones de estos gases disminuyen a medida que se aumenta el contenido de etanol en la mezcla con la gasolina.

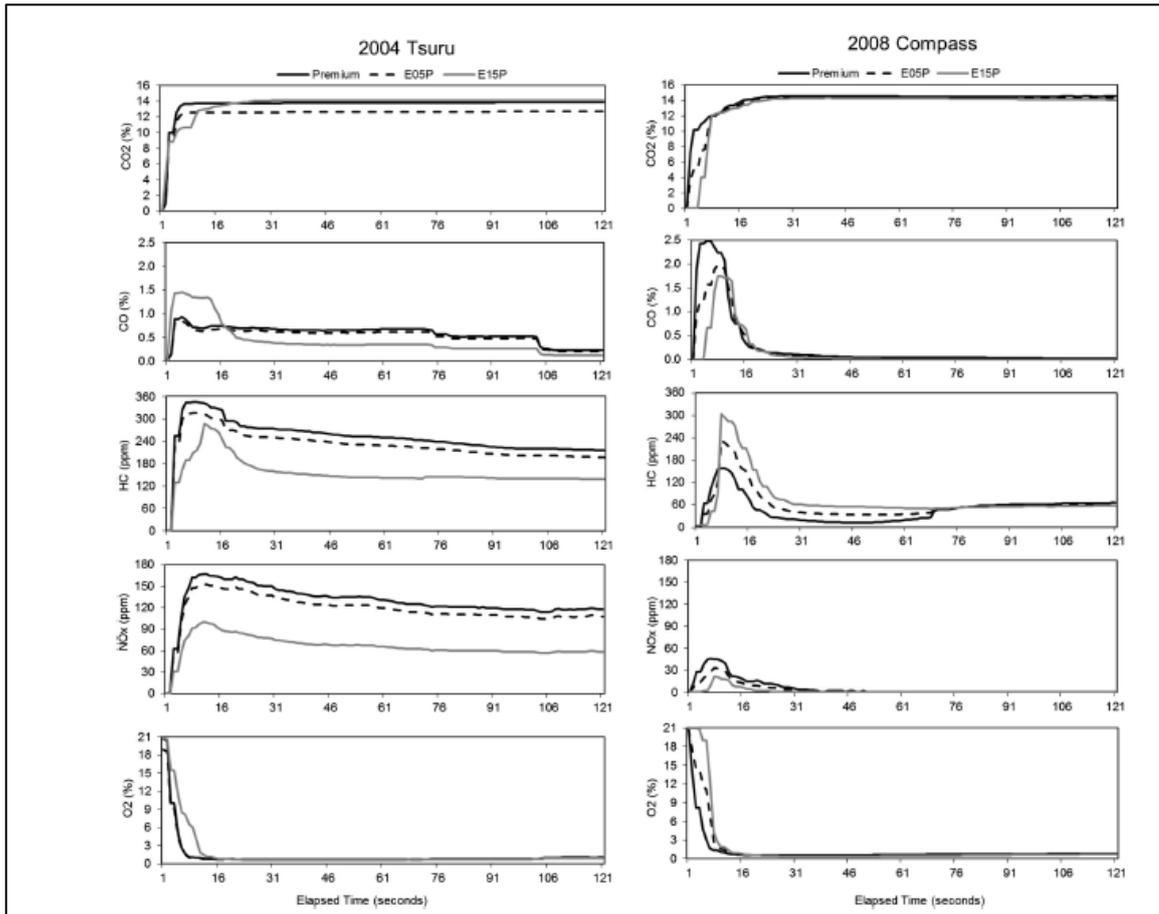


Figura 2.3 - Composición química de los gases de escape durante el arranque en frío utilizando E0 (premium), E05P y E15P [18].

Yao y colaboradores [19] realizaron pruebas con la mezcla gasolina-etanol con 15% de volumen de etanol (E15) en dos tipos de motores de encendidos por chispa, 4 tiempos. Uno de los motores funcionó con carburador y el otro con sistema de inyección electrónica. Los resultados del estudio comparativo entre el gasohol (E15) y la gasolina comercial (G95) mostraron que las emisiones de CO disminuyeron en 32% en motores con sistema de carburador (2,07g/km) y 10% en motores con sistema de inyección electrónica (2,38g/Km). Por otro lado, las emisiones de hidrocarburos totales (THC) disminuyeron 10 % en el motor con sistema de inyección, pero no mostraron los resultados de THC del motor con carburador. Finalmente, las emisiones de NOx disminuyeron en 36% en el motor con carburador y se incrementaron en 3% en el motor con sistema de inyección electrónica. Todos estos resultados son mostrados en las Figuras 2.4 y Figura 2.5.

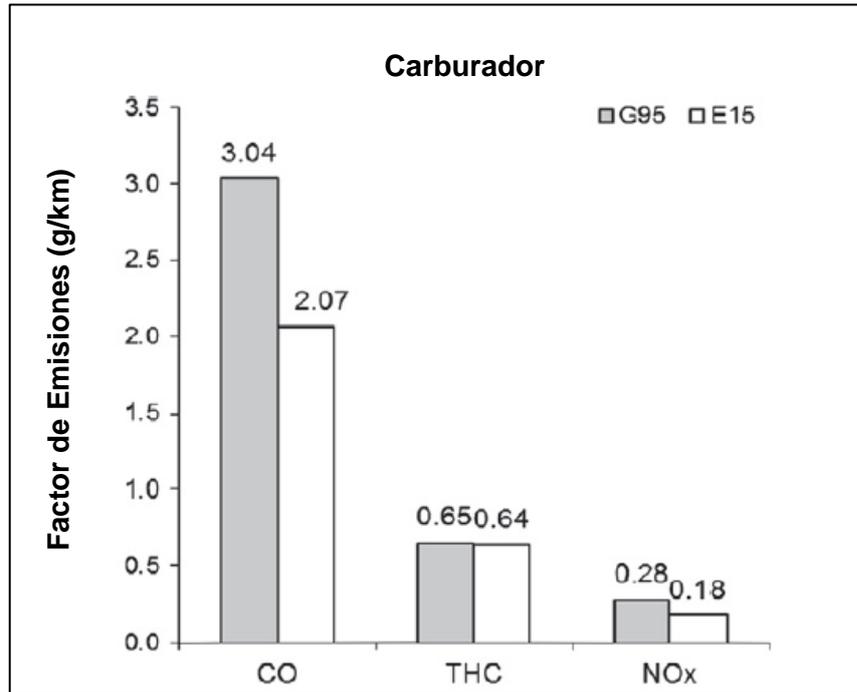


Figura 2.4 - Emisiones de CO, THC y NO_x del motor con carburado [19].

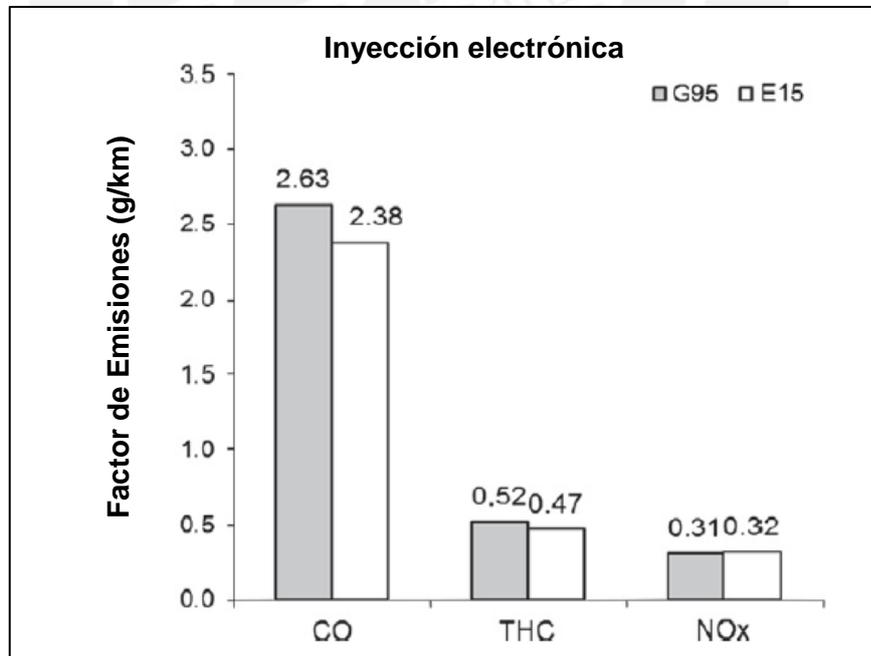


Figura 2.5 - Emisiones de CO, THC y NO_x del motor con sistema de inyección electrónico [19].

De lo dicho anteriormente, se argumenta que la mezcla gasolina-etanol puede ser aplicada satisfactoriamente en motores con sistema de carburador o inyección

electrónica, sin la ocurrencia de ningún problema secundario en el motor. Por otro lado, la disminución de CO, alcanos, alquenos y grupo de aromáticos al usar E15 son prácticamente despreciables en comparación a la gasolina comercial (ver Figura 2.6).

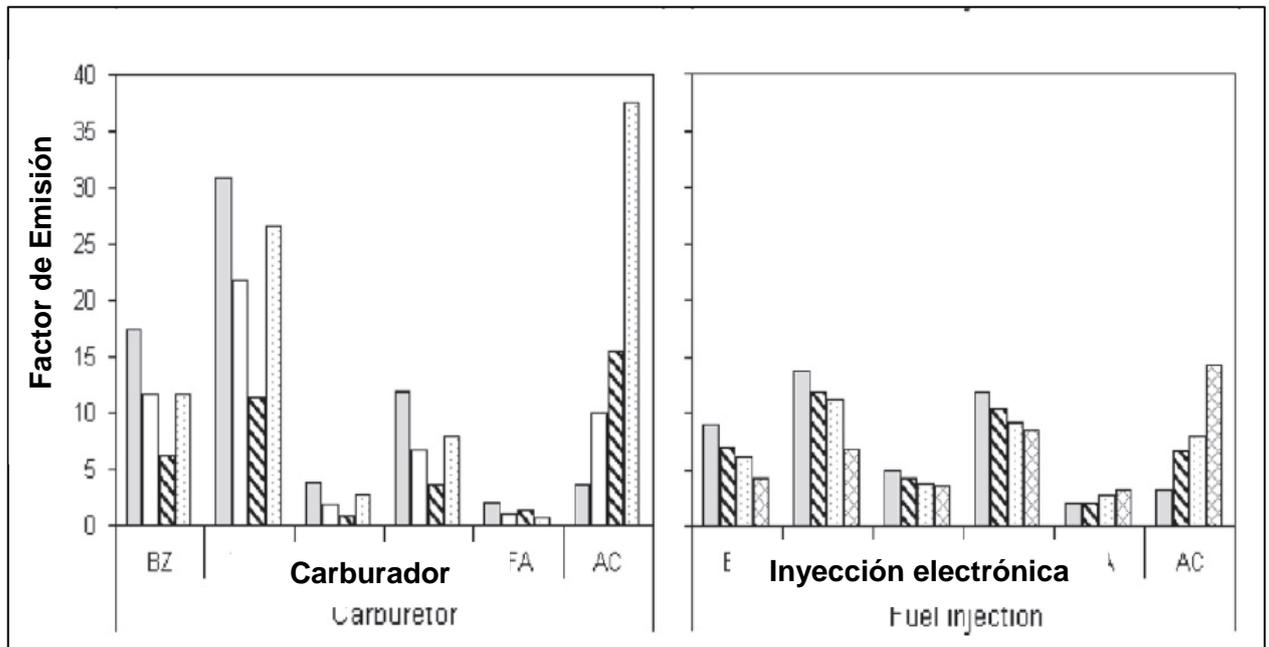


Figura 2.6 - Emisiones de hidrocarburos aromáticos en el motor carburado y motor de inyección electrónica [19].

Hakan Bayraktar y co-investigadores [20] realizaron un estudio para evaluar los efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre las emisiones de CO_2 , CO, hidrocarburos no quemados (UHC) y NO_x . Los experimentos se realizaron en un motor de inyección electrónica donde se consideraron 3 velocidades (1200, 1400 y 1600 rpm), 4 relaciones de compresión para cada velocidad (7, 8, 10 y 11) y 5 niveles de torque (0, 3, 7, 10 y 14 N.m).

Además, se evaluaron 4 mezclas de gasolina-etanol (con 0, 5, 10 y 15% en volumen de etanol, identificado con el acrónimo EER). Los resultados reportados indican que las mezclas de gasolina-etanol redujeron las concentraciones de CO (ver Figura 2.7) y UHC (ver Figura 2.8) hasta cerca de 45% y 40% respectivamente al usar 5 y 15% de etanol. Sin embargo, los autores encuentran que ocurre un incremento de NO_x y CO_2 del orden de 16 y 7,5% respectivamente (ver Figura 2.9 y Figura 2.10). También se encontró que un incremento de velocidad causa un aumento de las emisiones de CO_2 y NO_x , mientras que reduce los niveles de UHC. Respecto a la relación de compresión (CR), los resultados indican que a menor relación de compresión las emisiones de

CO₂ y NO_x disminuyen, pero con una penalidad en el aumento de CO y UHC (ver Figuras 2.11 y 2.12).

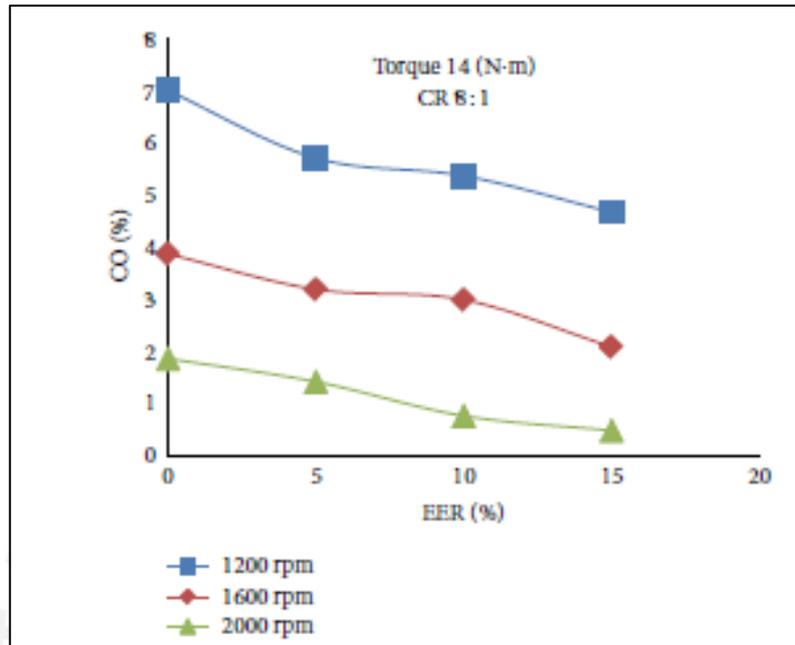


Figura 2.7 - Emisiones de CO para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].

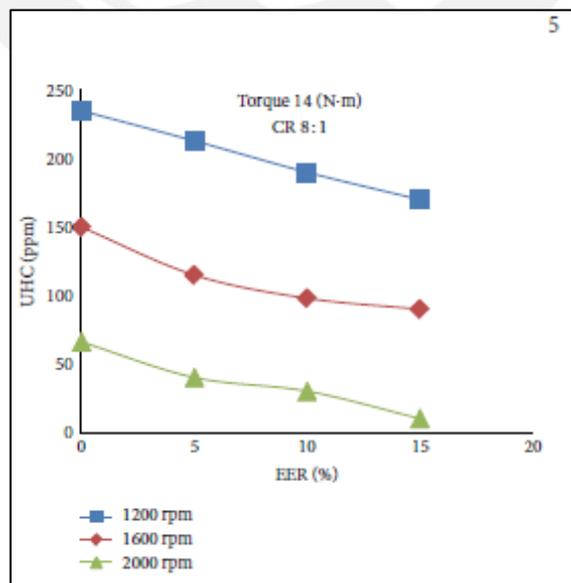


Figura 2.8 - Emisiones de UHC para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].

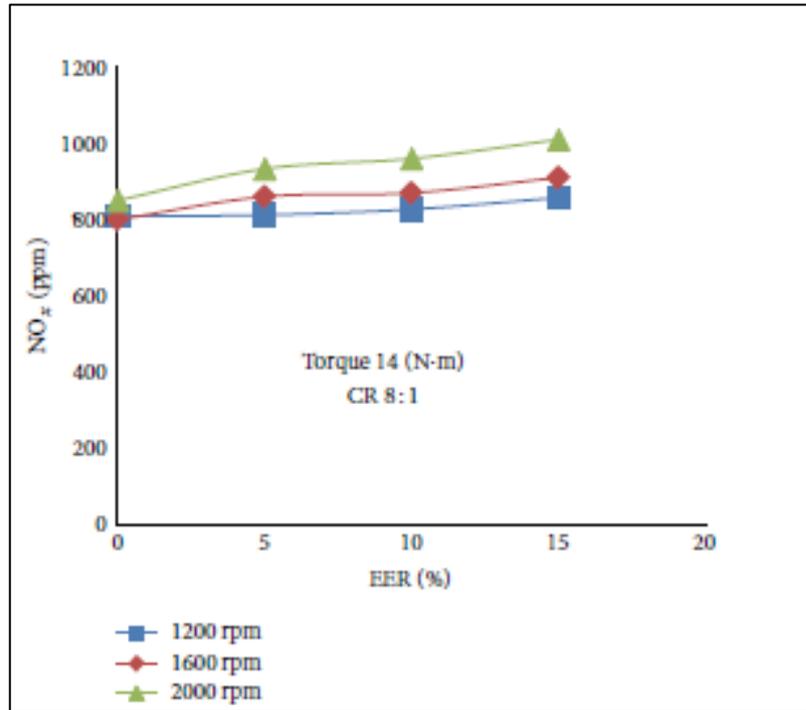


Figura 2.9 - Emisiones de NO_x para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].

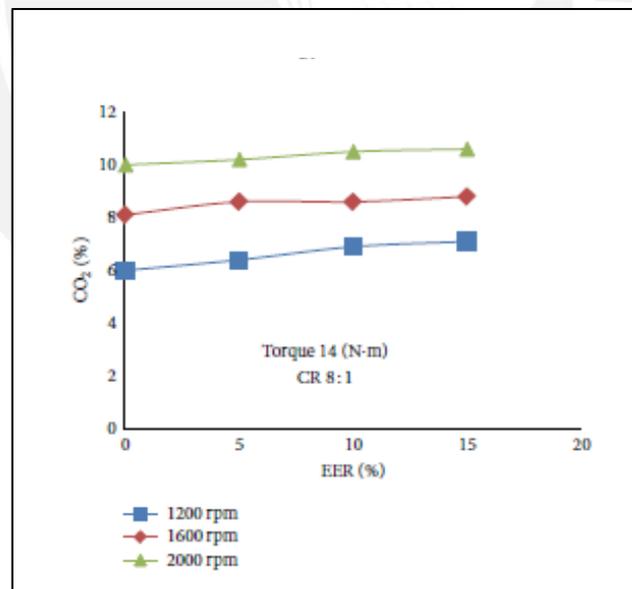


Figura 2.10 - Emisiones de CO₂ para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 8:1 [20].

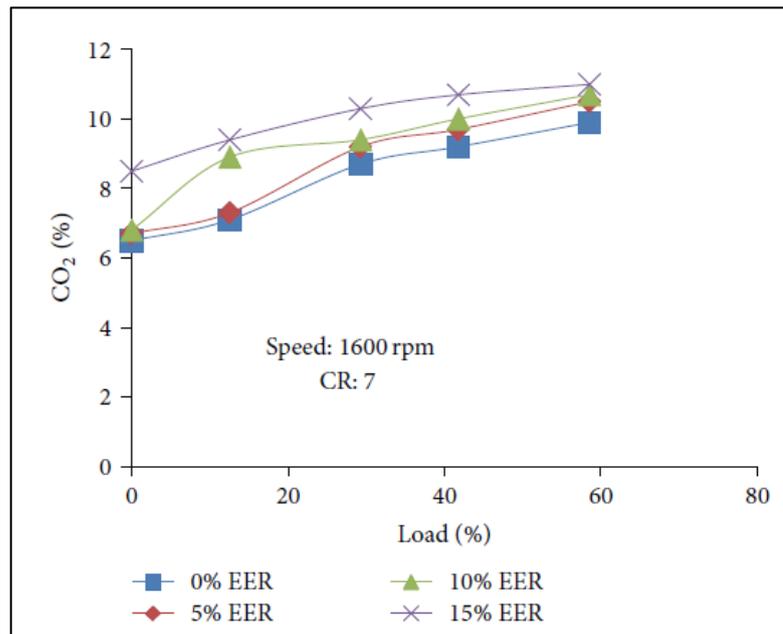


Figura 2.11 - Emisiones de CO₂ para distintas concentraciones de etanol en la gasolina y relación de compresión 7:1 [20].

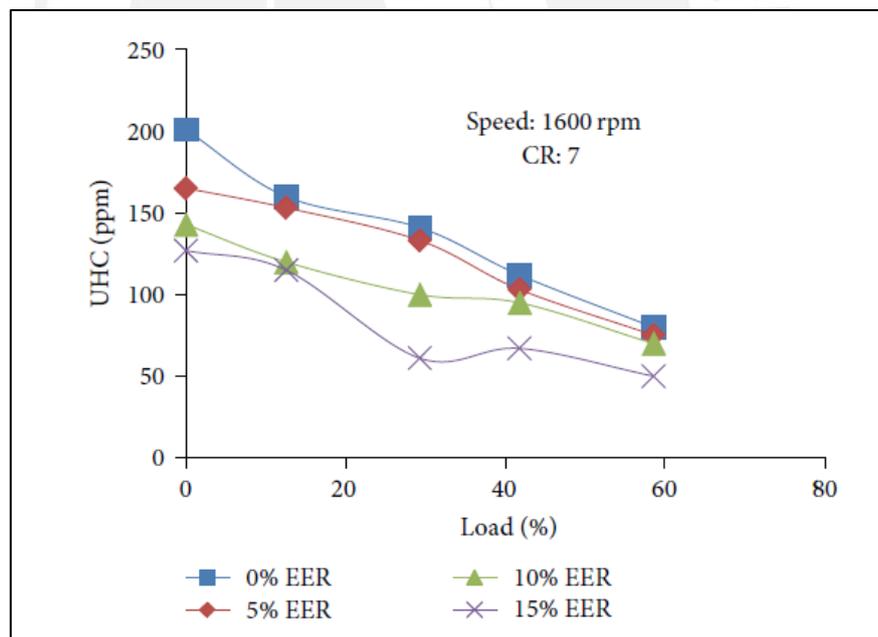


Figura 2.12 - Emisiones de UHC para distintas concentraciones de etanol en la gasolina relación de compresión 7:1 [20].

Karamangil y co-autores [21] realizaron investigaciones experimentales variando el tiempo de encendido de un motor electrónico bajo la mezcla gasolina etanol E10 (10% de etanol). El tiempo de encendido fue variando desde -6° hasta 6° pasando por el punto muerto superior con intervalos de 2°.

Los investigadores reportaron que el tiempo de encendido tiene una gran influencia en las características de la combustión y, por tanto, en el desempeño del motor. En dicho estudio, se encontró que el mayor torque con la mezcla E10 ocurrió para un tiempo de encendido de -4° , por lo que fue el más óptimo para la mezcla E10 (véase Figura 2.13).

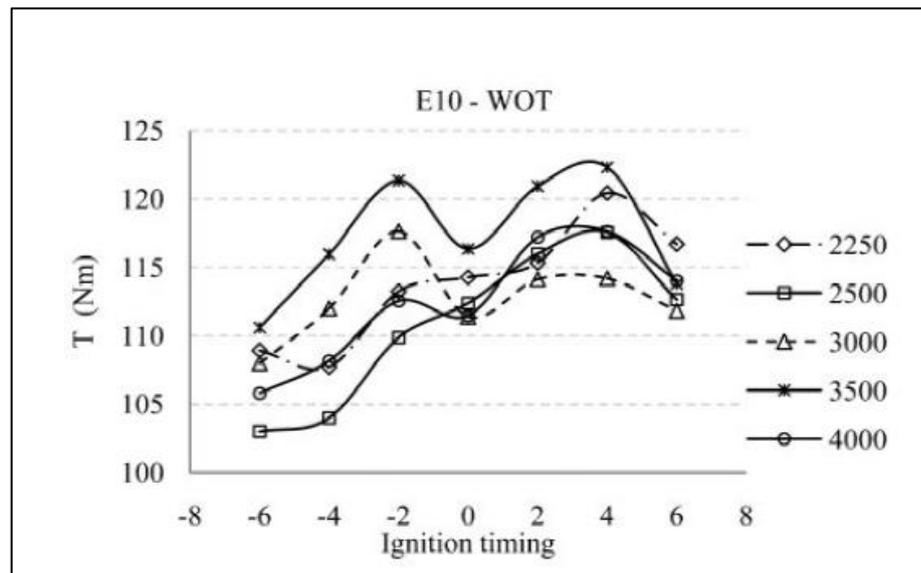


Figura 2.13 - Torque vs tiempo de encendido y RPM [21].

Por otro lado, la variación del tiempo de encendido no tiene efecto sobre las emisiones de CO y CO₂ tal como se muestra en la Figura 2.14 y Figura 2.15 mientras que un retardo en el tiempo de encendido reduce las emisiones de NO_x (Figura 2.16); y aumenta las emisiones de HC (Figura 2.17).

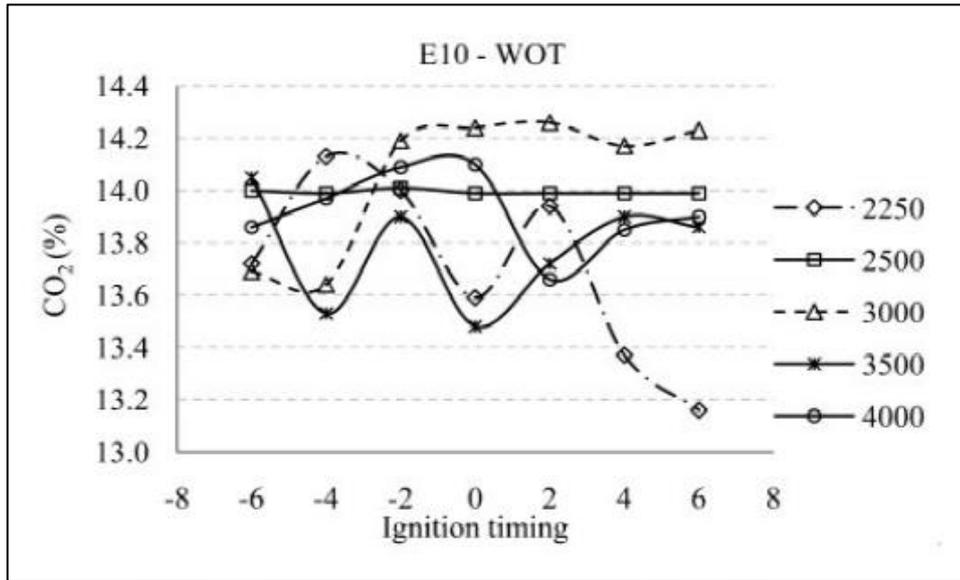


Figura 2.14 - Emisiones de CO₂ vs tiempo de encendido y RPM [21].

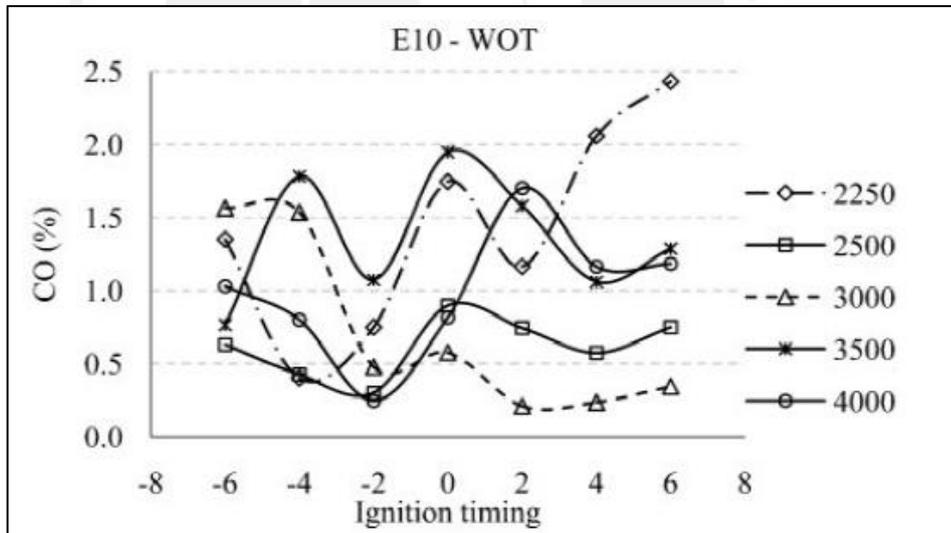


Figura 2.15 - Emisiones de CO vs tiempo de encendido y RPM [21].

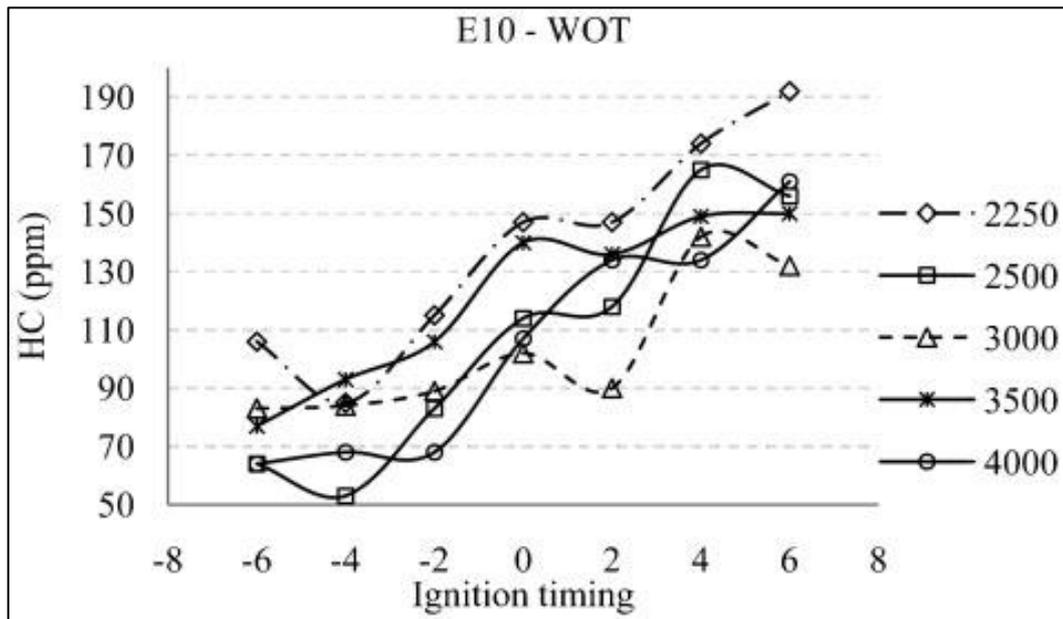


Figura 2.16 - Emisiones de HC vs tiempo de encendido y RPM [21].

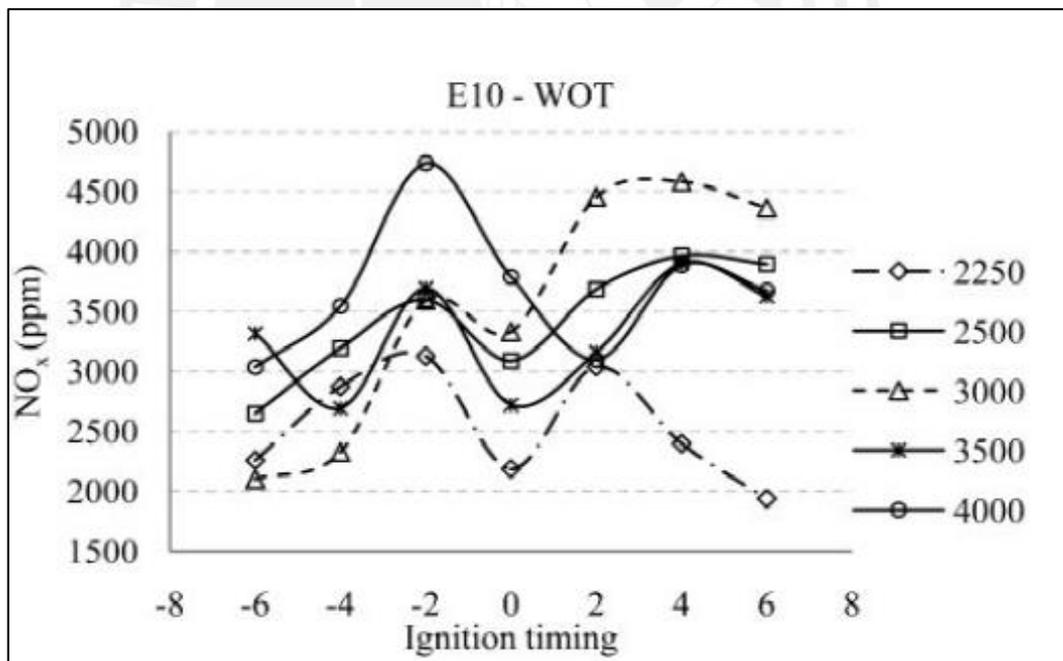


Figura 2.17 - Emisiones de NOx vs tiempo de encendido y RPM [21].

Chen y co-investigadores [22] realizaron un estudio teórico empleando datos experimentales con el denominado “método de superficie de respuesta”. Los autores indicaron que un aumento de etanol en la mezcla con gasolina-etanol produce un mayor consumo de combustible, lo cual hace que el desempeño del motor disminuya.

Las emisiones de la concentración de NO_x dependen de la temperatura y la concentración de oxígeno durante la combustión; en tal sentido, la presencia de etanol tiene una gran influencia en la combustión. En bajas cargas se presenta una gran disminución de NO_x , ya que debido al alto calor latente de vaporización y bajo el poder calorífico del etanol se genera una temperatura de llama baja. Por otro lado, la presencia de etanol tiene una gran influencia sobre las emisiones de CO, ya que a una mayor concentración de etanol para una misma carga del motor, se requiere mayor consumo de combustible, lo que genera una menor producción de CO.

Chen y colegas [22] estimaron la mejor concentración de etanol para un alto rendimiento y bajas emisiones de gases contaminantes de un vehículo liviano. Para ello se estimó que la relación ideal de etanol fue de 3,92 a 4,12 % del volumen total de la mezcla gasolina-etanol, para un factor de “confiabilidad óptimo”, el cual involucra las menores emisiones y más altos rendimientos. Además, la velocidad ideal fue de 57 km/h (ver Figura 2.18).

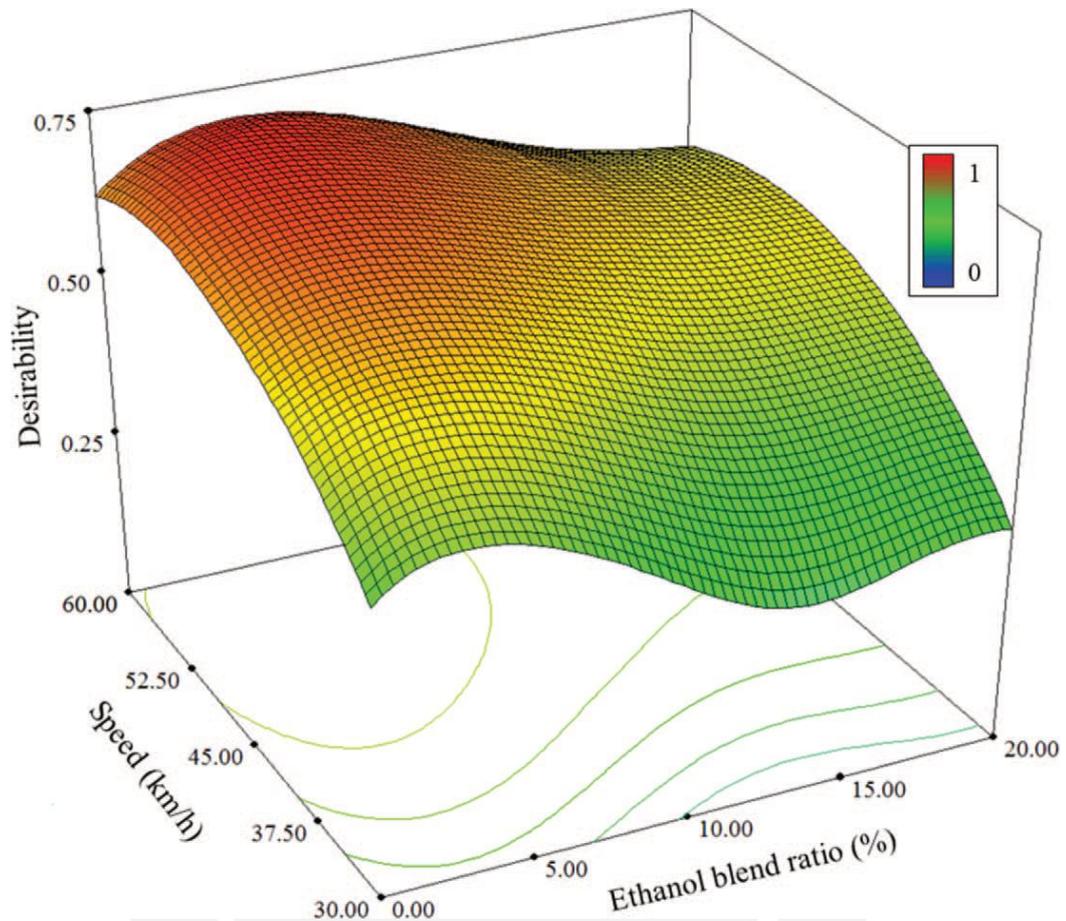


Figura 2.18 - Superficie de respuesta empleada por Chen y colaboradores [22] para encontrar la mejor relación de porcentaje de etanol en función de la velocidad del vehículo y el parámetro definido como “deseabilidad” (basado en rendimiento y emisiones del motor).

Koç y colegas [23] realizaron pruebas en un motor de encendido por chispa monocilíndrico, 4 tiempos, dos relaciones de compresión (10:1 y 11:1) y usando tres mezclas gasolina-etanol (E0, E50 y E85). El motor fue ensayado de 1500 a 5000 rpm con intervalos de 500 rpm. En dichas pruebas se encontró que el torque del motor sufrió un incremento al añadir un mayor porcentaje de etanol a la gasolina comercial; a pesar de que el poder calorífico de la mezcla disminuyó, se observó incrementos del torque. Según los autores, el etanol al estar oxigenado produce una combustión más completa. El incremento promedio de torque fue de 2 % con las mezclas E50 y E85, respecto a E0 y cuando la relación de compresión es de 10:1; para una relación de compresión de 11:1 el incremento promedio de torque fue de 2,3% y 2,8% para el E50 y E85 sobre el E0 respectivamente (véase Figura 2.19).

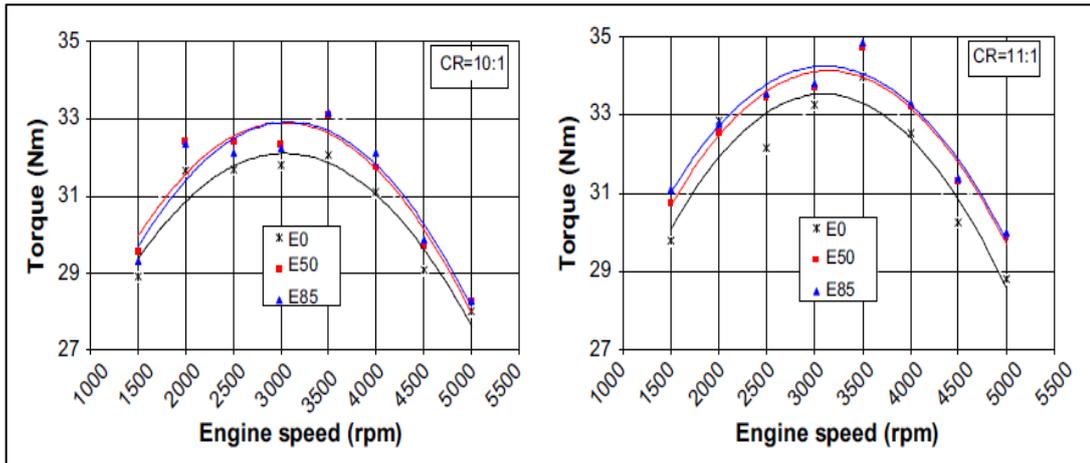


Figura 2.19 - Efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre el torque a diferentes relaciones de compresión [23].

Por otro lado, Koç y colegas [23] observaron que al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla, el consumo específico de combustible aumentó tal como se muestra en la Figura 2.20. Este aumento fue de 20,3% y 45,6% con las mezclas E50 y E85, a comparación de la mezcla E0, respectivamente y para una relación de compresión de 10:1. Del mismo modo, al utilizar una relación de compresión de 11:1 hubo un incremento de 16,1% y 36,4% para las mezclas E50 y E85. Este efecto fue asociado al bajo poder calorífico que posee el etanol (36% menos que la gasolina), lo cual produce un aumento en el consumo específico de combustible. Asimismo, en la Figura 2.21, se muestra que las emisiones de HC disminuyeron conforme aumentó la concentración de etanol en la mezcla; lo mismo sucede, para un aumento del régimen de giro del motor.

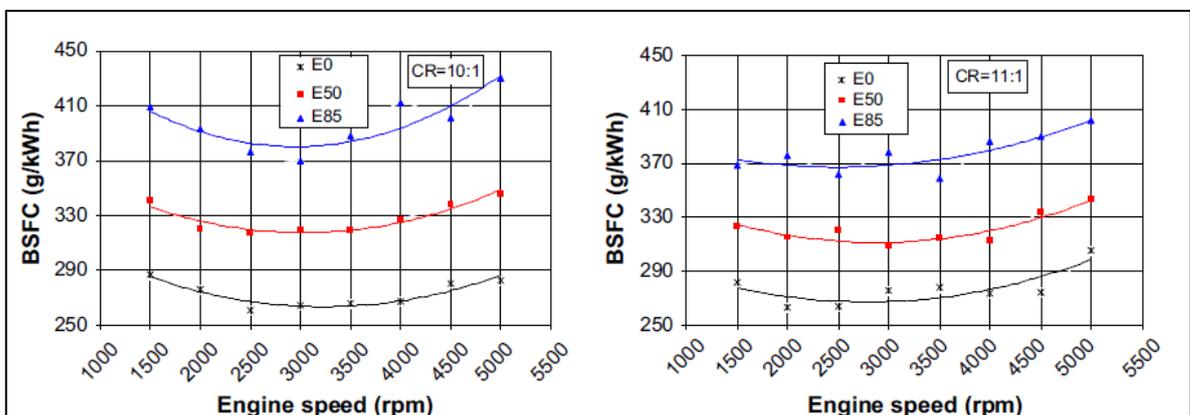


Figura 2.20 - Efectos de la mezcla gasolina-etanol en el consumo específico de combustible [23].

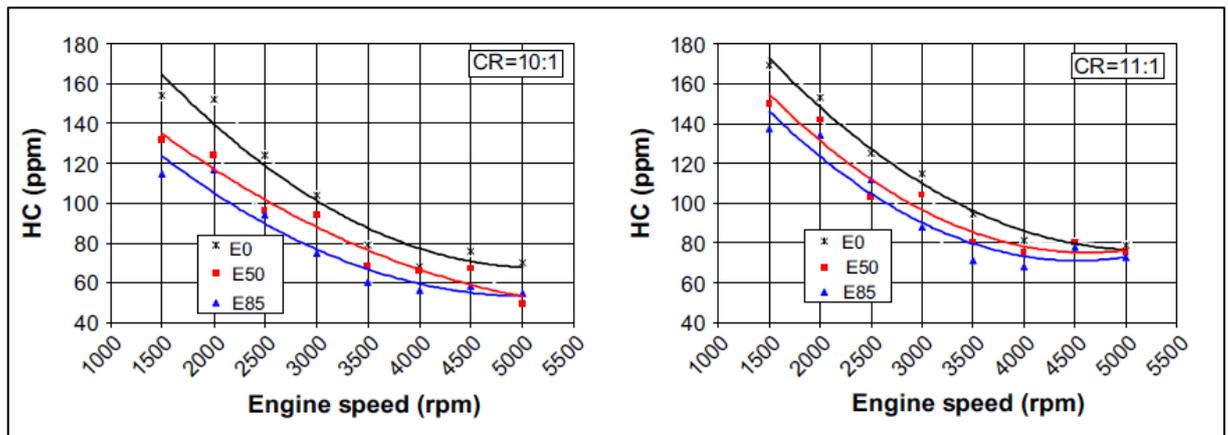


Figura 2.21 - Los efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre el HC a diferentes relaciones de compresión [23].

Las emisiones de HC se redujeron drásticamente entre 1500 rpm y 5000 rpm. Finalmente, las altas relaciones de compresión favorecen a la formación de NO_x, debido a una mayor temperatura de la combustión (ver Figura 2.22).

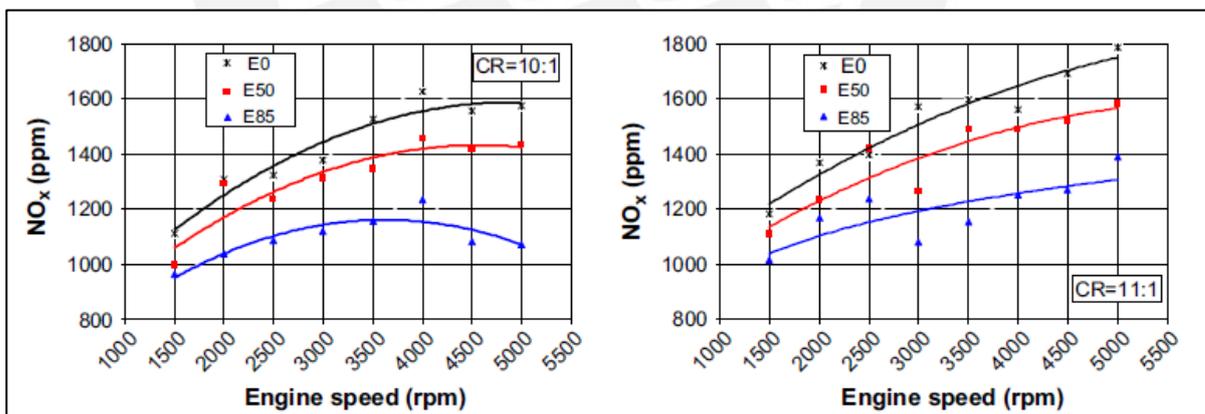


Figura 2.22 - Los efectos de la mezcla gasolina-etanol sobre las emisiones de NO_x a diferentes relaciones de compresión [23].

Liu y colaboradores [24] realizaron estudios de la mezcla gasolina-etanol en un motor de encendido por chispa. Sus estudios demostraron que las emisiones de acetaldeídos se incrementan al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla. Al realizar pruebas con las mezclas E0, E10 y E30, se encontró que las máximas emisiones de acetaldeídos eran para la mezcla E30. Este incremento, según los autores, es debido a la oxidación del oxígeno durante el proceso de combustión (véase Figura 2.23).

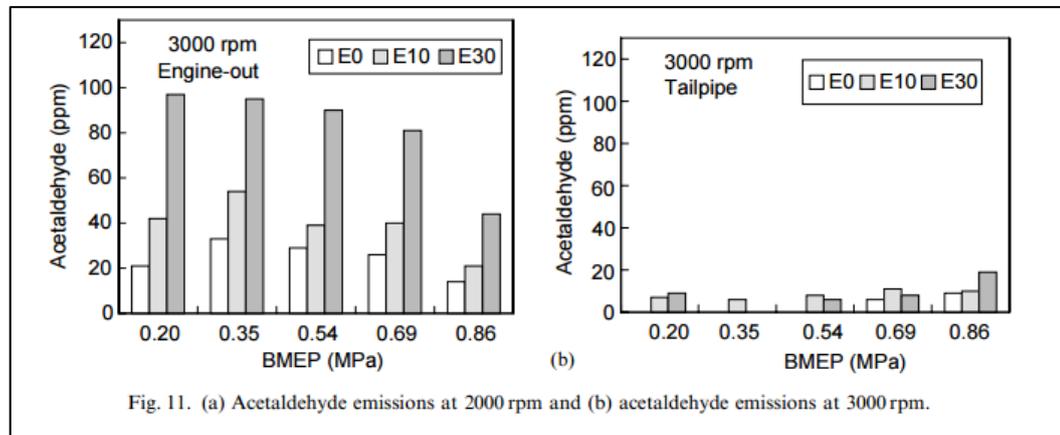


Figura 2.23 - Emisiones de acetaldehído a 2000 rpm (a) y 3000 rpm (b) para la mezcla gasolina-etanol [24].

La revisión de la literatura presentada en este capítulo demuestra que el contenido de etanol en la mezcla con gasolina tiene diversos factores positivos y ciertos inconvenientes. Por ejemplo, en los estudios de motores y vehículos, dirigidos a bajo de 600 m.s.n.m., queda claro que el consumo de combustible y las emisiones de NOx aumenta con el contenido de etanol en la mezcla combustible. Pero, en la mayoría de los casos, existe una reducción en las emisiones de CO y HC. También se verifica que existen estrategias que podrían utilizarse para compensar algunos de estos inconvenientes generados por el uso de etanol en motores de encendido por chispa, por ejemplo: aumenta la relación de compresión y tiempo de encendido. Por otra parte, durante la revisión de la literatura no se encontró artículos sobre el uso de la mezcla gasolina-etanol funcionando sobre diferentes niveles de altitud. Por lo tanto, el presente trabajo de tesis pretende contribuir a la literatura, desarrollando pruebas en Cusco (altura promedio del circuito: 3400 m.s.n.m.) y Lima (altura promedio del circuito: 100 m.s.n.m.).

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

3.1. Definición del circuito.

Para determinar las rutas urbanas del circuito, tanto en Lima y en Cusco, fue necesario definir los trayectos de las zonas urbanas más céntricas y transitadas. De ese modo, se podría obtener un levantamiento más representativo de las emisiones y el rendimiento del vehículo. El instrumento usados para determinar la ruta y la distancia transitada fue un GPS marca Qstarz y modelo BT-Q1000XT (véase Figura 3.1), el cual sincronizó, en tiempo real, la trayectoria recorrida, así como la altura sobre el nivel del mar en la cual se realizaron las pruebas. El software del GPS proporcionó, con las variables medidas (latitud, longitud y tiempo), la distancia recorrida, la velocidad y altura. La Tabla 3.1 da a conocer la ficha técnica del GPS de posicionamiento.



Figura 3.1 - GPS marca Qstarz, modelo Q1000XT.

Tabla 3.1. Ficha técnica del Sistema de Posicionamiento Global, GPS [15].

.Sensor	Rango de Medición
Frecuencia	1575,42 MHz
Canales	66-CH
Sensibilidad	165 dBm
Aproximación	<3m
Velocidad	0,1 m/s
Tiempo	50 ns
Altitud	18 000 m

Aceleración	<4g
-------------	-----

3.1.1. Circuito de Pruebas en Cusco

La ciudad de Cusco está ubicada al sur de los andes peruanos. Esta ciudad fue el centro y la ciudad más importante del imperio del Tahuantinsuyo en el Perú antiguo de esa época. A pesar de ser una ciudad relativamente pequeña y delimitada por las montañas, es la cuarta ciudad con mayor adquisición de automóviles a nivel nacional [1]. Las avenidas del centro urbano de Cusco son bien estrechas (véase Figura 3.2), lo que ocasiona un tráfico caótico en horas punta del día.

La ciudad se encuentra a 3400 m.s.n.m., lo cual influye en la presión atmosférica (0,76 bar) y la concentración de oxígeno del aire disminuye en 67% con respecto al disponible al nivel del mar. Por esta razón, es de esperarse diferencias en las prestaciones y emisiones de los vehículos.

En este estudio, el centro urbano de Cusco fue seleccionado para evaluar el impacto de la altitud y concentración de etanol en la gasolina sobre el desempeño y las emisiones de vehículos livianos. Para tal fin, se recorrió las rutas más céntricas de la ciudad: Avenida La Cultura, Plaza de Armas, Calle Colquechaca, Calle Santa Catalina, Calle el Triunfo, Avenida Nueva Baja, Calle Fierro, Avenida Nueva Alta, Avenida el Ejército, Avenida 28 de Julio, Vía expresa y la avenida Túpac Amaru (véase Figura 3.3) . Esta ruta tuvo un recorrido total de 14, la cual empezó y terminó en una determinada estación de servicio (grifo) ubicada en la Avenida La Cultura.



Figura 3.2 - Flujo de transporte vehicular en La Avenida el Sol, Cusco.

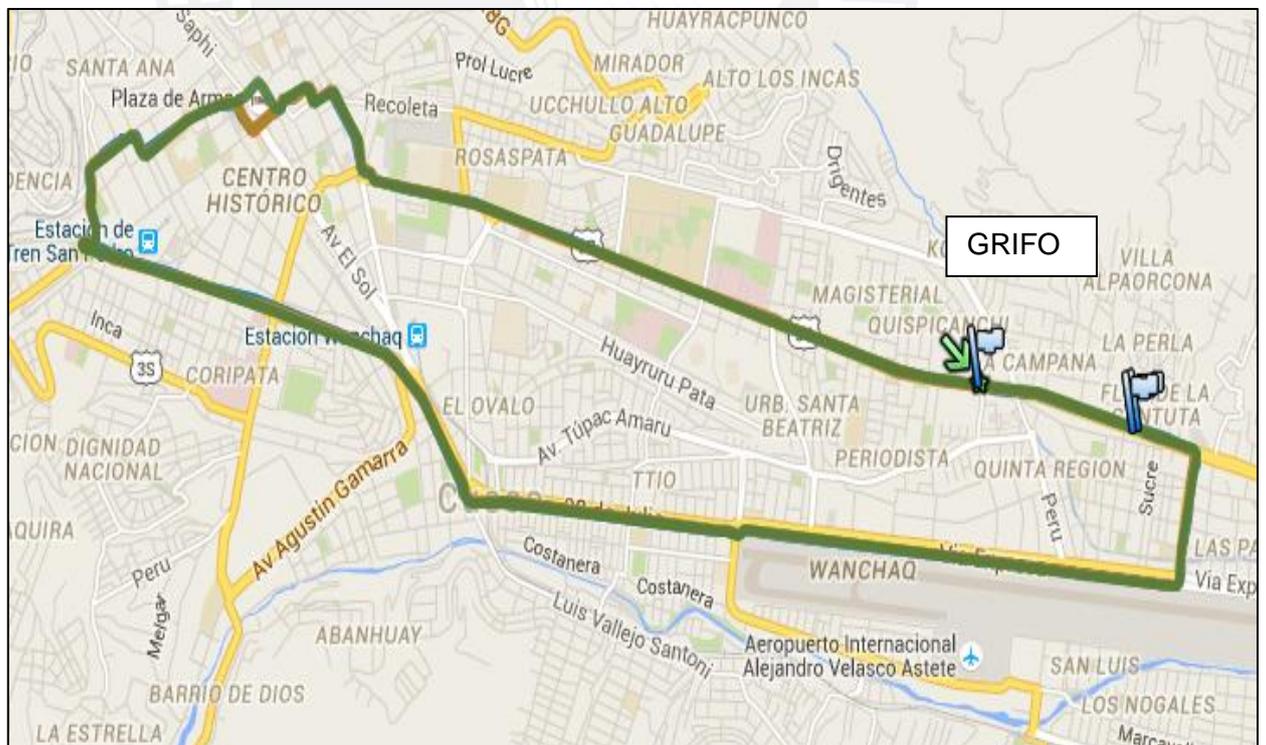


Figura 3.3 - Circuito de las pruebas realizadas en la ciudad de Cusco.

3.1.2. Circuito de Pruebas en Lima

La ciudad de Lima está ubicada en la costa central del Perú. Lima es la ciudad con mayor población del país con y cuenta con más de 9 millones de habitantes y es la primera ciudad en adquisición de vehículos, lo cual hace que tenga un tráfico bien caótico que varía a diferentes horas del día (véase Figura 3.4).

Respecto al circuito de las pruebas en el centro urbano de Lima Metropolitana, esta incluyó Avenida José de la Riva Agüero, Calle Tulipanes, Avenida Universitaria, Avenida Oscar R. Benavides, Avenida Alfonso Ugarte, Avenida Brasil, Avenida Simón Bolívar (ver Figura 3.5). El recorrido total, en este circuito, fue de 14,5 Km, tomando como punto y fin del recorrido una misma estación de servicio (grifo).

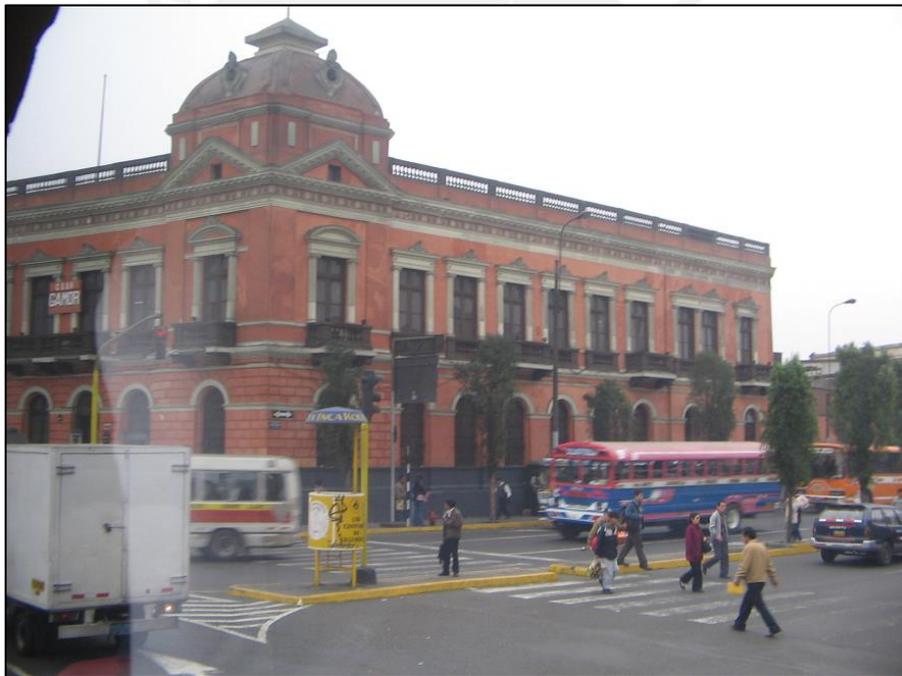


Figura 3.4 - Flujo de transporte vehicular y peatonal en la Plaza Bolognesi de Lima Metropolitana.



Figura 3.5 - Circuito de las pruebas realizadas en la ciudad de Lima Metropolitana.

Las Figura 3.6 y Figura 3.7 muestran las diversas alturas sobre el nivel del mar alcanzadas tanto en los circuitos de Lima metropolitana y Cusco. Estos fueron obtenidos con el GPS. Se observa que la altitud en la ciudad de Lima varió entre 60 y 180 m.s.n.m. Mientras que en la ciudad de Cusco varió entre 3320 y 3500 m.s.n.m. Esto significa que las pruebas no fueron hechas a una altitud constante



Figura 3.6 - Las distintas alturas del trayecto del vehículo durante el recorrido en la ciudad de Lima Metropolitana.

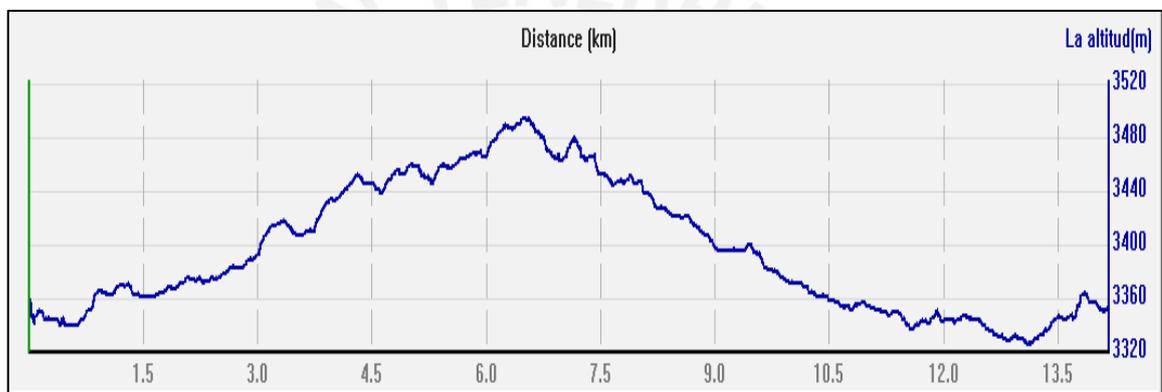


Figura 3.7 - Las distintas alturas del trayecto del vehículo durante el recorrido en la ciudad de Cusco.

3.2. Preparación de las mezclas de etanol y gasolina.

Para realizar la preparación de la mezcla gasolina-etanol (E7,8), fue necesario adquirir el gasohol comercial de 90 octanos (ver Ficha Técnica en el Anexo 3.1), la cual fue suministrada en un grifo local, y el etanol anhidrido (ver Figura 3.8). La Ficha Técnica del etanol es presentada en el Anexo 3.2.

Para preparar la mezcla E10 se utilizó una probeta graduada, un vertedero y un embudo, las cuales son mostradas en la Figura 3.9.

La Tabla 3.2 resume la composición de los combustibles usados durante los ensayos.

Tabla 3. 2. Combustibles en el ensayo

Mezcla	E7,8	E10
Porcentaje de etanol en volumen (%)	7,8	10
Volumen de etanol (l/gal)	2,837/0.624	3,637/0.8
Volumen de gasolina (l/gal)	33,532/7,376	32,732/7.2
Volumen total (l/gal)	36,369/8	36,369/8

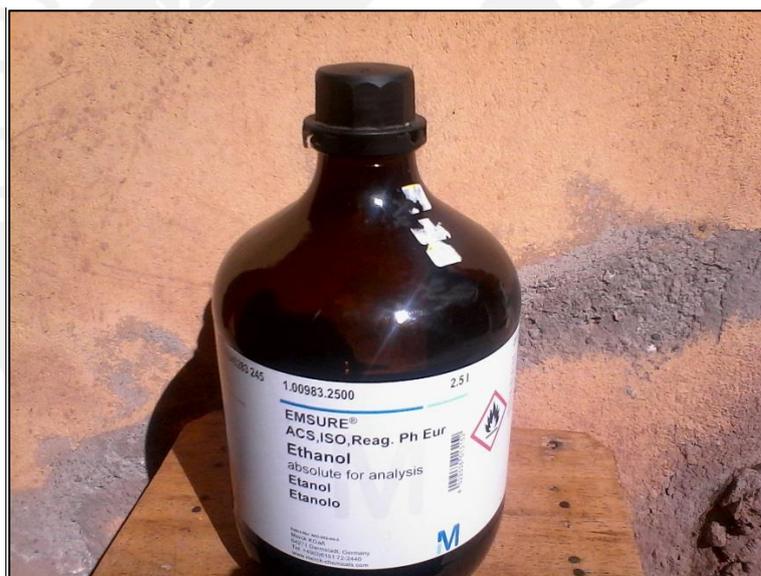


Figura 3.8 - Etanol anhidro utilizado en las pruebas.



Figura 3.9 - Probeta graduada y embudo utilizados en la preparación de la mezcla E10.

3.3. Vehículos de prueba y experimentación.

Debido a dificultades en el transporte del vehículo utilizado en las pruebas de Lima a Cusco, se decidió escoger un vehículo similar para las pruebas de Cusco. De este modo, se pudo obtener una cantidad de datos experimentales que permitan una relativa comparación experimental.

Los vehículos utilizados durante las pruebas experimentales fueron de la marca Kia y modelo Rio. En Lima se utilizó un vehículo fabricado el año 2013, mientras que en Cusco fue del año 2014 (ver Figura 3.10). La Figura 3.11 presenta una vista general del motor que equipa ambos vehículos. La ficha técnica comercial de los vehículos utilizados se muestra en la Tabla 3.3. Cabe mencionar que estos vehículos son representativos de la flota urbana en ambas ciudades, ya que son ampliamente usados tanto para el servicio de taxi como para el uso particular.



Figura 3.10 - Vehículos marca Kia, modelo rio, año 2014 (lado izquierdo) y año 2013 (lado derecho) utilizados en las pruebas de Lima y Cusco respectivamente.



Figura 3.11 - Vista general del motor de encendido por chispa del vehículo Kia Rio.

Tabla 3.3. Ficha técnica del vehículo Kia Rio.

Categoría	M1
Marca	Kia
Modelo	Rio
Color	Azul-gris
Combustible	Gasolina

Forma rodante	4x2
Año de fabricación	2014
Año de modelo	2014
Ejes	2
Asientos	4
Pasajeros	4
Cilindros	4
Cilindrada	1,248L
Peso bruto	1,540 Tn
Peso Neto	1,112 Tn
Carga útil	0,438
Longitud	4,385 m
Altura	1,455 m
Ancho	1,72 m

Las pruebas de caracterización de emisiones en el escape de vehículo se llevaron a cabo con un analizador de gases portátil de la marca Infrared Industries y modelo FGA4500 (véase Figura 3.12). Los datos técnicos del analizador de emisiones se presentan en la Tabla 3.4 y el rango de medición para los diversos sensores del analizador son mostradas en la Tabla 3.5.

El analizador portátil tiene la capacidad de medir 5 tipos de especies contaminantes en los gases de escape: CO, CO₂, NO_x, HC y O₂; además mide el factor lambda (λ).

Las concentraciones de O_2 y NO_x se detectan mediante celdas electroquímicas, mientras que las emisiones de CO , CO_2 y HC , mediante sensores infrarrojos no dispersivos. El equipo fue adquirido con la hoja de calibración de fábrica, donde se menciona que el analizador de gases portátil tiene una precisión, en cada variable, del 1 %.

Los datos del analizador fueron registrados en un computador portátil conectado a través de un cable USB (ver Figura 3.13); mientras que la sonda se instaló al tubo de escape (ver Figura 3.14). En el computador, vía un software de Infrared Industries se registran los datos de emisiones a una frecuencia de 1 dato/segundo. La fuente de energía del analizador fue provista por una conexión DC de 12 voltios



Figura 3.12 - Analizador de gases portátil marca Infrared Industries.

Tabla 3.4. Características del analizador de gases portátil [15].

Peso	4,1 kg
Dimensión(ancho x largo x altura)	33,5 cm x 27,4 cm x 16 cm
Temperatura de operación	2 °C a 45 °C

Tabla 3.5. Rango de medición para los diversos sensores del analizador de gases [15].

Sensor	Rango de Medición
HC	0-99999 ppm
CO	0 – 10 %
O ₂	0 – 25 %
CO ₂	0 – 20 %
NO _x	0 – 5000 ppm
RPM	0 – 9999 rpm
Relación Aire/Combustible	0 – 50
Factor Lambda	0 – 5

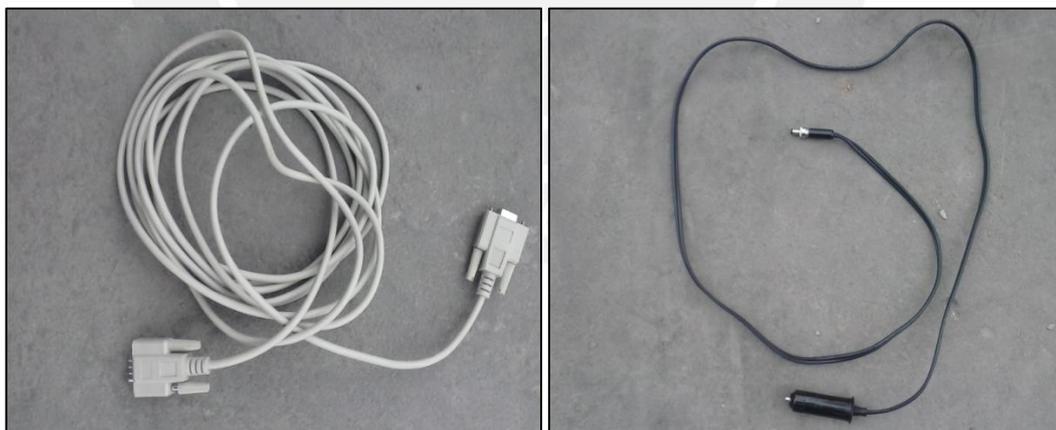


Figura 3.13 - Conexión para el computador portátil dedicado al registro de emisiones: cable USB (lado izquierdo) y conector de fuente de energía de 12 V (lado derecho).



Figura 3.14 - Conexión de la sonda de aceptación de gases del analizador.

Para capturar las variables disponibles de lectura por el módulo de control electrónico del motor fue necesario adquirir un dispositivo de diagnóstico a bordo (OBD, de su sigla en inglés “*On board diagnostic*”).

El dispositivo OBDlink MX, mostrado en la Figura 3.15, permitió realizar la adquisición de las siguientes variables: velocidad del vehículo, RPM, temperaturas y presiones de los fluidos del motor. Los datos del OBD fueron registrados a una frecuencia de 1 muestra/segundo y luego almacenados en el computador portátil.

La Figura 3.16 muestra un esquema ilustrativo de los equipos dentro del vehículo y la Tabla 3.6 muestra el rango de medición del OBDlin MX.



Figura 3.15 - OBDLink MX.

Tabla 3.6. Rango de medición del OBDlin MX.

Sensor	Rango de Medición
Muestreo de datos en tiempo real	90 parámetros>
Peso	33g
Voltaje de operación	8-18 V
Humedad relativa	0 – 85%

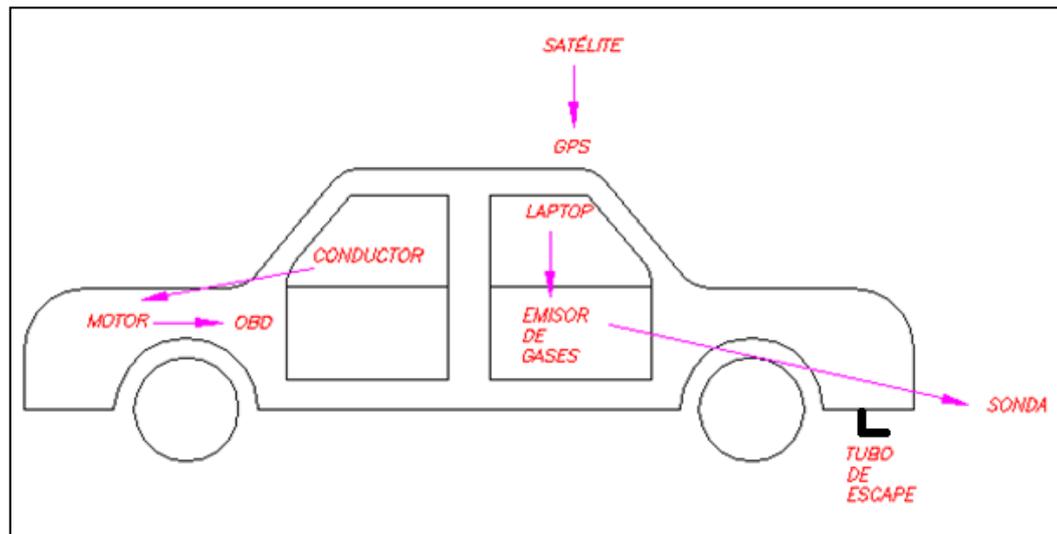


Figura 3.16 - Instalación de equipos dentro del vehículo.

El método utilizado, para determinar el consumo de combustible del vehículo fue llenar completamente el tanque de este en el grifo, el cual fue de 8 galones (36,369 L). Una vez obtenido el tanque lleno, se empezó a realizar el recorrido completo del circuito, el cual inició y finalizó en el mismo grifo. Al concluir un circuito, se completó el volumen consumido hasta obtener los 8 galones iniciales. De este modo, fue posible estimar el consumo de combustible promedio por circuito recorrido.

Además, con la información de la distancia total recorrida (obtenida por el GPS), se pudo obtener el valor promedio del consumo de combustible por kilómetro.

Para determinar el consumo con la mezcla E7,8 (gasolina comercial) solo se fue necesario llenar el tanque del vehículo en el mismo grifo; en cambio, para la mezcla E10, se añadió la concentración adecuada de etanol (ver tabla 3.1) al tanque del vehículo, luego se procedió a completar los 8 galones del tanque con gasolina. Finalmente, las condiciones ambientales se midieron con un conjunto termómetro-higrómetro (ver Figura 3.17).

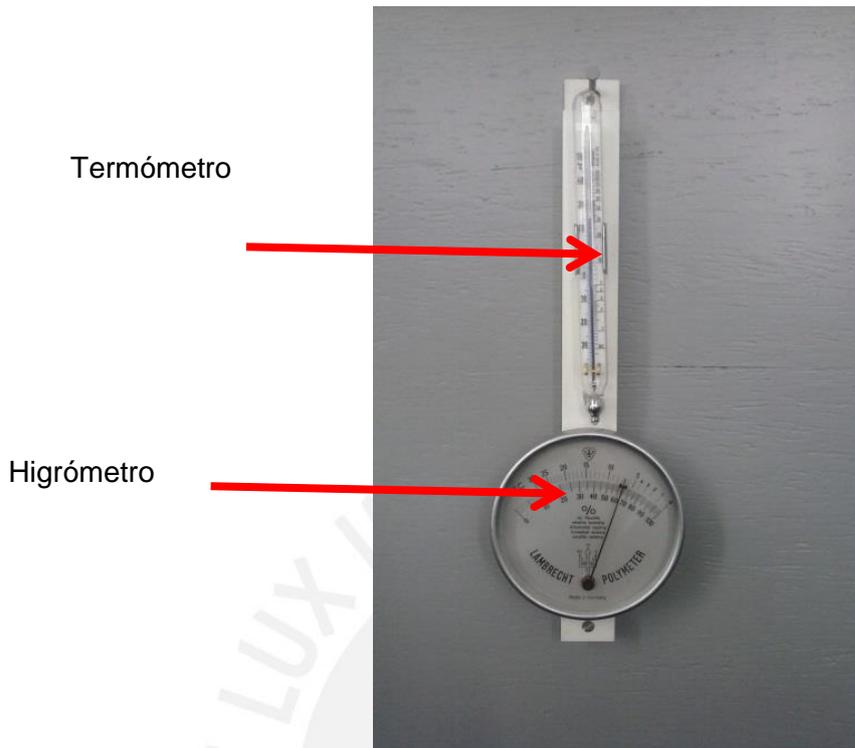
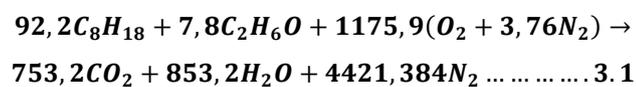


Figura 3.17 - Conjunto Termómetro-higrómetro para medir la temperatura y humedad ambiental.

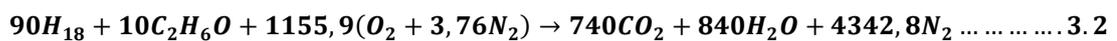
3.4. Expresiones para cálculo de parámetros

Las pruebas en Lima y Cusco se realizaron con las mezclas de combustible E7,8 y E10. Estas mezclas son resultado de la gasolina comercial (C_8H_{18}) y el etanol (C_2H_6O) [2]. Luego, el proceso de combustión estequiométrica proporcionó las siguientes ecuaciones.

E7,8:



E10:



A partir de las ecuaciones 3.1 y 3.2 podemos obtener el dosado estequiométrico (Fe); de acuerdo, a la siguiente expresión:

$$Fe = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{aire}} \dots \dots \dots 3.3$$

donde:

$Fe =$ dosado estequiométrico (-)

$\dot{m}_{comb} =$ flujo de combustible(kg)

$\dot{m}_{aire} =$ flujo seco de aire(kg)

El flujo de masa de aire se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\lambda * \dot{m}_{comb}}{Fe} \dots \dots \dots 3.4$$

Donde:

$\dot{m}_{aire} =$ flujo másico de aire $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

$Fe =$ dosado estequimétrico(kg).

$\lambda =$ factor lambda.

$\dot{m}_{comb} =$ flujo másico de combustible(Kg/s).

Las emisiones totales en gramos por kilómetro recorrido (E_i), de cada uno de los compuestos i monitoreados para las pruebas en donde el vehículo estuvo en circulación. Se obtuvieron mediante el balance de materia de un sistema abierto, tomando como consideración que los gases de combustión se comportan como gases ideales, para lo cual se utilizó la siguiente expresión [18]:

$$E_i = \frac{1}{d} \int_{t_0}^{t_i} D(n.i) \left(\frac{y_i P}{RT} M_i \right) dt \dots \dots \dots 3.5$$

donde:

D = desplazamiento del motor (l).

n = velocidad del motor (RPM).

y_i = fracción molar del compuesto i en los gases de combustión.

P = Presión atmosférica (atm).

R = constante universal de los gases (0.08206 atm – l/ mol – K).

T = temperatura de los gases de combustión medida en el escape del vehículo(K).

M_i = peso molecular de la especie i .

d = distancia recorrida durante el circuito de la prueba (km).

i = Número de ciclos por vuelta [motor de 4 tiempos, $i=0,5$].

De acuerdo a la ecuación 3.5, se puede obtener las emisiones de gases en gramos por segundo para cada especie i con sus respectivos valores promedios en las siguientes ecuaciones:

$$E_{CO} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}) \cdot P \cdot M_{CO} \cdot CO_{\%} \cdot 10^{-2}}{T_a \cdot R} \dots \dots \dots 3.6$$

$$E_{HC} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}) \cdot P \cdot M_{HC} \cdot HC_{\%} \cdot 10^{-6}}{T_a \cdot R} \dots \dots \dots 3.7$$

$$E_{NOx} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}) \cdot P \cdot M_{NOx} \cdot NOx_{\%} \cdot 10^{-6}}{T_a \cdot R} \dots \dots 3.8$$

$$E_{CO_2} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}) \cdot P \cdot M_{CO_2} \cdot CO_{2\%} \cdot 10^{-2}}{T_a \cdot R} \dots \dots 3.9$$

$$E_{O_2} = \frac{(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}) \cdot P \cdot M_{O_2} \cdot X_{O_2\%} \cdot 10^{-2}}{T_a \cdot R} \dots \dots 3.10$$

donde:

\dot{m}_{aire} = flujo de masa de aire ($\frac{g}{s}$)

\dot{m}_{comb} = flujo de masa de combustible ($\frac{g}{s}$)

P = Presión ambiental (atm)

T_a = temperatura en el tubo de escape (K)

R = constante universal de los gases ideales ($0,08206 \frac{atm \cdot L}{K \cdot mol}$)

M_{CO} = masa molecular de CO (g/mol)

$CO_{\%}$ = porcentaje promedio de las emisiones de CO

M_{HC} = masa molecular de HC (g/mol)

$HC_{\%}$ = porcentaje promedio de emisiones de HC (g/mol)

M_{NOx} = masa molecular de NOX (g/mol)

$NOx_{\%}$ = Porcentaje promedio de NOx (%)

M_{CO_2} = masa molecular de CO2 (g/mol)

$CO_{2\%}$ = porcentaje promedio de CO2

M_{O_2} = masa molecular de O2 (g/mol)

$O_{2\%}$ = porcentaje promedio de O2

En general, las emisiones promedio sobre el circuito fueron expresadas en g/km a partir de los resultados obtenidos desde la ecuación 3.6 hasta la ecuación 3.10. La ecuación para determinar dichos resultados se muestra a continuación:

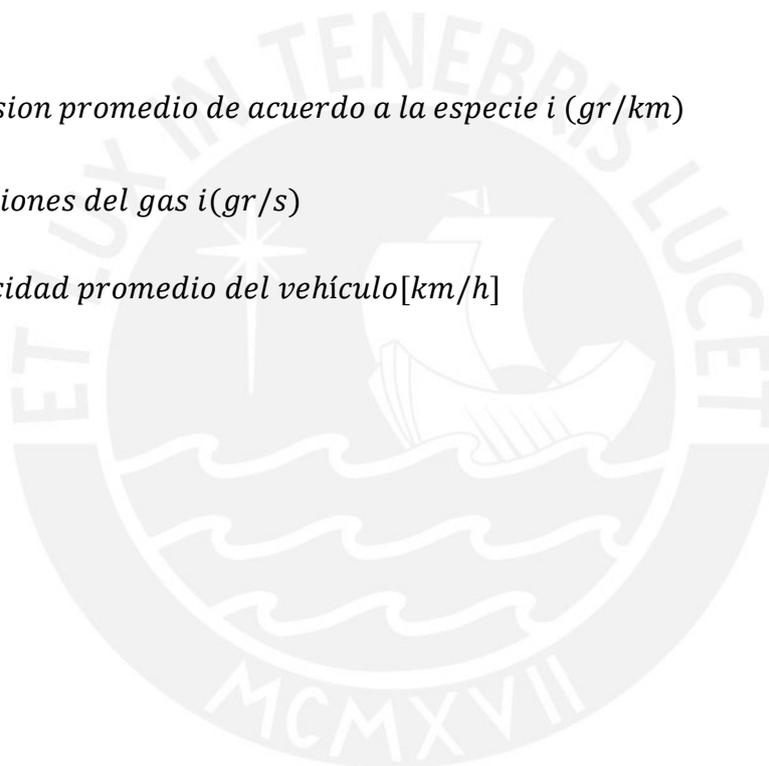
$$\bar{E}_i = \frac{3600 * \sum E_i}{\sum v} \dots\dots\dots 3.11$$

donde:

\bar{E}_i = *emision promedio de acuerdo a la especie i (gr/km)*

E_i = *emisiones del gas i (gr/s)*

v = *velocidad promedio del vehículo [km/h]*



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo son presentados los resultados obtenidos durante las campañas de prueba en las ciudades de Lima y Cusco. En la ciudad de Lima Metropolitana se realizaron cuatro pruebas: las dos primeras fueron realizadas usando combustible comercial E7,8 (7,8% de etanol y 92,2% de gasolina del volumen total), las cuales fueron denotadas como PL1 y PL2; mientras que las dos últimas pruebas se realizaron con la mezcla E10 (10% de etanol y 90% de gasolina del volumen total) y denotas como PL3 y PL4 respectivamente. En la ciudad de Cusco, se realizaron ocho pruebas: las cuatro primeras fueron realizadas con la mezcla E7,8 e identificadas como PC1, PC2, PC3 y PC4. Las cuatro últimas pruebas fueron realizadas con la mezcla E10 e identificadas con PC5, PC6, PC7 y PC8.

La Tabla 4.1 y Tabla 4.2 muestran los diversos instantes de tiempo en los que se iniciaron y culminaron las pruebas, así como la duración de cada una de ellas y las respectivas condiciones ambientales durante el desarrollo de estos ensayos. Además, en ambas tablas, la columna denominada “observaciones” destaca aquellas pruebas en Lima y Cusco que se desarrollaron con mayor o menor condición de tráfico.

Respecto a las condiciones ambientales conforme se mencionan en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, los valores promedios de presión temperatura y humedad relativa fueron 1,005 bar, 22 °C y 87,5 % para la campaña de Lima; y 0,672 bar, 12,75 °C y 39% para la campaña de Cusco.

Tabla 4.1. Cronograma y datos meteorológicos de la campaña en Lima.

Combustible	Prueba	Fecha	Inicio de la Prueba	Fin de la Prueba	Duración de la Prueba	Condiciones del medio ambiente*			Observaciones
						Presión	Temperatura	Humedad relativa	
E7,8	PL1	01/10/2015	06:05 p.m.	07:02 p.m.	57 min	1.005	20	90	Mayor tiempo
	PL2	01/10/2015	11:02 a.m.	11:50 a.m.	48 min	1.005	20	90	
E10	PL3	21/10/2015	12:16 p.m.	01:03 p.m.	44 min	1.005	24	85	Menor tiempo
	PL4	21/10/2015	05:30 p.m.	06:20 p.m.	50 min	1.005	24	85	
				Promedio	49 min	1.005	22	87.5	

Tabla 4.2. Cronograma y datos meteorológicos de la campaña en Cusco.

Combustible	Prueba	Fecha	Inicio de la Prueba	Fin de la Prueba	Duración de la Prueba	Condiciones del medio ambiente*			Observaciones
						Presión	Temperatura	Humedad relativa	
E7,8	PC1	30/10/2015	08:38 p.m.	09:22 p.m.	44 min	67.194	15	35	
	PC2	30/10/2015	09:32 p.m.	10:14 p.m.	42 min	67.194	15	35	
	PC3	31/10/2015	07:48 a.m.	08:37 a.m.	49 min	67.194	10	37	
	PC4	31/10/2015	09:37 a.m.	10:31 a.m.	54 min	67.194	15	45	
E10	PC5	31/10/2015	04:38 p.m.	05:35 p.m.	57 min	67.194	15	45	
	PC6	31/10/2015	05:48 p.m.	06:54 p.m.	66 min	67.194	15	45	Mayor tiempo
	PC7	01/11/2015	05:43 a.m.	06:16 a.m.	33 min	67.194	10	35	Menor tiempo
	PC8	01/11/2015	06:32 a.m.	07:05 a.m.	33min	67.194	10	35	Menor tiempo
				Promedio	47.5 min	67.194	13.1	39	

* SEANAMHI [25]

Para una mejor presentación de los resultados, inicialmente se mostrarán los resultados obtenidos en la ciudad de Lima Metropolitana y luego los obtenidos en Cusco. Posteriormente se realiza una comparación entre los resultados de ambas ciudades.

4.1. Resultado de la campaña de pruebas en Lima Metropolitana.

La Figura 4.1 muestra las velocidades analizadas en la ciudad de Lima. Se puede apreciar que las velocidades presentan varios picos y valles. Esto se debe a que existen aceleraciones y desaceleraciones del vehículo; puesto que, para un tráfico urbano de conducción real existen paradas debido a los semáforos, rompe muelles o simplemente debido a eventos inesperados como influencia de algún peatón u otro automóvil.

La primera imagen de la Figura 4.1 (lado izquierdo), muestra los resultados de las dos primeras pruebas en Lima (PL1 y PL2) empleando gasohol comercial (E7, 8), mientras que la segunda imagen (lado derecho) muestra los resultados de las dos pruebas restantes (PL3 y PL4), usando E10.

Se puede observar que el vehículo acelera hasta llegar a picos de 80 km/h (ver PL3 en Figura 4.1). Por otra parte, para un flujo de tráfico ligero (ver PL2 y PL3) entre 1500 y 2300 segundos de PL2, el vehículo desarrolla una velocidad media de 16,26 km/h, debido a que en el trayecto correspondiente solamente existían zonas peatonales y paradas breves por la presencia de rompemuelleres.

Con tráfico medio (PL1 y PL4), se tiene que el periodo de conducción entre 1500 y 2300 segundos de PL1, corresponde a una velocidad media de 5 km/h. También, a partir de la Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Figura 4.1, se confirmó que no existe una diferencia sobresaliente respecto al perfil de velocidades relacionadas al mayor porcentaje etanol en la mezcla con la gasolina.

Sin embargo, en la Figura 4.2 (obtenidas a partir de la Figura 4.1) se aprecia que las velocidades promedio obtenidas durante la campaña en Lima indican que PL1 tiene la menor velocidad promedio (11 km/h), debido al tiempo más prolongado de su recorrido; mientras que las pruebas restantes tuvieron una mayor velocidad promedio recorrida a la menor duración de su trayecto alrededor de 3050 segundos. Por

ejemplo, PL3 con E10, obtuvo la mayor velocidad promedio (19 km/h) en el menor tiempo de estas pruebas (2800 segundos).

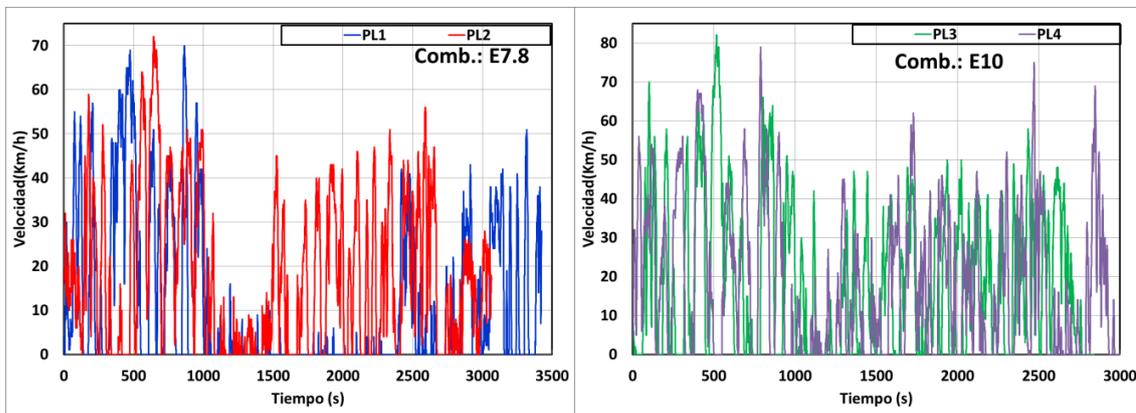


Figura 4.1 - Mediciones de velocidades durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

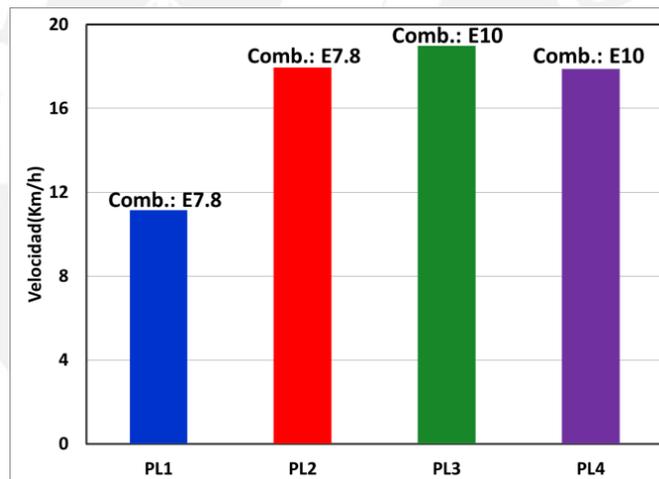


Figura 4.2 - Valores promedio de las medidas de velocidad durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

En la Figura 4.3 se puede observar como varía el factor lambda durante las pruebas en Lima con E7,8 (PL1 y PL2, lado izquierdo) y E10 (PL3 y PL4, lado derecho). Los valores medios de lambda son mostrados en la Figura 4.4.

De la Figura 4.3 se comprueba que independientemente del combustible utilizado, el motor trabajó con mezclas aire-combustible ligeramente pobres ($\lambda > 1$). El comportamiento dinámico del factor lambda resulta de las rápidas divergencias de la mezcla aire-combustible durante los cambios breves de velocidad; sin embargo, para

los cálculos del valor promedio (Figura 4.4), solamente se consideraron válidos los valores instantáneos de lambda hasta 5, acorde al límite de medición del sensor.

En la Figura 4.4, se observa que el factor lambda promedio con E7,8 es levemente mayor con PL1 que PL2. Pero, durante las pruebas ligeramente diferentes con E10 (PL3 y PL4), se verifica que los valores de lambda son ligeramente diferente entre ellos, ya que PL3 y PL4 a pesar de que tienen tiene velocidades promedio similares (ver Figura 4.2), ambas poseen cierta diferencia en el factor lambda promedio.

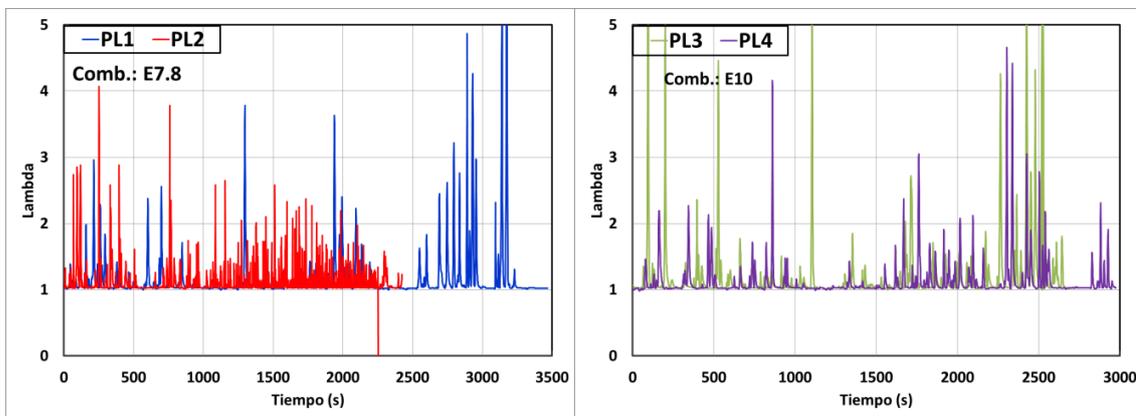


Figura 4.3 - Mediciones del factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

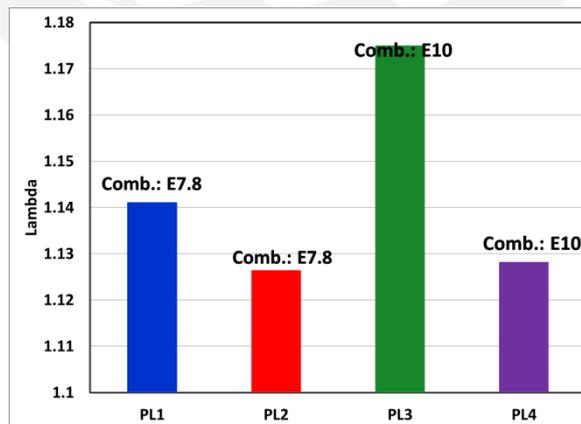


Figura 4.4 - Valores promedios del factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

En la Figura 4.5, se observa que, de modo general, los valores de HC son oscilantes y varían entre 0 y 160 ppm, debido a las constantes paradas y aceleraciones del vehículo durante su trayectoria. No obstante, existe una ligera tendencia a menores

niveles de HC con E10 (entre 0 y 110 ppm), lo cual se confirma al promediar y comparar los resultados de las pruebas (ver Figura 4.6). El valor promedio de PL3 y PL4 fueron equivalentes a 85 ppm y 57 ppm respectivamente, mientras que el promedio de PL1 y PL2 resultó en 50 ppm y 108 ppm

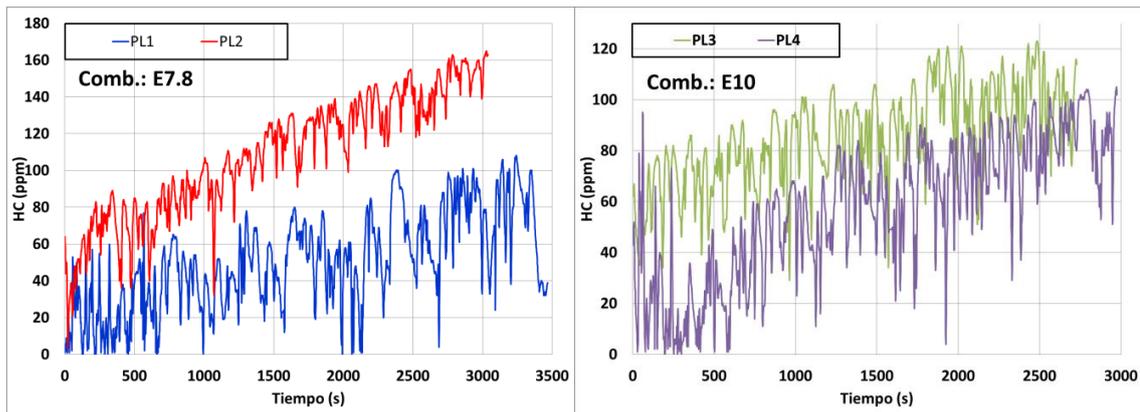


Figura 4.5 - Mediciones de HC durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

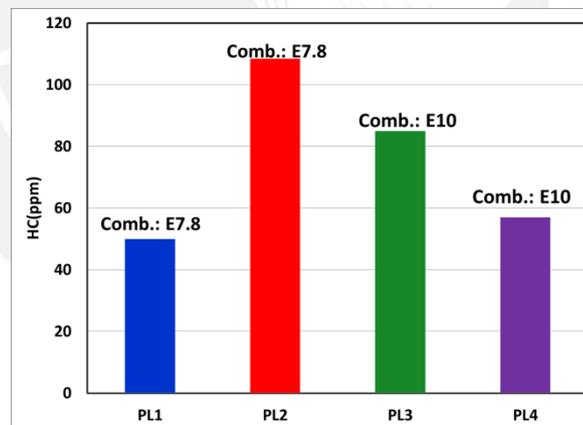


Figura 4.6 - Valores promedios de HC durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

Las emisiones dinámicas de CO se presentan en la Figura 4.7, donde se identifican oscilaciones entre 0 y 1,2% por los cambios de velocidad del vehículo. En la aceleración aumenta el suministro de combustible (mezclas menos pobres), lo cual conlleva al aumento del CO.

La Figura 4.8 nos muestra que las emisiones promedio del CO con E7,8 (PL1 y PL2) fueron menores en comparación a la mezcla E10 (PL3 y PL4). Este hallazgo es

opuesto a los resultados de pruebas de motor en condiciones controladas y estacionarias, donde diversos autores confirman que al aumentar el etanol en la gasolina se reduce las emisiones de CO.

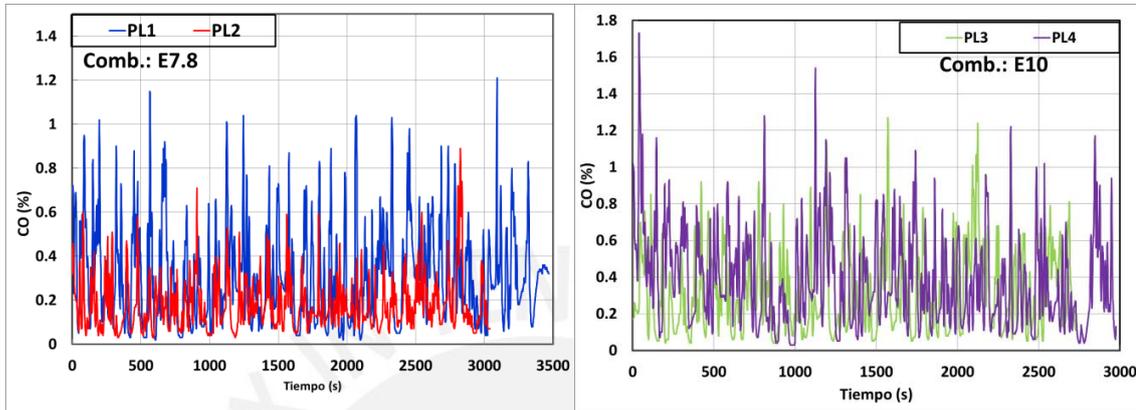


Figura 4.7 - Mediciones de CO durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

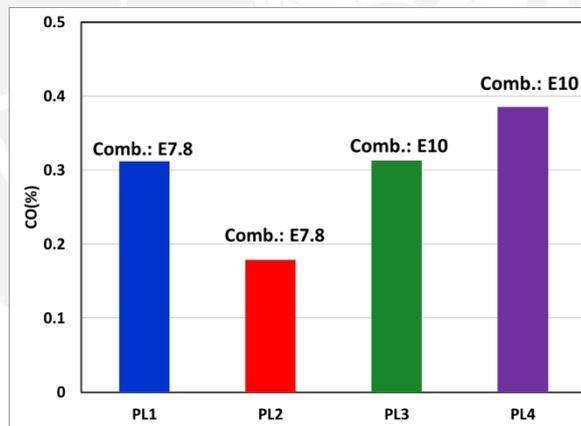


Figura 4.8 - Valores promedios de CO durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

Los resultados de las emisiones de NOx se muestran en la Figura 4.9 y Figura 4.10. Con ambos combustibles (E7,8 y E10), los óxidos de nitrógeno oscilaron entre 1 y 600 ppm, durante el recorrido de las 4 pruebas. Al comparar los valores promedios (Figura 4.10), se verifica que el incremento de etanol en la gasolina aumenta levemente las emisiones de NOx. Por ejemplo, el valor promedio de PL1 y PL2 fue 79 ppm; mientras que la media de PL3 y PL4 resulto igual a 84 ppm.

Las mediciones obtenidas del óxido de nitrógeno son coherentes con las mediciones de hidrocarburos no quemados, ya que al aumentar la cantidad de etanol en la gasolina se incrementaría la temperatura de la combustión (por causa de la mayor velocidad de llama del etanol y la presencia de más oxígeno proveniente del combustible) con lo cual se obtendría una mejor reducción del HC y una mayor formación de NO_x . Sin embargo, la posibilidad de una mayor temperatura de llama no se refleja en la mayor destrucción del CO (Figura 4.7 y Figura 4.8). Por lo tanto, otros estudios deberán tomar en cuenta un mayor número de pruebas para obtener una mejor conclusión acerca de estas aparentes divergencias.

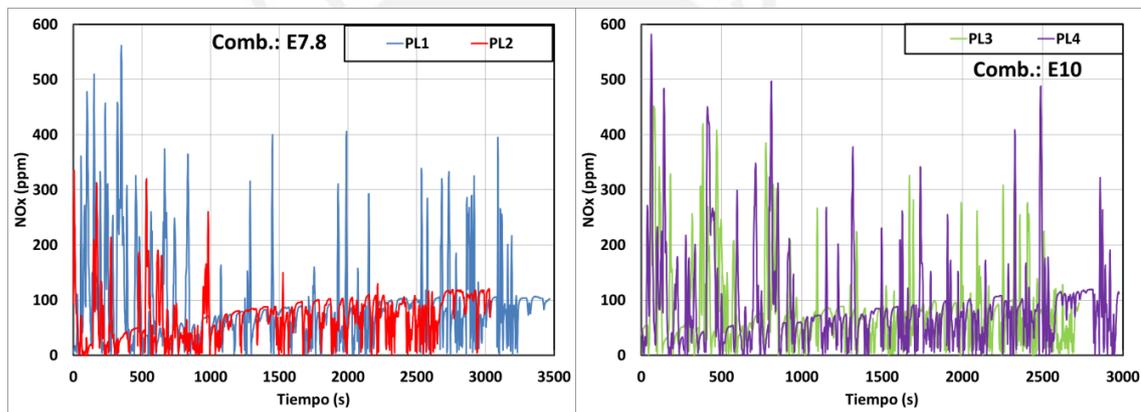


Figura 4.9 - Mediciones de NO_x durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

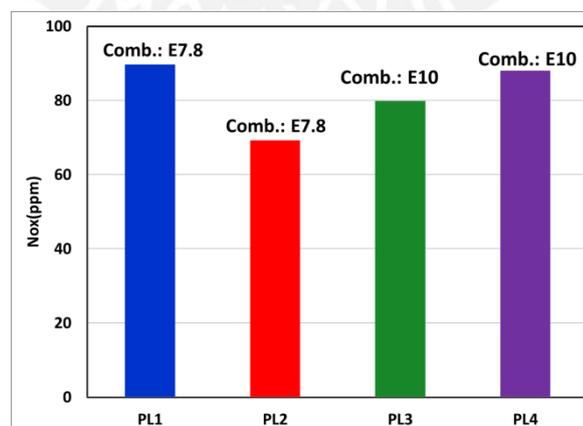


Figura 4.10 - Valores promedios de NO_x durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

La Figura 4.11, nos muestra los resultados de las mediciones dinámicas de CO₂; mientras que sus respectivos valores promedios son expuestos en la Figura 4.12.

De modo general, en la Figura 4.11, no se aprecia diferencia significativa entre los distintos registros de CO₂. Independiente del combustible utilizado (E7,8 y E10), los valores máximos de CO₂ estuvieron alrededor del 15% (Figura 4.11).

Al comparar los resultados promedios de PL2 (E7,8) y PL4(E10) (ver Figura 4.12), los cuales presentaron una velocidad y tráfico urbano bien parecido, verificamos que las emisiones de CO₂ aumentaron 0,4% al usar mayor etanol en la mezcla, lo cual no representa una variación significativa. De igual forma, para las pruebas PL1 (E7,8) y PL3(E10), las emisiones promedio de CO₂ fueron prácticamente iguales.

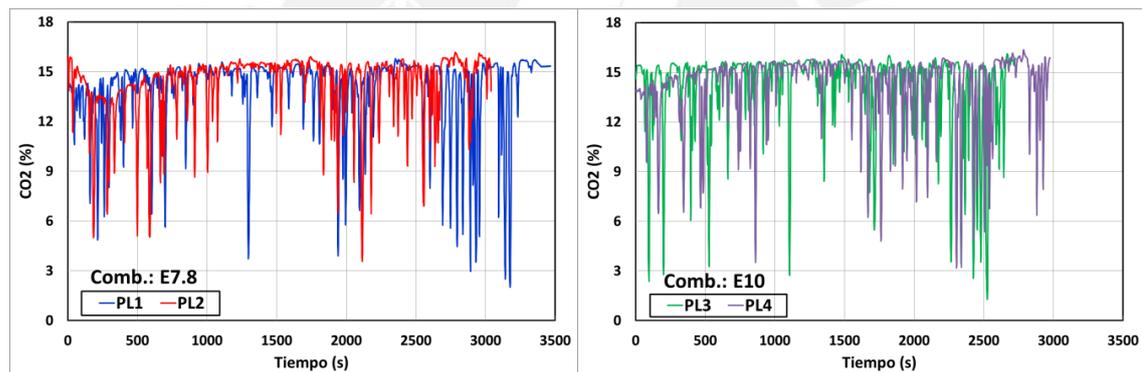


Figura 4.11 - Mediciones de CO₂ durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

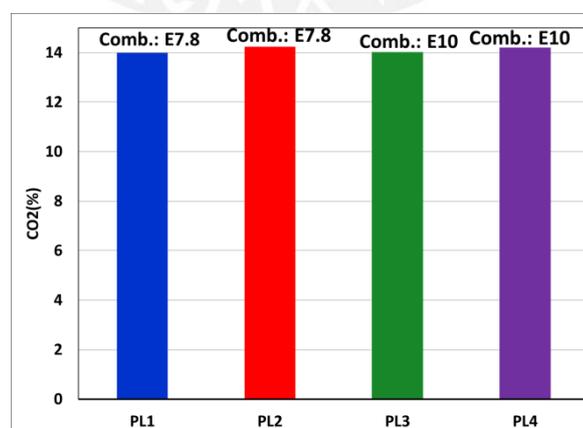


Figura 4.12 - Valores promedios de CO₂ durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

Las mediciones de oxígeno residual en los gases de escape son representadas en la Figura 4.13, así como sus correspondientes valores promedios en la Figura 4.14.

En principio, se nota que las emisiones de O_2 , mostradas en la Figura 4.13, superan en algunos casos el valor de 16%. Estos valores superiores a 16% podrían no ser considerados, ya que podrían estar acompañados de algún ruido en la medición producto de las aceleraciones o movimientos bruscos del vehículo. Además, se puede verificar que, en cada una de las pruebas, los valores superiores al 16% representan un valor inferior al 0,4% de la muestra de datos del O_2 residual.

Una vez más, la explicación se encuentra asociada a las paradas y aceleraciones del vehículo durante el recorrido del circuito definido. Por ejemplo, cuando el vehículo se desacelera, se deja de suministrar grandes cantidades de combustible, lo cual hace que la mezcla se empobrezca y aumente el residual de O_2 .

Por otra parte, al comparar los valores promedios del O_2 residual durante las pruebas E7,8 y E10 (Figura 4.14), se aprecia claramente que para la mezcla E10 hay un mayor porcentaje de oxígeno residual; esto se debe, como era de esperar, a la presencia de oxígeno contenido en el etanol, el cual es mayor en el caso del E10.

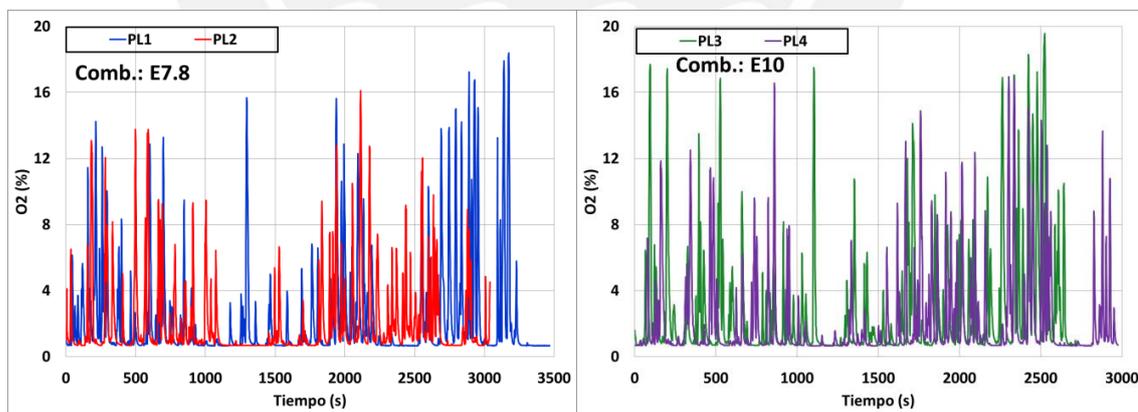


Figura 4.13 - Mediciones de O_2 durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

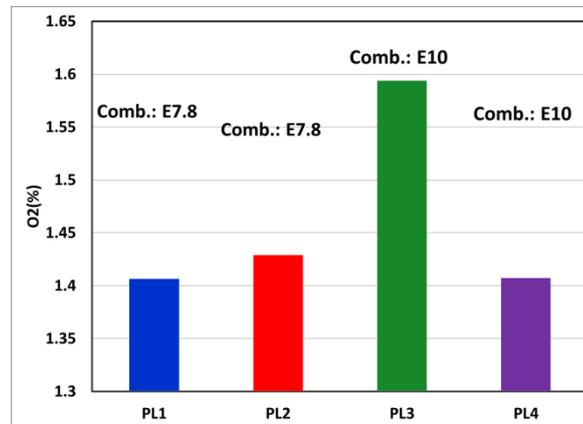


Figura 4.14 - Valores medios de O₂ y factor lambda durante las 4 campañas de prueba en Lima Metropolitana.

Antes de presentar los resultados obtenidos en Cusco recordemos que el vehículo empleado en la ciudad de Cusco fue diferente al utilizado en la campaña de Lima. Por tanto, existen algunos aspectos propios del estado del vehículo, tipo de conducción, así como la calibración de su módulo electrónico que no pueden contabilizarse ni relacionarse con los resultados aquí presentados.

4.2. Resultados de la campaña de prueba en el área metropolitana de Cusco.

En Cusco se realizaron 8 pruebas; sin embargo, en este capítulo se seleccionaron cuatro pruebas como representativas del comportamiento dinámico (PC2, PC3, PC4 y PC8) de esta campaña. Pero en el cálculo de los promedios fueron utilizadas todas las pruebas.

La Figura 4.15 muestra las velocidades analizadas en la ciudad de Cusco respecto al tiempo del trayecto. Los resultados de las dos primeras pruebas de Cusco (PC2 y PC3), empleando gasohol comercial (E7,8), se encuentran en el lado izquierdo de la Figura 4.15, mientras que los resultados de las dos pruebas restantes (PC6 y PC8) usando E10, se encuentran al lado derecho. Al igual que los resultados en la ciudad de Lima; se aprecia que las velocidades muestran varios picos y valles debido a las aceleraciones y desaceleraciones del vehículo debido a la presencia de semáforos, rompemuelleres o algún evento inesperado.

Para un tráfico ligero (PC2 y PC8), se puede observar que el vehículo acelera hasta llegar a picos de 65 km/h (ver PC2). Entre 500 y 1400 segundos de PC8, el vehículo

desarrolla una velocidad promedio de 27,7 km/h, debido a que en el trayecto correspondiente se realizaron paradas por las zonas peatonales y rompemuelles presentes.

En tráficos menos ligeros (PC3 y PC6); se puede observar que durante el periodo de conducción entre 2300 y 3500 segundos, la velocidad promedio de PC6 fue de 5 km/h.

En la Figura 4.16, se muestran las velocidades promedios obtenidas a partir de la Figura 4.15. Se observa que PC6 tiene la menor velocidad promedio (9,4 km/h), debido al tiempo más prolongado del recorrido (3800 segundos). En cambio, las pruebas PC2 (2300 segundos) y PC3 (2800 segundos), con un tráfico medianamente ligero tuvieron unas velocidades promedio de 21 km/h y 17 km/h respectivamente. Así mismo, la prueba con un tráfico bien ligero (PC8) duró 1850 segundos obteniendo la mayor velocidad promedio (26,7 km/h).

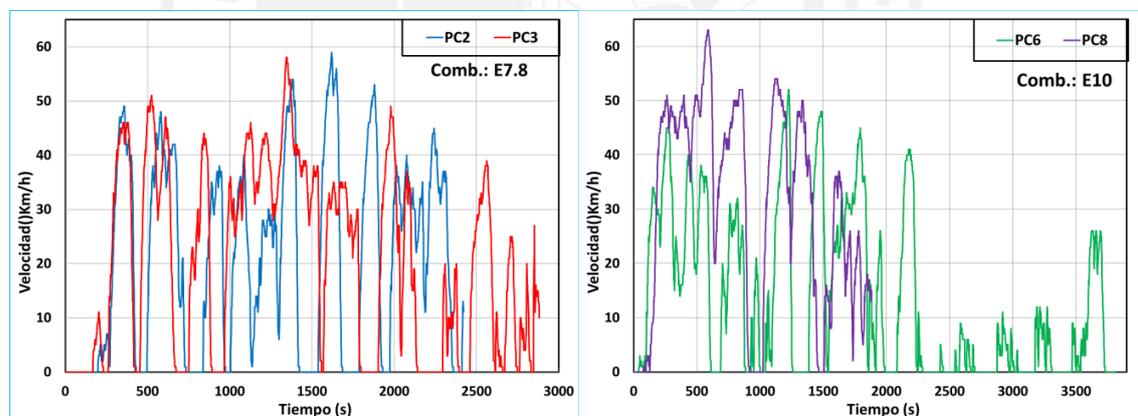


Figura 4.15 - Mediciones de velocidad durante las 8 campañas de prueba en Cusco.

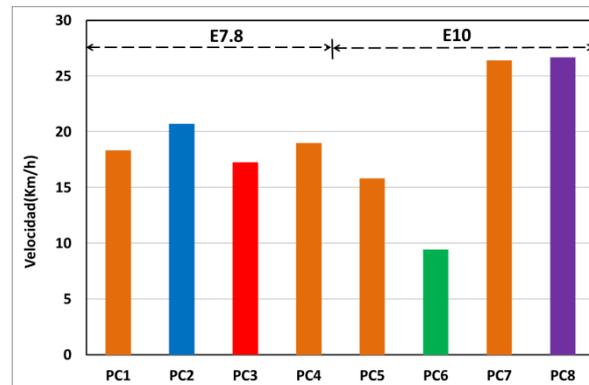


Figura 4.16 - Valores promedios de la velocidad durante las 8 campañas de prueba en Cusco.

En la Figura 4.17 se muestra las medidas del factor lambda durante el trayecto de las pruebas en Cusco, utilizando E7,8 (PC2 y PC3, lado izquierdo) y E10 (PC6 y PC8, lado derecho); mientras que en la Figura 4.18, se presentan los respectivos valores promedios del factor lambda.

Independientemente del combustible utilizado, y análogo a los resultados obtenidos en Lima se verifica que, en general, el motor trabajó con mezclas aire-combustible ligeramente pobres ($\lambda > 1$).

En la Figura 4.17, se puede apreciar que el factor lambda presenta bastantes picos, lo que significa que la mezcla aire-combustible se adaptó continuamente a las condiciones de conducción del vehículo y los requerimientos del catalizador de escape. Además, se puede observar que el factor lambda no baja de 1,05; con excepción a dos instantes de PC2, correspondientes a 1950 y 2050 segundos, donde se presentan fallas a la lectura del sensor. Una vez, esto podría asociarse por algún ruido a causa del movimiento del vehículo.

La presencia de etanol hace que la mezcla aire-combustible sea más pobre y los valores promedio de lambda son representados en la Figura 4.18.

A partir de estos resultados se constata que para las condiciones de altitud en Cusco, el módulo de control del vehículo consigue mantener el factor de lambda promedio por debajo de 1.18. Además, no existe alguna diferencia notoria por el efecto del combustible sobre el factor lambda, ya que la media de los promedios de las pruebas con E7,8 (PC1, PC2, PC3 y PC4) fue 1.143, mientras que con E10 (PC5, PC6, PC7 y

PC8) fue 1.144. Finalmente, se ratifica que durante PC8 se obtuvo el mayor valor promedio de lambda (1,18).

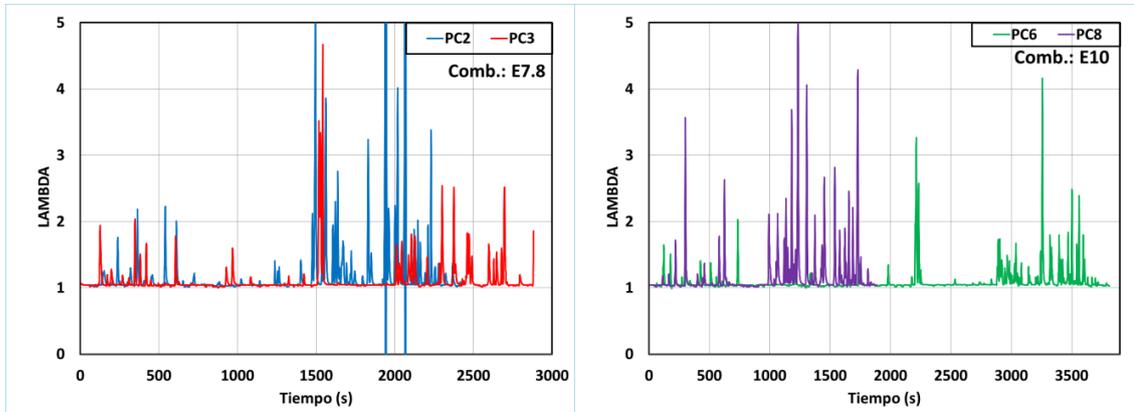


Figura 4.17 - Mediciones del factor lambda durante las 8 campañas de prueba en Cusco.

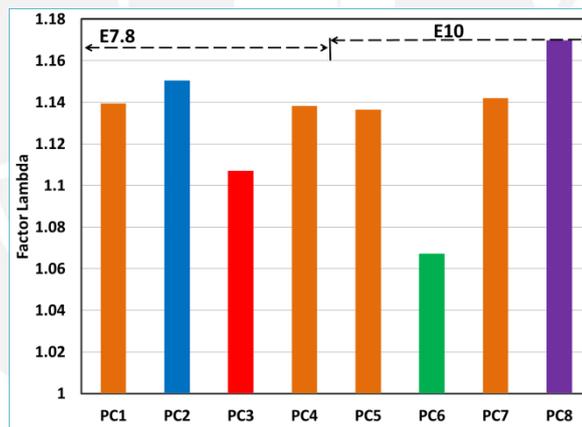


Figura 4.18 - Valores promedios del factor lambda durante las 8 campañas de prueba en Cusco.

Las emisiones de HC, son fluctuantes en el tiempo, variando entre 0 y 119 ppm, como se puede observar en la Figura 4.19. Estas fluctuaciones se asocian a los continuos ajustes del factor lambda, lo que hace que varíe la emisión de hidrocarburos no quemados. La Figura 4.20 muestra los valores promedios de las emisiones de HC, donde se puede observar que ante un mayor tráfico las emisiones de HC son mayores, tal como se puede apreciar en la prueba PC3 (E7,8) y PC6 (E10) con valores promedios de 41 y 75 ppm respectivamente y tiempos de recorrido de 2800 segundos y 3500 segundos.

Se puede apreciar claramente que a mayor contenido de etanol en el gasohol, se obtiene mayor porcentaje de hidrocarburos no quemados. Sin embargo, en los resultados de la campaña desarrollada en Lima se obtuvieron reducciones de HC al usar E10, en comparación al E7,8 (Figuras 4.5 y 4.6). No obstante, se debe tomar en cuenta que en la ciudad de Cusco, la masa del oxígeno atmosférico disminuye, lo cual hace que exista un déficit de oxígeno para la combustión; esta situación no sería compensada con el mayor contenido de etanol en la gasolina. Por lo tanto se justificaría la emisión de una mayor cantidad de combustible no quemado.

Por otro lado, se observa que para un tráfico muy ligero los hidrocarburos tienden a disminuir. Tal es el caso de la comparación entre PC8 y PC6 (el tráfico de PC8 es mayor que el de PC6 mostrada en la Figura 4.15), donde los valores promedio de lambda fueron 1,16 y 1,06 y sus respectivas emisiones de HC fueron 116 ppm y 75 ppm.

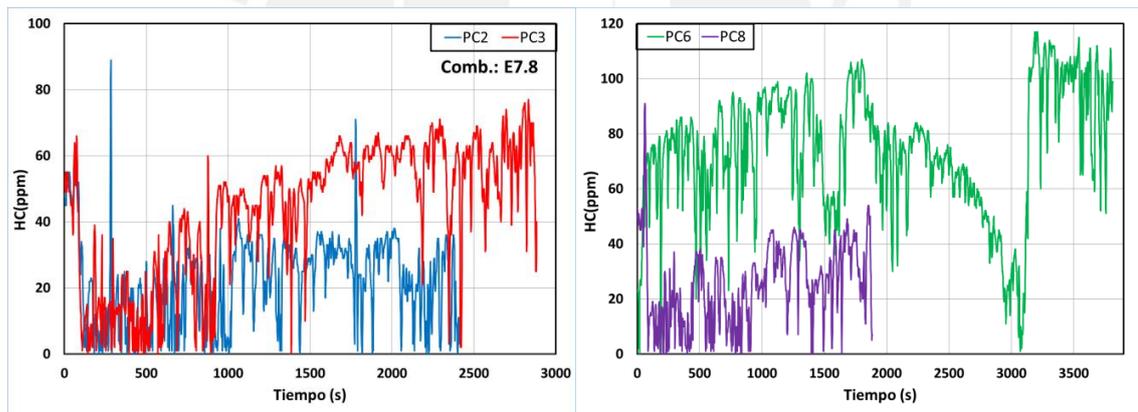


Figura 4.19 - Mediciones de HC durante 4 campañas de prueba en Cusco.

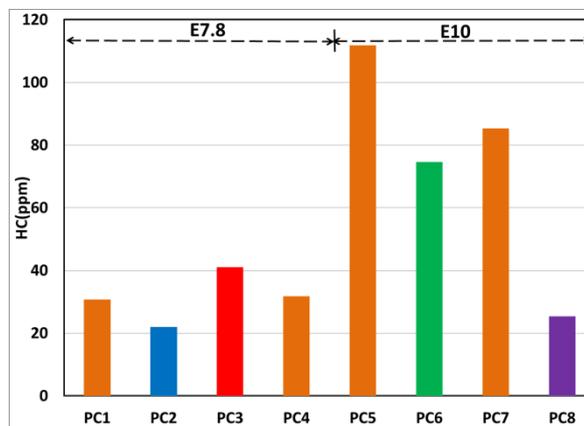


Figura 4.20 - Valores promedios de HC durante 4 campañas de prueba en Cusco.

Las emisiones de CO son presentadas en la Figura 4.21, donde se comprueban que las oscilaciones varían entre 0 y 1,5%.

En la Figura 4.22, se verifica que, al igual que los resultados de HC en Lima, el valor medio de las emisiones promedio del CO con E7,8 (PC1, PC2, PC3 y PC4) fueron menores en comparación a las pruebas realizadas con la mezcla E10 (PC5, PC6, PC7 y PC8). Con E7,8 se obtuvo 0,26% de CO y con E10, 0,32% de CO. Esta diferencia representa un incremento de 10,85 % al añadir en 24,7% el volumen de etanol en la gasolina.

Además se puede comprobar que las emisiones de CO disminuyen en condiciones de mayor tráfico. Por ejemplo, durante PC6 (tráfico menos ligero) se registró un descenso de 13% a comparación de PC8 (tráfico ligero).

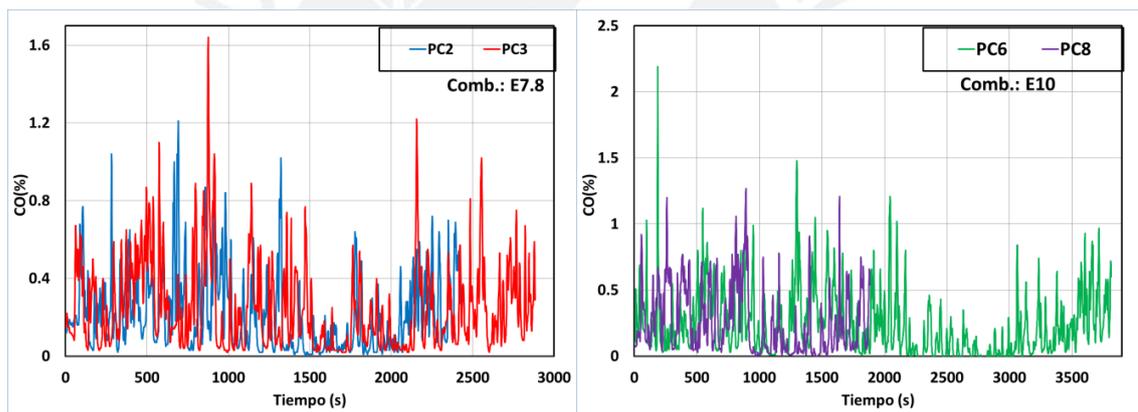


Figura 4. 21 - Mediciones de CO durante 4 campañas de prueba en Cusco.

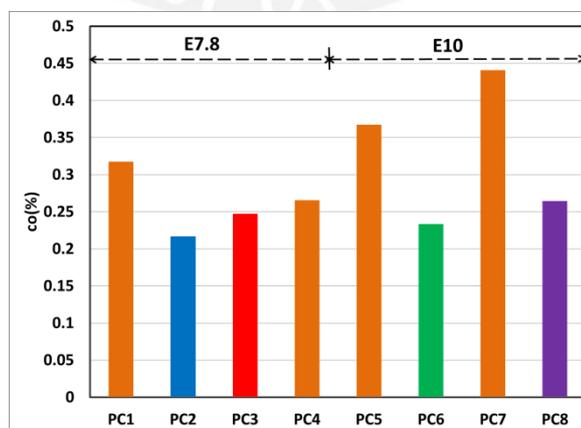


Figura 4.22 - Valores promedio de CO durante 4 campañas de prueba en Cusco.

Las emisiones de NO_x que se muestran en la Figura 4.23, con ambos combustibles (E7,8 y E10). Aquí se observan oscilaciones de los óxidos de nitrógeno entre 1 y 300 ppm durante todo el recorrido de las 4 pruebas demostrativas.

La Figura 4.24 muestran los valores promedios de NO_x , calculados a partir de la Figura 4.23. Al comparar valores medios de los promedios se verifica que para la mezcla E7,8 (PC1, PC2, PC3 y PC4) se registra 123 ppm y para la mezcla E10 (PC5, PC6, PC7 y PC8) se registra 46 ppm. Es decir, la presencia de un mayor porcentaje de etanol en la mezcla del combustible hizo que el valor de NO_x disminuya. Este resultado, en condiciones de manejo en altitud, va acorde a los hallazgos de las tendencias de las emisiones de HC y CO (Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4. 21 y Figura 4.22), puesto que se deduce que la menor concentración de oxígeno en el aire de la combustión reduciría la temperatura de la llama y consecuentemente aumentaría la formación de productos incompletos (HC y CO), con la menor formación de NO_x . Además, este resultado es contrario a los obtenidos en Lima, donde el E10 provocó mayores emisiones de NO_x y menores niveles de HC.

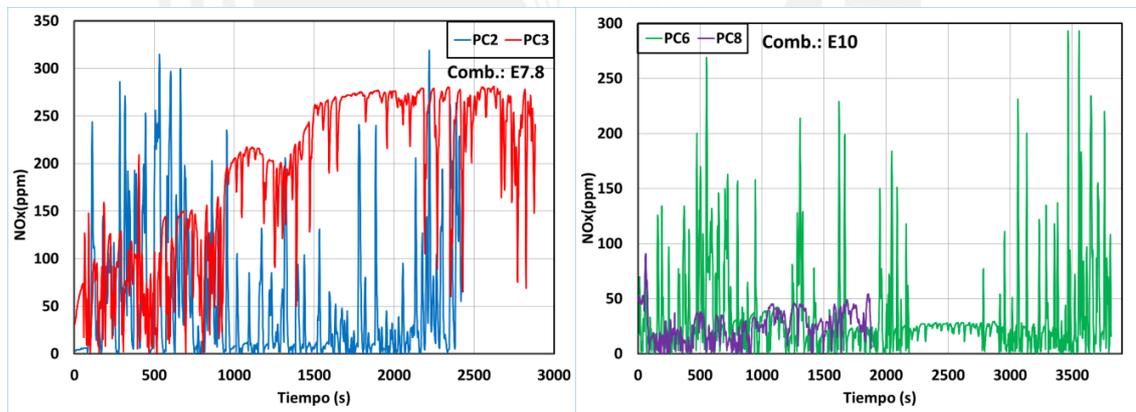


Figura 4.23 - Mediciones de NO_x durante 4 campañas de prueba en Cusco.

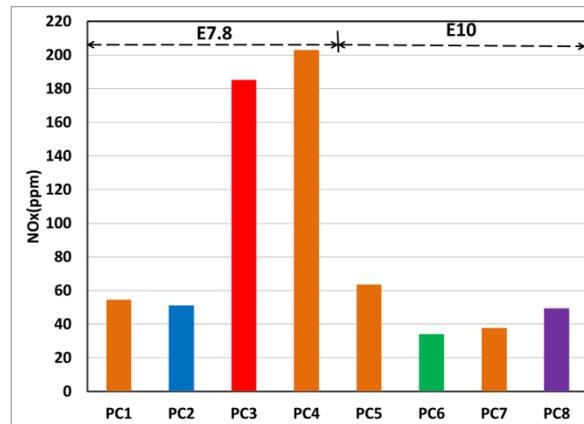


Figura 4.24 - Valores promedio de NO_x durante 4 campañas de prueba en Cusco.

La Figura 4.25 y Figura 4.26 muestran las mediciones de CO₂ y los valores promedios, respectivamente. De modo general, no se aprecia ninguna diferencia significativa en los registros de CO₂, independiente del combustible utilizado (E7, 8 y E10); así mismo se observa que los valores máximos de CO₂ estuvieron alrededor de 15% (ver Figura 4.25).

Las emisiones de CO₂ mostradas en la Figura 4.25 muestran puntos donde disminuye el porcentaje de CO₂ de forma precipitada.

Al comparar los resultados promedios de la mezcla E7,8 y E10 notamos que no hubo mucha diferencia (Figura 4.26); ya que el valor medio de las pruebas con E7,8 fue 13,98 %, mientras que con E10 fue 13,8 %.

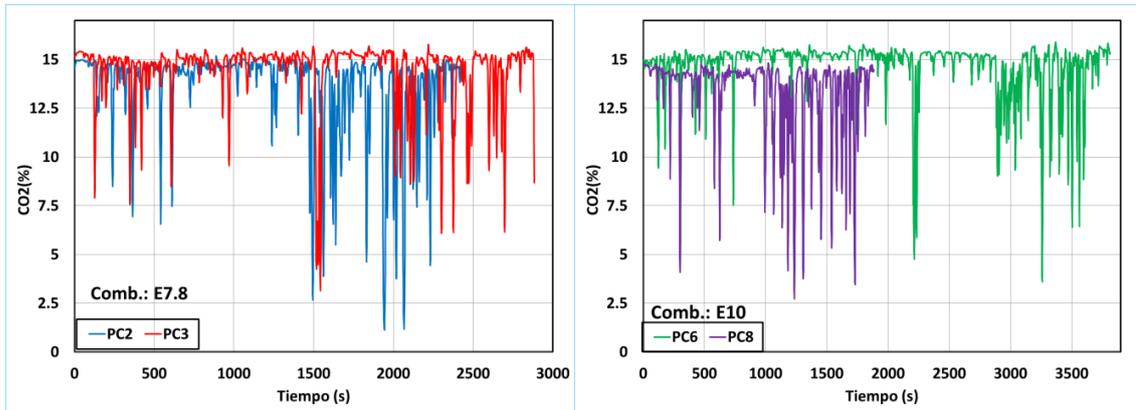


Figura 4.25 - Mediciones de CO₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.

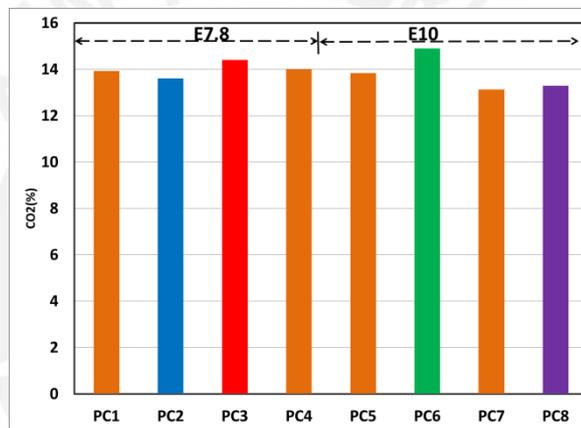


Figura 4.26 - Valores promedios de CO₂ durante 4 campañas de prueba en Cusco.

En la Figura 4.27 se muestran las mediciones de oxígeno residual en los gases de escape, mientras que la Figura 4.28 muestran sus respectivos valores promedios.

Las emisiones del O₂ residual muestran muchas oscilaciones que en algunos casos supera el 16%. Similar al procedimiento del O₂ en el caso de Lima, estos valores picos fueron desconsiderados en el análisis.

Por otro lado, al comparar los valores medios de los promedios del O₂ residual durante las pruebas con E7,8 y E10 (Figura 4.14), se aprecia claramente que para la mezcla E10 (PC5, PC6, PC7 y PC8) hay una ligera disminución en el porcentaje de oxígeno residual de 2% con E7,8 a 1,6% con E10. Esto se debe a que la presencia de oxígeno en el etanol sustituyó parcialmente el déficit de la concentración de oxígeno ambiental. Estudios realizados en Lima y presentados en el apartado 4.1, demuestran que al

aumentar el porcentaje de etanol al gasohol, las emisiones de O_2 se incrementan debido al mayor oxígeno en la composición del etanol. Pero en condiciones de altura esta explicación parece no ser válida.

Además, se observa que a mayor tráfico las emisiones de O_2 disminuyen para las pruebas realizadas con las mezclas E7,8 (-24%, PC2 respecto a PC3 en) y E10 (-45%, PC6 respecto a PC8).

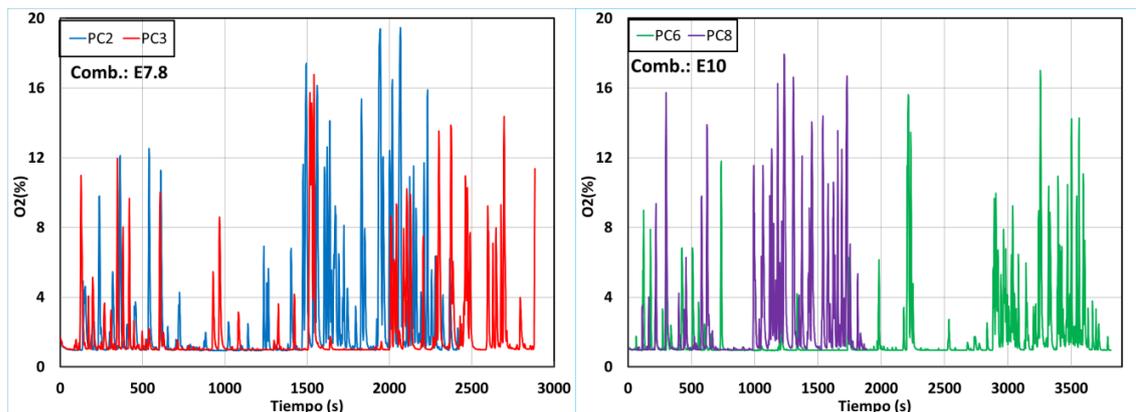


Figura 4.27 - Mediciones de O_2 durante 4 campañas de prueba en Cusco.

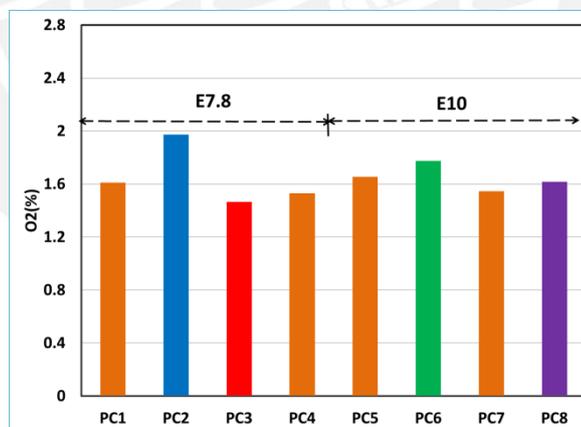


Figura 4.28 - Valores medios de O_2 durante 4 campañas de prueba en Cusco.

4.3. Comparación entre los resultados obtenidos en Lima Metropolitana y Cusco.

La ciudad de Lima que se encuentra a 100 m.s.n.m. y una presión atmosférica de 1 bar. En cambio, la ciudad de Cusco, ubicada a 3400 m.s.n.m., tiene una presión atmosférica de 0.67 bar, con lo cual se reduce a 67% el contenido másico del oxígeno atmosférico. Por tanto, es de esperarse que existan diferencias sobre el consumo de combustible y los índices de emisiones.

4.4. Análisis comparativo del consumo promedio de combustible.

La Figura 4.29 muestra el rendimiento promedio del vehículo en km/l, y se observa que tanto en la ciudad de Lima como en Cusco se registró un aumento de combustible al usar la mezcla E10 con respecto a E7,8; en tal sentido, en Cusco se recorren menos kilómetros por cada litro de combustible consumido.

El incremento del consumo de combustible con E10 respecto al E7,8 fue de +24% en Lima, y +18% en Cusco. Esto se debe al bajo poder calorífico del etanol con respecto a la gasolina (35% menos).

Además, durante las pruebas en la ciudad de Cusco se registró el mayor consumo de combustible con la mezcla E7,8; por este motivo, el consumo promedio de combustible en la ciudad de Cusco fue superior en 17,8 %, a comparación del consumo promedio de combustible en Lima. Para la mezcla E10, también se obtuvo un rendimiento promedio de +10,7% en la ciudad de Lima. Con esto, queda en evidencia el efecto de la presión atmosférica y el porcentaje de oxígeno afectando la economía en el consumo de combustible.

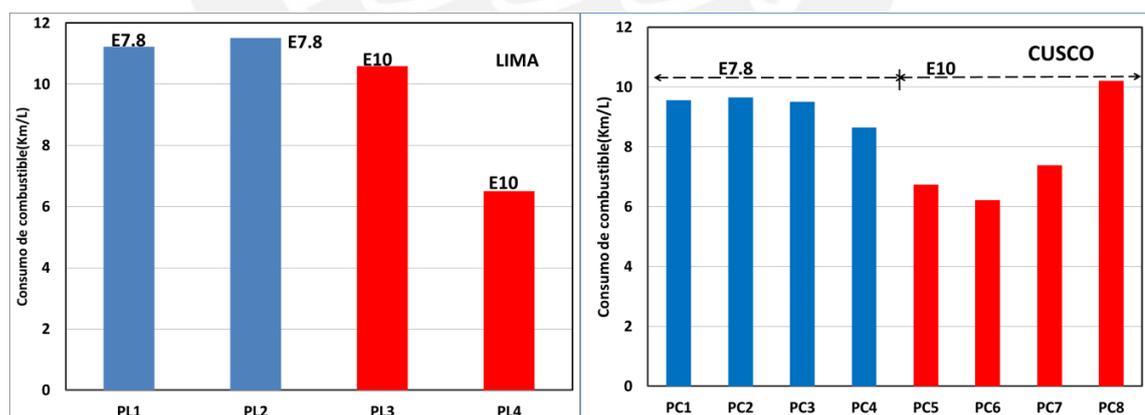


Figura 4.29 - Consumo de combustible obtenidos durante las campañas realizadas en Lima metropolitana y Cusco.

4.3.2. Análisis comparativo de los índices de emisiones

Las planillas que contienen todas las variables medidas y calculadas sobre el índice de emisiones se encuentran detalladas en el Anexo 4.1 y Anexo 4.2.

La Tabla 4.3 y Tabla 4.4 muestran las emisiones en gramos de combustible por kilómetro recorrido tanto para Lima como en Cusco.

Los resultados obtenidos en la ciudad de Lima dan a conocer que los índices de emisiones de CO₂ se incrementan con la mezcla E10 en 11,8 %. Por su parte, en Lima, los índices de emisiones de CO, NO_x y O₂ sufren un gran aumento a causa del mayor contenido de etanol: 55%, 16% y 22,6%, respectivamente; en cambio, los índices de HC aumentaron muy ligeramente su porcentaje (2%) con el aumento de etanol. También se puede deducir, en general, que las emisiones gaseosas y el consumo de combustible se incrementaron con el aumento del tráfico del circuito.

Tabla 4.3. Emisiones de gases productos de la combustión en la ciudad de Lima.

Combustible	Prueba	Emisiones(gr/km)				
		CO ₂	CO	NO _x	HC	O ₂
E7,8	PL1	273.06	3.88	0.13	0.24	30.84
	PL2	195.40	1.56	0.07	0.37	20.52
	Promedio	234.23	2.72	0.10	0.30	25.68
E10	PL3	214.34	3.05	0.09	0.32	29.43
	PL4	311.17	5.38	0.14	0.31	34.03
	Promedio	262.76	4.21	0.11	0.31	31.73

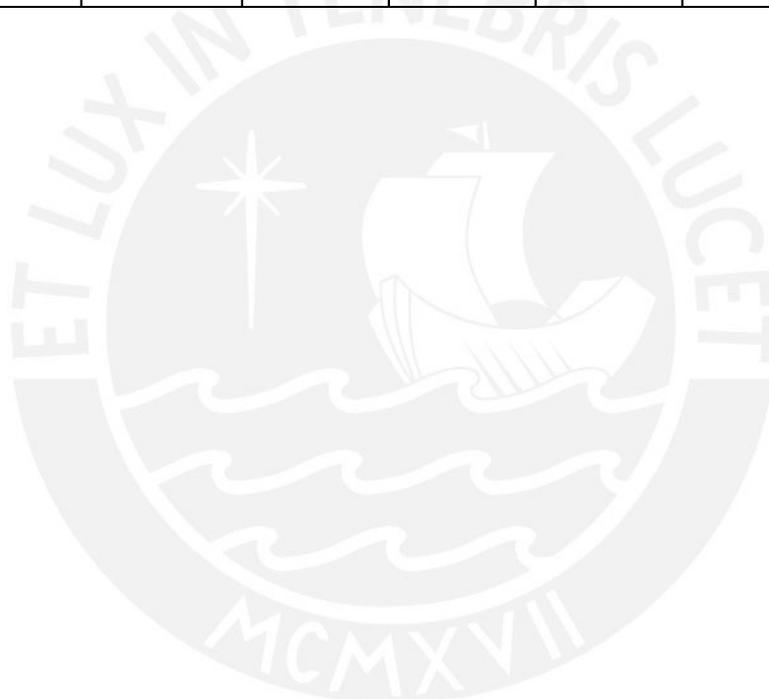
La Tabla 4.4 muestra las emisiones gaseosas del vehículo, en gramos por kilómetro, obtenidas en Cusco. Se puede observar que a mayor contenido de etanol en la mezcla, los índices de las emisiones de CO₂, CO, HC y O₂ aumentaron en 32,4%, 67,2%, 230% y 16% respectivamente; mientras que el índice de las emisiones de NO_x disminuyó en 50,6%.

Por otra parte, es importante destacar que la PC8 fue la prueba que duró menos tiempo y donde se observó que los índices fueron menores; del mismo modo que en la ciudad de Lima, los índices de emisiones, en Cusco, aumentaron de acuerdo al incremento del tráfico.

En general, comparando la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4 observamos que los índices de emisiones gaseosas disminuyeron en la ciudad de Cusco, con respecto a Lima. Esto se debe principalmente a la menor presión atmosférica, la cual influye directamente en el cálculo de este parámetro (ver ecuación 3.5).

Tabla 4.4. Emisiones de gases productos de la combustión en la ciudad de Cusco.

Combustible	Prueba	Emisiones(gr/km)				
		CO ₂	CO	NO _x	HC	O ₂
E7.8	PC1	163.51	2.37	0.05	0.09	18.13
	PC2	148.03	1.50	0.04	0.06	17.27
	PC3	155.76	1.66	0.14	0.11	13.07
	PC4	142.01	1.71	0.15	0.08	14.66
	Promedio	152.33	1.81	0.09	0.08	15.78
E10	PC5	300.28	3.12	0.06	0.38	19.51
	PC6	173.15	3.42	0.05	0.37	17.40
	PC7	127.72	3.70	0.04	0.28	19.90
	PC8	157.09	1.62	0.03	0.06	15.42
	Promedio	189.56	2.96	0.05	0.27	18.06



Conclusiones

Los ensayos fueron realizados en Lima y Cusco utilizando dos vehículos de la marca Kia y modelo Rio, los cuales funcionaban con motor de encendido por chispa. Se utilizó dos mezclas de gasolina y etanol: E7,8 y E10. De los resultados obtenidos, en el capítulo cuatro, se concluye lo siguiente:

- Los circuitos de conducción de Lima y Cusco desarrollaron una distancia similar (aproximadamente 14 km) con condiciones de tráfico más ligero en el caso de Cusco.
- Los perfiles de velocidad de los vehículos presentaron picos de hasta 80 km/h; sin embargo, las velocidades promedio, considerando E7,8 y E10, fueron 16,5 km/h y 19,2 Km/h en Lima y Cusco, respectivamente.
- El factor lambda promedio con E7,8, aumentó levemente en 0,27% en Cusco, respecto al valor promedio obtenido en Lima. En cambio, con E10, disminuyó 2,3%. Esta pequeña diferencia está asociado al menor contenido de oxígeno en altura y a las características internas de la calibración de cada uno de los motores.
- La emisiones promedio de HC, al usar E7,8, fueron 79 ppm y 31 ppm en Lima y Cusco respectivamente; mientras que con E10 fueron 71 ppm y 74 ppm.
- La emisiones promedio de CO, al usar E7,8, fueron 0,24% y 0,26% en Lima y Cusco respectivamente; mientras que con E10 fueron 0,35% y 0,28% en Lima y Cusco.
- Las emisiones de NO_x, en Cusco y Lima, variaron de acuerdo a la mezcla E7,8 (123ppm en Cusco y 79 ppm en Lima) y E10 (46ppm en Cusco y 84 ppm en Lima).
- Las emisiones de CO₂ no sufrieron mucha variación en Lima y Cusco para las mezclas E7,8 (14,1% en Lima y 13,9% en Cusco) y E10 (14,11% en Lima y 13,8% en Cusco).
- La emisiones promedio de O₂ residual, al usar E7,8, fueron 2,1% y 2,2% en Lima y Cusco respectivamente; entretanto, con E10 fueron 2,4% y 2,1%.
- De modo general, el consumo promedio de combustible aumento a medida que se incrementó el porcentaje de etanol en la mezcla, sin embargo, el tráfico

juega un rol muy importante en este parámetro de desempeño. Además, el factor altura influye en el mayor consumo de combustible.

- Los índices de emisiones, calculados en gramos por kilómetro, se asemejan a las emisiones promedio instantáneas, pero difieren en las proporciones de Lima y Cusco (mayor en Lima), ya que el cálculo de estos índices toma en cuenta distintos aspectos que influye en las emisiones como la humedad relativa, la temperatura y principalmente la presión atmosférica.
- Es válido utilizar la mezcla E10 como sustituyente de la mezcla E7,8 con una penalidad aceptable en el rendimiento del vehículo (mayor consumo), pero con bajas emisiones de NO_x , independientemente de las condiciones de altitud en la que funcionó el vehículo.



Recomendaciones

- Estudios posteriores podrían realizar pruebas con un mismo vehículo tanto en costa como en altura y con un mismo conductor.
- Se podría hacer más estudios de los efectos de la mezcla E10 sobre el E7,8 en vías libres como las carreteras.
- Se recomienda utilizar una gama más amplia de vehículos de acuerdo a sus diversas características como antigüedad, modelo y si son con sistemas de inyección electrónica o carburados.
- Se recomienda ver los efectos del etanol usando variables como la humedad relativa y las condiciones ambientales a diversas épocas del año.
- 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

- [1] **INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA**
2012 Parque automotor en circulación a nivel nacional
- [2] **JULIO CESAR CUISANO EGUSQUISA**
2015 Guía de clase de motores: Combustión
- [3] **FUNDACIÓN SUIZA DE COOPERACIÓN PARA EL DESARROLLO TÉCNICO**
2001 Revisión Técnica de Vehículos Límites Máximos Permisibles de Emisiones
- [4] **WORLD WIDE FUEL CHARTER**
2009 ETHANOL GUIDELINES
- [5] **GIANCARLO JESUS TIPIAN TIPIAN**
2015 análisis experimental del uso de mezclas etanol-gasolina en motores de encendido por chispa
- [6] **DANTE GIACOSA**
1993 Motores endotérmicos
- [7] **RIVAS MEZA VÍCTOR ALFONSO**
2006 Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial.
- [8] **MARIO ROJAS**
2000 combustibles alternativos para el desarrollo de la industria regional
- [9] **PERFIL DE MERCADO Y COMPETITIVIDAD EXPORTADORA DE ETANOL**
2011 <http://www.mincetur.gob.pe/comercio/otros/penx/pdfs/Etanol.pdf>
- [10] **LUIS AGUSTO HORTA NOGUEIRA**
2008 Producción de bioetanol

- [10] **ENERGÍAS RENOVABLES PARA TODOS-BIOCARBURANTES**
2011 <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-para-todos-biocarburantes.pdf>
- [11] **BIOETANOL DE CAÑA DE AZUCAR**
2011 <http://www.bioetanoldecanadeazucar.org/es/download/cap2.pdf>
- [12] **GOLDEMBERG, J.; MACEDO, I. C.**
1994 Brazilian alcohol program: an overview. Energy for Sustain.
- [13] **ANDRES MELGAR BACHILLER**
2015 introducción a los motores de combustión interna
- [14] **EDWARD F. OBERT**
1987 Motores de combustión interna
- [15] **INFRARED INDUSTRIES**
1987 ANALIZER MANUAL
- [16] **ALBERTO MENDOZA**
2013 Fuel Economy and Emissions from Light-Duty Vehicles using Ethanol-Gasoline Blends and Hybrid Vehicle under Condition of an Mexican City
- [17] **MARCEL HERNANDEZ**
2014 Fuel Economy and Emissions from Light-Duty Vehicles using Ethanol-Gasoline Blends in a Mexican City.
- [18] **MENCHACA Y MENDOZA**
2013 desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión
- [19] **YUNG-CHEN YAO**

2013 Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol–gasoline blend

[20] HAKAN BAYRAKTAR

2010 Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines

[21] M. I. KARAMANGIL

2013 Experimental investigation of performance and emission improvement by altering ignition timing with use of E10 ethanol blend in SI engine.

[22] YU-LIANG CHEN

2015 Optimization of suitable ethanol blend ratio for motorcycle engine using response surface method

[23] MUSTAFA KOÇ

2009 The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine

[24] MAO-BIN LIU -, BANG-QUAN HE

2014 Effect of air dilution and effective compression ratio on the combustion characteristics of a HCCI (homogeneous charge compression ignition) engine fuelled with n-butanol

[25] INFORMACIÓN DEL TIEMPO Y AGUA

2015 <http://www.senamhi.gob.pe/>