

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL USO DE MEZCLAS ETANOL-GASOLINA EN MOTORES DE ENCENDIDO POR CHISPA

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

GIANCARLO JESÚS TIPIÁN TIPIÁN

ASESOR: JULIO CÉSAR CUISANO EGÚSQUIZA

Lima, 12 de junio del 2015

Resumen

El presente trabajo de tesis realiza un análisis del rendimiento y las emisiones de un motor de encendido por chispa Nissan GA15 trabajando con diferentes mezclas etanol-gasolina, dicho motor es carburado y está instalado en el Laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Asimismo, el motor fue instrumentado adecuadamente, para así, poder registrar los datos necesarios para el respectivo análisis. Los combustibles (mezclas etanol-gasolina) fueron ensayados a 3 velocidades y 4 porcentajes de torque. Con los resultados obtenidos después de realizados los ensayos se puede decir que, mientras más se aumente el contenido de etanol en la mezcla, el flujo másico de combustible aumentará, ya que, el etanol tiene un menor poder calorífico que la gasolina, por lo que necesitará quemar más combustible para desarrollar una misma potencia. Por otro lado el rendimiento efectivo del motor aumenta conforme se incrementa la velocidad de giro, esto sin importar cuál sea el combustible utilizado.

Con respecto a las emisiones, se observa una gran disminución en las cantidades de CO (50% en algunos casos), ya que al existir mayor cantidad de oxígeno en la composición del etanol, resultará una combustión menos incompleta dentro del cilindro, con lo que disminuye el HC y CO, y, aumentará el CO₂ y el O₂.



Dedicatoria

A mis padres, Moisés y Janet, como retribución a todo su esfuerzo y apoyo incondicional en todo momento.

A mis hermanas, Regina y Fátima, por el cariño que me tienen.

A Melina, mi compañera, por todo su amor y paciencia.

A mi hijo, Mathías, por alegrar mi vida día a día.

Agradecimientos

Primeramente a Dios, porque a pesar de los momentos difíciles, donde crees que no existe una 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.

Al técnico Yhonattan Rodríguez, por la tremenda ayuda que me brindo para poder realizar los ensayos de la presente tesis.

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.

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

Índice de Contenido

Índice de Tablas.....	vi
Índice de Ilustraciones.....	vii
Lista de Símbolos.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Definición del problema.....	3
I.2 Justificación	4
II. OBJETIVOS.....	5
II.1 Objetivo general.....	5
II.2 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
1.1 GASOLINA.....	6
1.1.1 Definición.....	6
1.1.2 Materia prima	6
1.1.3 Producción	6
1.2 ETANOL.....	7
1.2.1 Definición.....	7
1.2.2 Materia prima	9
1.2.3 Producción	10
1.3 PROPIEDADES DE COMBUSTIBLES.....	11
1.4 MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA.....	13
1.4.1 Definición.....	13
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	17
CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN	32
3.1 PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ETANOL-GASOLINA.....	32
3.2 METODOLOGÍA.....	35
3.3 PROTOCOLO DE ENSAYO.....	41
3.3.1 Registro de variables del motor en banco de pruebas	41
3.3.2 Verificación del banco de pruebas.....	42
3.3.3 Procedimiento de ensayo a plena carga y carga parcial.....	43
3.4 EXPRESIONES PARA CÁLCULO DE PARÁMETROS.....	45
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49

CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70

ANEXOS



Índice de Tablas

Tabla 1.1 - Principales propiedades físico-químicas de los alcoholes y gasolina.....	12
Tabla 2.1 - Combustibles involucrados en el estudio.....	19
Tabla 3.1 - Combustibles involucrados en el ensayo.....	33
Tabla 3.2 - Datos del motor utilizado para los ensayos	36
Tabla 3.3 - Características del analizador de gases	40
Tabla 3.4 - Variables involucradas en los ensayos.....	42



Índice de Ilustraciones

Figura 1.1 - Proceso de reformación catalítica	8
Figura 1.2 - Proceso de obtención de etanol	9
Figura 1.3 - Ciclo termodinámico teórico de un motor de encendido por chispa	14
Figura 1.4 - Etapas del ciclo termodinámico del motor	16
Figura 2.1 - Torque efectivo (M_e) versus rpm	21
Figura 2.2 - Potencia efectiva (N_e) versus rpm.....	21
Figura 2.3 - Consumo específico de combustible (g_e) versus rpm	22
Figura 2.4 - Emisiones de CO versus rpm.....	23
Figura 2.5 - Torque efectivo versus apertura de válvula de admisión	26
Figura 2.6 - Consumo específico de combustible versus apertura de válvula de admisión	27
Figura 2.7 - Emisiones versus factor lambda.....	28
Figura 2.8 - Par motor versus RPM.....	29
Figura 2.9 - CEC versus RPM	30
Figura 3.1 - Probetas graduadas y recipiente de 5 galones utilizados para la preparación y almacenamiento de las mezclas	32
Figura 3.2 - Tanques conteniendo los diferentes combustibles, montados en la balanza antes de iniciar los ensayos	34
Figura 3.3 - Esquema del banco de pruebas utilizado para los ensayos	35
Figura 3.4 - Dinamómetro instalado en el banco de pruebas	36
Figura 3.5 - Motor Nissan GA15 instalado en el Laboratorio de Energía	37
Figura 3.6 - Registrador de datos marca Yokogawa.....	38
Figura 3.7 - Sistema usado para la medición del consumo de combustible	39
Figura 3.8 - Sistema usado para la medición del consumo de aire	39
Figura 3.9 - Manómetro digital Dwyer e higrómetro.....	40
Figura 3.10 - Sistema usado para la medición de emisiones	41
Figura 3.11 - Panel de control del motor Nissan	43
Figura 3.12 - Esquema referencial de la matriz de ensayos “Torque x rpm”	44
Figura 4.1 - Torque versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	50
Figura 4.2 - Potencia observada versus RPM diferentes mezclas gasolina-etanol	51
Figura 4.3 - Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina - etanol	52

Figura 4.4 - Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	53
Figura 4.5 - Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	53
Figura 4.6 - Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	55
Figura 4.7 - Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	56
Figura 4.8 - Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	56
Figura 4.9 - Factor lambda versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	57
Figura 4.10 - Factor lambda versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	58
Figura 4.11 - Factor lambda versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	58
Figura 4.12 - Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	59
Figura 4.13 - Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	59
Figura 4.14 - Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	60
Figura 4.15 - Rendimiento efectivo a plena carga versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	60
Figura 4.16 - Consumo específico de combustible versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	61
Figura 4.17 - Rendimiento volumétrico versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	63
Figura 4.18 - CO versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	64
Figura 4.19 - CO ₂ versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....	65
Figura 4.19 - HC versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol	66

Figura 4.20 - O_2 versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.....67



Lista de Símbolos

A	Área de la placa orificio [m^2]
C	Carbono
cec	Consumo específico de combustible [g/kW.h]
CH ₂ O	Formaldehído
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono [%]
CO ₂	Dióxido de carbono [%]
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₆ H ₆	Benceno
C _d	Coefficiente de descarga en la placa orificio [0.6]
C _n H _{2n}	Hidrocarburos saturados de cadena cerrada
C _n H _{2n+2h}	Hidrocarburos saturados de cadena abierta
C _n H _{2n-6}	Hidrocarburos aromáticos
d _{placa}	Diámetro de la placa orificio [m]
ETBE	Etil-tert-butil-eter
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
FFV	Vehículos flexibles
FSI	Sistema de inyección directa
GC	Grado de carga

GLP	Gas licuado de petróleo
GNV	Gas natural vehicular
H	Hidrógeno
HC	Hidrocarburos [ppm]
iB	Isobutanol
iB (14)	Combustible contiene 14% de isobutanol y 86% de gasolina en volumen
iB (21)	Combustible contiene 21% de isobutanol y 79% de gasolina en volumen
MECH	Motor de encendido por chispa
MPFI	Sistema variable que controla apertura de válvulas de admisión
MTBE	Metil-ter-butyl-eter
$m_{aireref}$	Flujo másico de aire a unas condiciones de referencia [kg/s]
\dot{m}_{aire}	Flujo másico de aire [kg/s]
\dot{m}_c	Flujo másico de combustible [kg/s]
\dot{m}_e	Flujo másico de etanol correspondiente a la mezcla [g/h]
\dot{m}_g	Flujo másico de gasolina correspondiente a la mezcla [g/h]
n	Régimen de giro [rpm]
nB	N-butanol
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno [%]
ON	Número de octano
p _{me}	Presión media efectiva [bar]
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
P _{atm}	Presión atmosférica [kPa]
P _e	Potencia efectiva [kW]
PCI _e	Poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg]
PCI _g	Poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg]
R	Bio-hidrocarburos renovables
RPM	Revoluciones por minuto
R _{aire}	Constante del aire ambiente [0.287 kJ/kg.K]
T	Torque [N.m]
T _{amb}	Temperatura del aire ambiente [°C]
V _{aire}	Velocidad del aire en la placa orificio [m/s]
V _t	Volumen total desplazado o cilindrada del motor [m ³]

\dot{V}_{aire}	Flujo volumétrico de aire [m^3/s]
\dot{V}_e	Flujo volumétrico del etanol [m^3/h]
\dot{V}_g	Flujo volumétrico de la gasolina [m^3/h]
\dot{V}_T	Flujo volumétrico total de la mezcla [m^3/h]
W_e	Trabajo efectivo del motor [kJ]

Suscritos a letras griegas

i	Número de ciclos por vuelta [motor de 4 tiempos, $i = 0,5$]
η_e	Rendimiento efectivo [%]
η_v	Rendimiento volumétrico [%]
ρ_{aire}	Densidad del aire ambiente [kg/m^3]
ρ_e	Densidad del etanol [kg/m^3]
ρ_g	Densidad de la gasolina [kg/m^3]
λ	Factor lambda
ΔP_{aire}	La diferencia de presión a través de la palca orificio [kPa]

I. Introducción

En los últimos años el Perú ha tenido un saldo deficitario en cuanto a la producción de hidrocarburos, debido, principalmente, a la incesante reducción de la producción nacional y la baja calidad de nuestras reservas, por este motivo el país se ve en la obligación de importar los crudos livianos y productos derivados de alto valor comercial como la gasolina y el diesel [1].

En el país tenemos una demanda de petróleo y de productos derivados que equivalen a 200 mil barriles diarios para abastecer nuestro consumo interno. Sin embargo, la producción nacional es de 65 mil barriles diarios de petróleo (33% de la demanda total); es decir, importamos cerca de 135 mil barriles. Es importante mencionar que en las refinerías nacionales, cuando se procesa el crudo, se obtienen también otros productos excedentes como las gasolinas de bajo octanaje (70 octanos) y los residuales. Esos productos se exportan porque su producción es mayor a la demanda requerida. Por este motivo importamos gasolinas de mayor octanaje para satisfacer nuestra demanda, sobre todo en el sector vehicular que es donde más se requiere este combustible [2].

Entre 2008-2012 el Perú ha importado aproximadamente US\$ 20 mil millones (aproximadamente S/. 52 mil millones) en crudo, diésel, gasolinas y gas licuado de petróleo. Además, siendo que en el año 2012, la importación del petróleo le costó al país cerca de US\$ 5 mil millones (considerando una cotización de US\$100/barril), generando un déficit en la balanza comercial de hidrocarburos.

Por otra parte, nuestro país cuenta con diversos combustibles alternativos y/o renovables, destacándose el uso del gas natural, biodiesel y etanol.

En nuestro país, el uso del gas natural destinado al sector de transporte es principalmente utilizado en vehículos ligeros impulsados por motores de encendido por chispa. Muchos de estos vehículos tienen, inclusive, la opción de trabajar en el modo dual; es decir, utilizando su sistema de inyección original a gasolina o empleando el sistema adaptado de inyección de gas. En el caso de vehículos pesados, no existen publicaciones nacionales sobre casos de éxito usando gas natural. Sin embargo, es importante mencionar que el sector de transporte ferroviario ya cuenta con un

ferrocarril impulsado por motores de encendido por compresión que consumen simultáneamente diesel y gas natural comprimido, funcionando en condiciones de altura [3]. Los principales factores que limitarían esta aplicación serían: limitada red de distribución nacional del gas natural; necesidad de dos sistemas de alimentación de combustible para el motor; y elevado costo de la tecnología para conversión del motor diesel para uso del gas natural.

Respecto al biodiesel, este ya se produce en el país, obtenido principalmente a través de palma aceitera. Sin embargo, nuestra demanda nacional aún depende de la importación de este biocombustible para producir la mezcla DB5 (95% de diesel + 5% de biodiesel, en volumen) exigida a nivel nacional. El combustible DB5 es usado, principalmente, en vehículos pesados movidos por motores de encendido por compresión.

Por otro lado, a nivel internacional, el consumo del etanol como combustible tiene sus inicios largo tiempo atrás, pero es recién a partir de la crisis de petróleo de los años 70 que se tomó una gran iniciativa en la producción de este alcohol, debido a que la Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo tomó la decisión de no exportar petróleo a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra de Yom Kippur. Esta iniciativa fue tomada especialmente por países como Brasil y Estados Unidos los cuales han llegado a convertirse en los mayores productores de etanol en la actualidad [4].

En lo que respecta al Perú, la producción nacional de etanol atiende la demanda requerida. Este combustible es utilizado como aditivo para la mezcla con gasolina, donde su aporte volumétrico es del 7,8%, definiendo la mezcla que comercialmente se conoce como gasohol. En la actualidad existen 2 empresas ubicadas en el departamento de Piura que producen etanol. En primer lugar, con una inversión de 210 millones de dólares se encuentra Caña Brava; la cual empezó su producción en 2009 y actualmente es la mayor productora de etanol en el país, contando con una capacidad de planta de 350,000 litros por día. Además, tenemos a Maple que es también una productora importante de etanol con una inversión de 280 millones de dólares y cuenta con una capacidad de producción de 130 millones de litros por año.

I.1 Definición del problema

En los últimos años diversos factores ambientales y energéticos como el gran interés en buscar alternativas fehacientes para la disminución de gases con efecto sobre el calentamiento global, la minoración en la reservas de petróleo, han implicado cambios sobre la variedad de los recursos energéticos ofrecidos en el mercado de combustible. Es de esta manera, que el etanol ya usado como biocarburante¹ o biocombustible líquido en el Perú, puede ser producido a partir de vegetales con alto contenido de azúcares o almidones, utilizando procesos de hidrólisis y fermentación. Y a futuro la utilización de procesos bioquímicos que permitan la transformación de lignocelulosa en alcohol; por esta razón es considerado un combustible renovable.

Los costos de producción de alcohol a partir de la caña de azúcar hacen de este combustible el mejor sustituto en la actualidad, superando numerosas desventajas que afectan la posibilidad de transformación de biomasa en energía, como es la disponibilidad de materia prima y su facilidad de almacenamiento.

La mayor participación de etanol (superior al 7,8%) en la mezcla con gasolina favorecería en gran envergadura la reducción de la cantidad de gasolina importada. Además que reduciría los niveles de emisiones contaminantes, como el CO₂. Como todo biocombustible, la reducción global del volumen de CO₂ que se emite a la atmosfera (menor efecto invernadero) se basa en que, de modo general, las plantas utilizadas en la producción de los biocombustibles absorben el CO₂, liberado en la combustión, para su proceso de fotosíntesis.

La revisión de la literatura nacional, sin embargo, pone de manifiesto la ausencia de estudios detallados sobre los efectos del uso de mezclas nacionales de gasolina-etanol sobre el desempeño y las emisiones de motores de encendido por chispa.

¹ Biocarburante: la denominación de biocarburante se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores. Se puede utilizar tanto en motores de encendido por chispa como en los motores de encendido por compresión.

1.2 Justificación

El presente trabajo pretende realizar una investigación, analizando el desempeño y emisiones de un motor de encendido por chispa, de aplicación vehicular, consumiendo diferentes mezclas combustibles de etanol-gasolina.

El etanol renovable es el alcohol más usado en los motores de encendido por chispa en la actualidad; por ejemplo: Brasil es hoy el mayor productor de azúcar y el segundo mayor de etanol, su gobierno precisó aumentar las inversiones para poder incrementar la oferta de etanol, con la finalidad de elevar el porcentaje de etanol en la mezcla con gasolina hasta en un 25% en volumen, con lo que se consumiría menores cantidades de combustibles derivados del petróleo [5].

Sin embargo, en el Perú, la gasolina comercial (gasohol) contiene un 7.8% de etanol en volumen de la mezcla, contando con productores nacionales de este alcohol, surge la inquietud del qué pasaría si se aumenta el porcentaje de etanol en la mezcla con gasolina nacional. Diversas publicaciones internacionales especializadas han estudiado desde hace algún tiempo el comportamiento de los motores utilizando mezclas en diferentes porcentajes de etanol-gasolina, con lo que se obtuvieron resultados favorables respecto a la cantidad de monóxido y dióxido de carbono emitido. Por otro lado, el etanol tiene un elevado índice de octanaje, favoreciendo la combustión y evitando el golpeteo del motor, al tener un índice de octanaje elevado se podría mezclar con gasolina comercial de cualquier octanaje sin tener el riesgo de que el octanaje de la mezcla disminuya considerablemente.

Un argumento importante para el enriquecimiento de la gasolina con etanol es el hecho de que el etanol introduce más oxígeno a la mezcla aire-combustible mejorando la eficiencia de la combustión debido a la presencia de un átomo de oxígeno en su composición.

Ahora bien, en la literatura, no existen muchos estudios publicados sobre el análisis comparativo de las mezclas gasolina-etanol al 10%, 12.5 %, 15%, 17.5% y 20% en volumen con el gasohol nacional (7.8% de etanol en volumen). Son estas las justificaciones en las cuales se fundamenta el trabajo de tesis propuesto.

II. Objetivos

II.1 Objetivo general

- Analizar experimentalmente el rendimiento efectivo y las emisiones de un motor de encendido por chispa funcionando con mezclas etanol-gasolina.

II.2 Objetivos específicos

- Evaluar el uso de diferentes mezclas de etanol-gasolina al 10%, 12.5 %, 15%, 17.5% y 20% en motores de encendido por chispa y comparar estos resultados con los obtenidos al usar gasohol nacional (7.8% etanol).
- Levantar resultados experimentales sobre desempeño de motores usando gasohol nacional y diversas mezclas de gasolina-etanol.
- Levantar resultados experimentales sobre cantidad de emisiones en motores usando gasohol nacional y diversas mezclas gasolina-etanol.

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Gasolina

1.1.1 Definición

La gasolina es un compuesto líquido, volátil e inflamable; una mezcla compleja de hidrocarburos (átomos de hidrógeno y carbono en su estructura molecular), con un intervalo de temperaturas de ebullición desde 40°C hasta 200°C, y, con un predominio de parafinas (hidrocarburos alifáticos) en muchos tipos de ella [6].

1.1.2 Materia prima

El petróleo, recurso natural no renovable, y, actualmente se constituye como fuente de energía mundial; es un compuesto de origen orgánico, formado por una mezcla compleja no homogénea de hidrocarburos, que, por lo general es el resultado de restos fósiles [7].

Este recurso, puede presentar gran variación en diversos parámetros como color, densidad, gravedad, viscosidad, capacidad calorífica, contaminantes, etc. Estas variaciones son debidas a las diversas proporciones presentes de diferentes hidrocarburos.

1.1.3 Producción

Gasolina primaria:

Esta gasolina proviene de la unidad de destilación primaria, de acuerdo al tipo de crudo procesado, su número de octano (ON)² llega en promedio a 60; siendo la especificación final del producto superior a 80. Para alcanzar esta especificación de octano la gasolina pasa por posteriores procesos [8].

Gasolina de craqueo catalítico fluidizado:

El proceso de craqueamiento catalítico fluidizado convierte hidrocarburos pesados en productos más livianos de mayor valor; este proceso, utiliza un catalizador, cuya función, es actuar como absorbente para depurar la carga y obtener del craqueo gasolina de octanaje más alto [9].

Gasolina de reformación catalítica:

Por el proceso de reformación catalítica en la gasolina, ver Figura 1.1, se logra la deshidrogenación de naftenos (hidrocarburos saturados de cadena cerrada que no tienen doble ni triple enlace, cuya fórmula general es C_nH_{2n}), el hidro craqueo de las parafinas (hidrocarburos saturados de cadena abierta que no tiene doble ni triple enlace, cuya fórmula general es C_nH_{2n+2}) y la hidrogenación de olefinas (hidrocarburos de cadena abierta no saturado, con presencia de doble enlace carbono-carbono, cuya fórmula general es C_nH_{2n}). El resultado obtenido es un hidrocarburo muy rico en aromáticos³; y, por lo tanto, de alto octanaje [10].

1.2 Etanol**1.2.1 Definición**

El etanol o alcohol etílico es un compuesto líquido, volátil, incoloro, inflamable y soluble en agua, cuyas moléculas se componen de carbono, hidrógeno e hidroxilos (el grupo hidroxilo es un grupo funcional compuesto por un átomo de hidrógeno y otro de

² ON: número de octano, indica la resistencia a la autoinflamación de un combustible líquido, para los motores de encendido por chispa, los combustibles deben poseer una baja tendencia a la autoinflamación; a mayor número de octano, mayor es su capacidad de resistir la autoinflamación.

³ Hidrocarburos aromáticos: su fórmula general es C_nH_{2n-6} , la serie de aromáticos, también conocida como la “serie del benceno”, tiene gran valor como materia prima en la elaboración de gasolinas, siendo muy valorados por sus propiedades antidetonantes.

oxígeno, característico de los alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos entre otros compuestos orgánicos) [11].

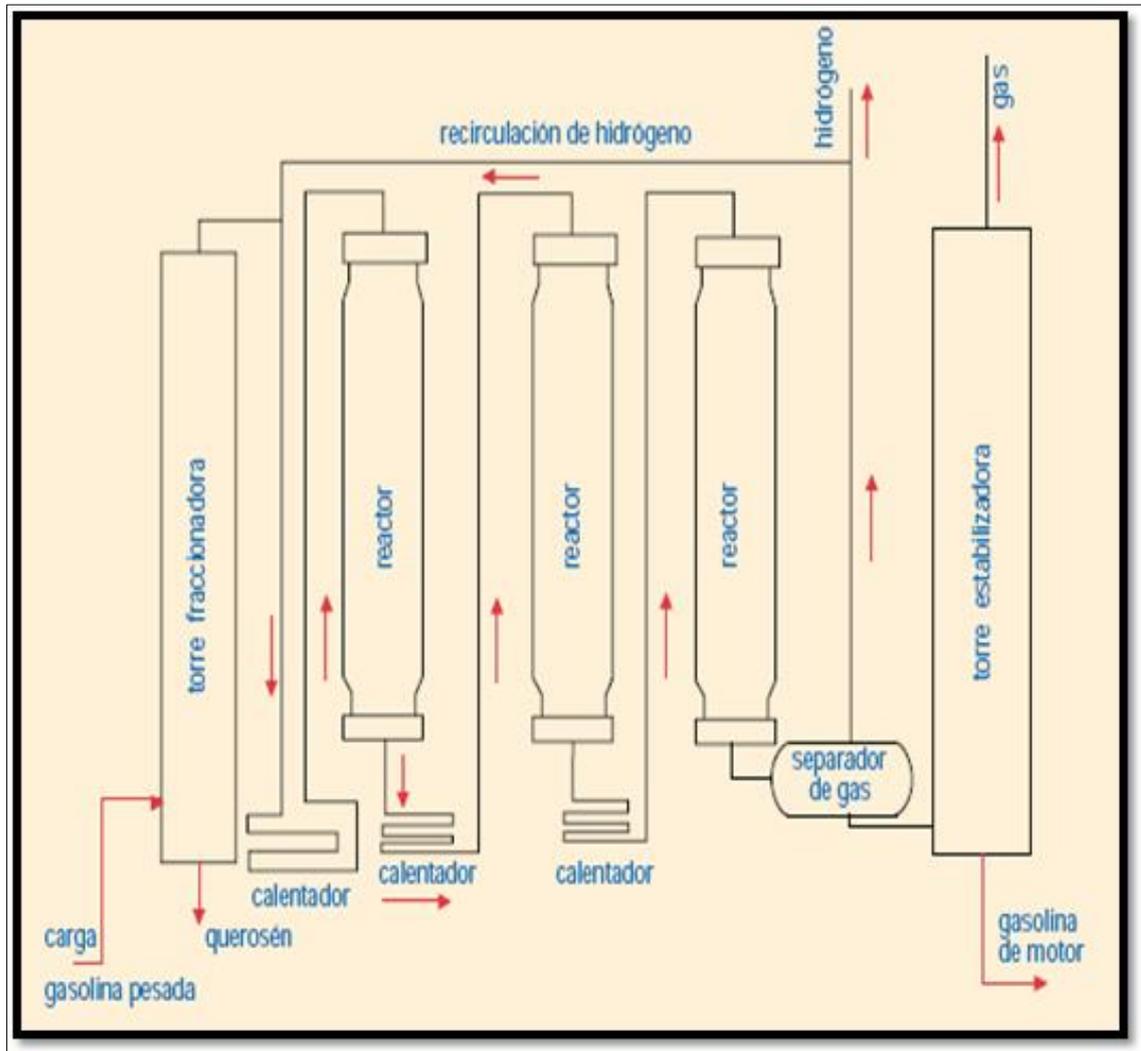


Figura 1.1 - Proceso de reformación catalítica [12].

De acuerdo al porcentaje de agua en volumen que contenga se diferencian en etanol hidratado y el etanol anhidro. El etanol hidratado corresponde al alcohol con una concentración baja pero importante de agua; por ejemplo: en la obtención de etanol a partir de la destilación se obtiene típicamente una concentración del 96% de etanol y 4% de agua; este alcohol se puede utilizar directamente en los motores de combustión interna con algunas modificaciones, con unos rendimientos análogos a los que se obtienen usando 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 mezcla con gasolina para aumentar el índice de octano y producir el

gasohol, el cual reduce las emisiones [13].

El etanol también se usa 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, menor solubilidad en agua, mejor eficiencia térmica que el MTBE. Además, tiene un índice de octano y un poder calorífico más elevado, y evita problemas de toxicidad y corrosión asociados a la utilización del metanol [14].

1.2.2 Materia prima

En cuanto a la producción de etanol, este se puede obtener a partir de sacarosa, almidón y celulosa, ver Figura 1.2.



Figura 1.2 - Proceso de obtención de etanol [22].

⁴ ETBE: etil-ter-butil-eter

⁵ MTBE: metil-ter-butil-eter

Sacarosa o biomasa azucarada:

También conocido como azúcar de mesa o azúcar de caña (materia prima más atractiva, debido a que los azúcares se encuentran en su forma simple de carbohidratos fermentables), es un disacárido de glucosa y fructosa que se encuentra en la caña de azúcar, la melaza, el sorgo dulce, etc. [15].

Almidón o biomasa amilácea:

Es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, cereales (maíz, trigo, cebada, etc.) y tubérculos (yuca, camote, papa, etc.) además de ser la fuente de calorías más importante consumida por el ser humano [16].

Celulosa o biomasa celulósica:

Es un biopolímero compuesto exclusivamente de moléculas de beta-glucosa por lo que viene a ser un homopolisacárido. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante, y, se encuentra en la madera, residuos agrícolas y forestales; sin embargo, la complejidad de sus azúcares hace que la conversión a carbohidratos fermentables sea difícil y costosa [17].

1.2.3 Producción

Tecnología de etanol de primera generación:

En este proceso de primera generación para la producción de etanol, solo los azúcares simples disueltos en la savia de las plantas son fermentados [18].

Esta tecnología se caracteriza por el uso de la biomasa; es decir, especialmente productos de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana, para diferenciarlos de la segunda generación que no compite con la producción de alimentos.

Tecnología de etanol de segunda generación:

En el caso de bioetanol, no existen diferencias en el combustible resultante entre los de primera o segunda generación, ya que en ambos casos se obtiene alcohol etílico. La diferencia está en que el etanol de segunda generación se obtiene de biomasa rica en celulosa y hemicelulosa sin valor alimenticio [19].

Para ambos productos, tanto etanol de primera generación y etanol de segunda generación el procesamiento industrial consiste en la conversión química de los carbohidratos en alcohol. Esta tecnología se usa desde la antigüedad; la cual, ha mejorado enormemente gracias al desarrollo de la industria [20].

Proceso:

Después de obtenido el mosto azucarado, las levaduras, en ausencia de oxígeno, transforman la glucosa en etanol; como consecuencia de esta etapa se obtiene una savia con una concentración de etanol variable. En esta savia existen, además de agua y etanol, abundantes compuestos orgánicos. Luego de esto, sigue la etapa de destilación, que es la separación del etanol mediante dos fases. En la primera fase, mediante arrastre con vapor de agua se obtiene etanol hidratado. La segunda fase consiste en retirar el agua del etanol utilizando un disolvente intermediario (normalmente benceno) [21].

1.3 Propiedades de combustibles

En la Tabla 1.1, se presenta un cuadro comparativo con las principales propiedades de los diferentes combustibles que serán empleados en los experimentos contemplados en la tesis.

Como se puede deducir a partir de la Tabla 1.1, la relación másica de H/C es mayor en el caso del etanol (etanol=0,25 y gasolina=0,16). Es decir, el etanol posee mayor composición de hidrógeno en relación a su contenido de carbono y, consecuentemente, generaran menor emisión del material particulado⁶ durante el proceso de combustión.

El punto de ebullición es una propiedad muy importante en lo que corresponde a sustancias usadas como combustibles; ya que, para el proceso de combustión, la gasolina contiene hidrocarburos leves que evaporan desde 25°C; por lo que dichos

⁶ El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, de distintas formas y tamaños, y cuya composición química es variable, dependiendo de las fuentes emisoras que lo originen.

compuestos no necesitan mucha energía para vaporizar y formar la mezcla aire-combustible.

Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 1.1, el etanol es una sustancia pura con temperatura de ebullición definida (78°C), cuyo valor es superior a los correspondientes hidrocarburos livianos de la gasolina. Esta diferencia, aumenta la resistencia a la evaporación del etanol, dificultando el funcionamiento del motor en condiciones de partida a frío. También, de la Tabla 1.1, se observa que el etanol posee elevado calor latente de vaporización, lo cual explica la mayor demanda de calor para la vaporización del mismo. Esta energía será absorbida de la mezcla aire-combustible admitida en el cilindro, lo cual provocará una menor eficiencia volumétrica del motor y, consecuentemente, un menor desempeño del mismo.

Tabla 1.1 - Principales propiedades físico-químicas de los alcoholes y gasolina [23].

Propiedades	Etanol	Gasolina
Fórmula molecular	C ₂ H ₅ OH	C ₄ -C ₁₂
Composición (C; H; O) en % masa	52; 13; 35	86; 14; 0
Solubilidad en agua a 20°C(ml/100 ml de agua)	Miscible	<0,1
Poder calorífico inferior(MJ/kg)	26,8	42,9
Densidad a 20°C(kg/m ³)	790	736
Punto de ebullición(°C)	78	25 a 215
Relación de estequiometria aire/combustible	9	14,7
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	904	380-500
Número de octano (RON+MON)/2	100	97

1.4 Motor de encendido por chispa

1.4.1 Definición

Es un motor de combustión interna, cuya característica fundamental, es que el inicio de la combustión se produce por el aporte de energía externa, a través de los electrodos de la bujía.

En los motores convencionales, la formación de la mezcla aire-combustible se puede dar durante la admisión, lo que es llamado combustión premezclada homogénea. El proceso de formación de la mezcla y el proceso de la combustión están suficientemente separados en el tiempo, o en el ciclo del motor, para asegurar esta homogeneidad. Este proceso de combustión premezclada se inicia con el aporte de energía de la bujía. A partir de ese momento se desarrolla un frente de llama que progresa transformando la mezcla sin quemar en productos quemados, a través de una reacción exotérmica [24].

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

- Fase inicial con combustión laminar.
- Fase principal con combustión turbulenta.
- Fase residual con combustión laminar

Para la combustión laminar la mezcla aire-combustible se encuentra en reposo o con una velocidad pequeña, o en todo caso, con un nivel de turbulencia bajo o nulo. En estas condiciones, un frente de llama se propaga hacia la mezcla fresca a medida que su temperatura se difunde hacia ésta, provocando el aumento de la velocidad de reacción por el efecto conjunto de una mayor temperatura y de la acción de radicales químicos producidos en la llama [25].

En el caso de combustión turbulenta, esta aumenta el frente de llama y la velocidad de combustión, dicha velocidad de combustión turbulenta depende de la velocidad de combustión laminar y de la turbulencia. En los motores de tecnología avanzada (motores con inyección directa de combustible), la inyección se da en el curso de admisión y/o compresión, provocando la estratificación de la mezcla aire-combustible.

Por lo tanto, adicional y simultáneamente al proceso de combustión premezclada, hay fenómenos de difusión másica que en cualquier caso, no modifican el concepto esencial de la combustión premezclada [26]. Entre los combustibles empleados por los motores de encendido por chispa, mencionase: gasolina, gas licuado de petróleo (GLP), gas natural vehicular (GNV), alcohol combustible y biogás [27].

Según el ciclo de trabajo el motor de encendido por chispa puede ser de 4 tiempos o de 2 tiempos. Para el primer caso, del ciclo termodinámico teórico del MECH, también llamado ciclo Otto, ver Figura 1.3, las etapas de admisión, compresión, expansión y escape se dan en dos giros de la biela (720°), ver Figura 1.4. Para el segundo caso, todas las etapas se dan en un solo giro de la biela (360°).

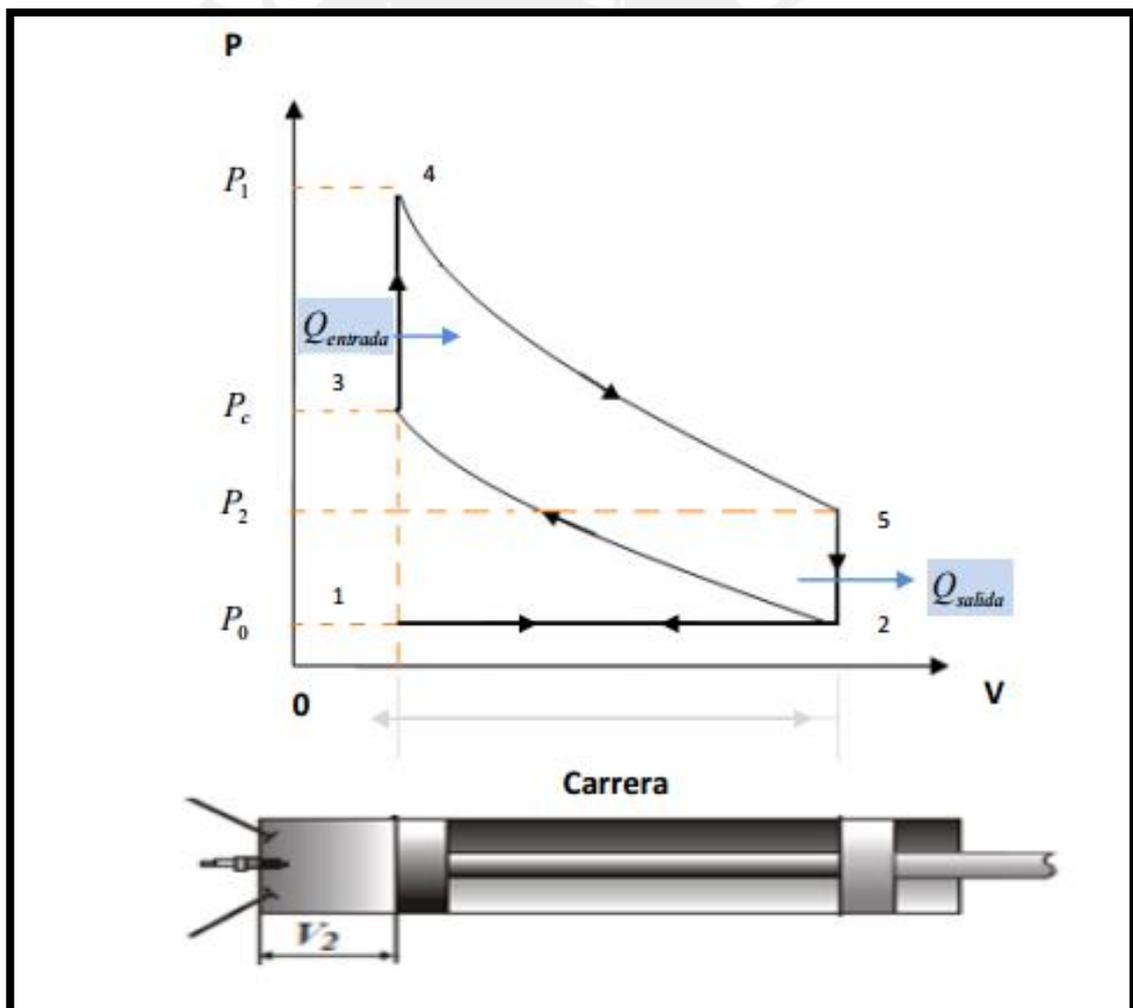


Figura 1.3 - Ciclo termodinámico teórico de un motor de encendido por chispa [28].

Observando la Figura 1.3 se tiene que:

- De 1→2: Proceso de admisión es donde la mezcla aire-combustible ingresa al cilindro, en este momento la válvula de admisión se encuentra abierta.
- De 2→3: Proceso de compresión debido a la disminución del volumen del cilindro se comprime el fluido que está formado por: aire que proviene del proceso de admisión, gases residuales procedentes del ciclo anterior y combustible inyectado en múltiple de admisión. Además, durante la compresión las diferencias de temperatura y velocidad del fluido no son muy elevadas, por lo que se considera proceso casi adiabático y mecánicamente reversible.
- De 3→4: Proceso de combustión, es donde el motor genera energía en forma de trabajo para el vehículo, ya que justo antes de llegar al PMS durante la compresión, con la mezcla a alta presión y temperatura, la bujía genera la chispa que enciende la mezcla aire-combustible y de forma instantánea existe una elevación violenta de la presión en el interior del cilindro. La combustión de la mezcla a alta presión provoca el descenso del pistón hacia el PMI y la biela comunica este movimiento al cigüeñal haciéndolo girar.
- De 4→5: Proceso de expansión, por las mismas razones que en la compresión, este proceso puede considerarse mecánicamente reversible.
- De 5→1: Proceso de escape inicia antes de finalizar la expansión, lo que provoca una menor presión. A este fenómeno se le conoce como pérdidas de escape (1-3% de calor aportado).

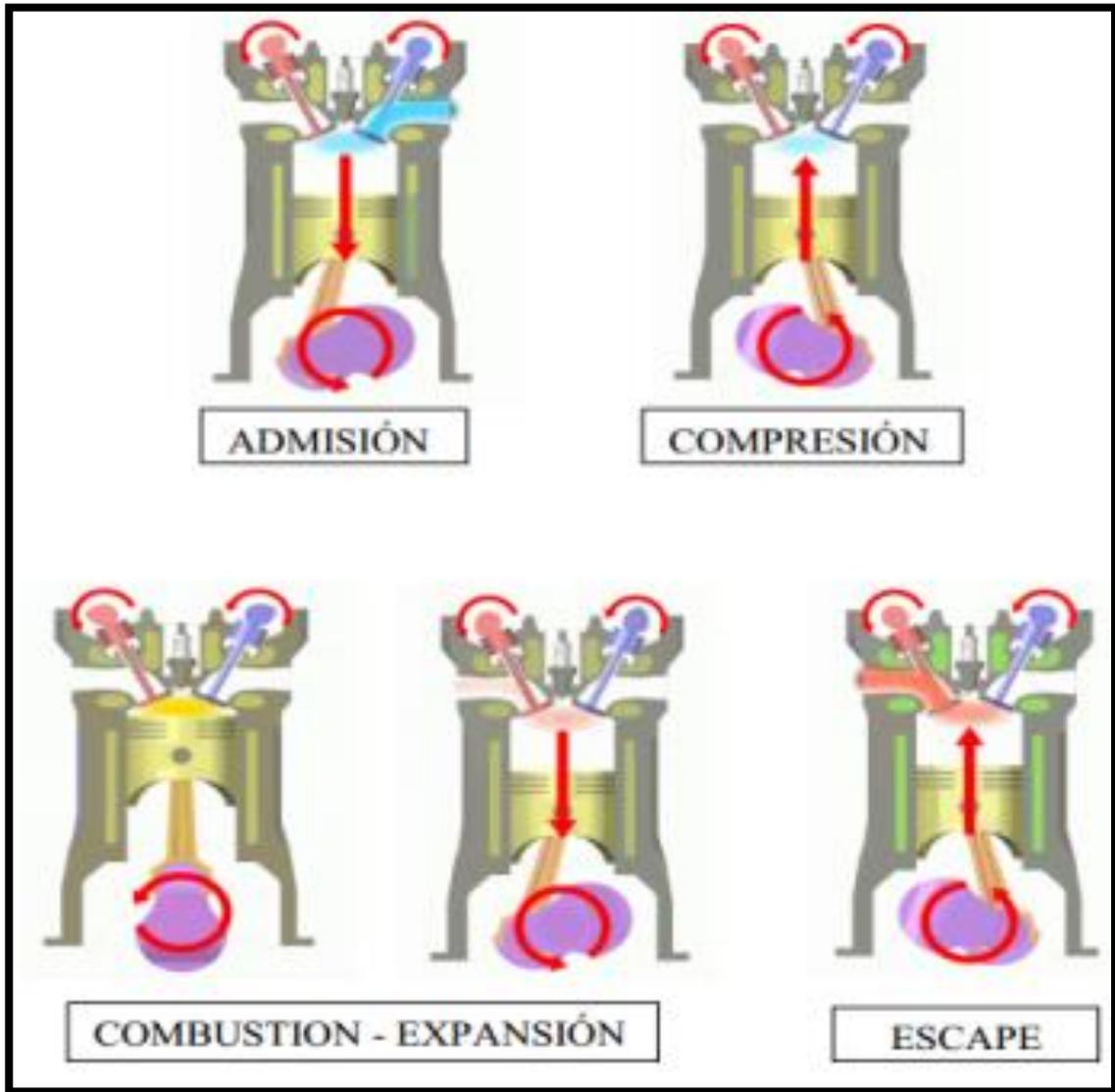


Figura 1.4 - Etapas del ciclo termodinámico del motor [29].

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Broustail [30], realizó un estudio experimental del uso de mezclas de iso-octano-etanol, en un motor de encendido por chispa, mono cilíndrico con carburador; trabajando a bajas y medias cargas. El iso-octano fue usado como combustible referencia para realizar las mezclas a 25%, 50%, 75% y 100% en fracción de volumen con alcohol.

El consumo específico de combustible aumentó en un 60% con la adición de etanol. Además, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) aumentaron significativamente con la adición del mismo; las emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x) se redujeron en pocas proporciones; mientras que se observó una fuerte reducción en la cantidad de hidrocarburos no quemados y gas metano (CH_4) cuando se le adicionó alcohol a la mezcla.

También se encontró que para el uso de etanol al 100%, los niveles de benceno (C_6H_6) estuvieron casi eliminados por completo. Asimismo, se obtuvo una reducción de los niveles de acetileno (C_2H_2) cuando se usó etanol en la mezcla. Para el caso de la cantidad de formaldehído (CH_2O) emitido, se encontró un pequeño aumento cuando se usó la mezcla con etanol.

En conclusión, el uso de etanol como combustible en motores de encendido por chispa para aplicaciones vehiculares reduce la cantidad de emisiones de CH_4 ; sin embargo,

combustionar altos porcentajes de alcohol en las mezclas induce un mayor porcentaje de emisiones de CH_2O , el cual produce cáncer.

Paivi [31], realizó un estudio experimental en 3 autos diferentes; el primer auto, modelo 2010, trabaja con un motor de encendido por chispa de 4 cilindros y cuenta con un sistema de inyección directa (FSI), el segundo auto, modelo 2010, trabaja con un motor de encendido por chispa de 4 cilindros, 16 válvulas y un sistema variable que controla la apertura de las válvulas de admisión (MPFI), lo que regula la cantidad de aire necesario para cierta cantidad de combustible, con lo que se logra una mejor eficiencia volumétrica y un menor consumo específico de combustible.

Estos dos autos representan a los autos convencionales, los cuales no son necesariamente compatibles con combustibles que contengan más de 4% m/m de oxígeno (fracción gravimétrica: 4 % de masa de oxígeno del total de masa del combustible). El tercer auto, modelo 2006, trabaja con un motor de encendido por chispa de 4 cilindros y cuenta con un turbocompresor; este auto representa a los autos flexibles (FFV⁷); los cuales toleran combustibles con alto contenido de oxígeno, mayores a 4% m/m.

Los motores de los autos fueron puestos en marcha con 14 combustibles (ver Tabla 2.1), a -7°C ; es decir, funcionando en arranque en frío. Además, los combustibles con porcentaje de oxígeno mayor a 4 m/m% solamente fueron evaluados en los FFV. En general, tres pruebas fueron hechas para cada combinación de combustible y auto.

Lo obtenido por Paivi [31] para el tercer auto (FFV) con el combustible E85 fue una baja cantidad de emisiones de óxidos nitrosos (NO_x), pero un alto contenido de emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos parcialmente quemados y no quemados (HC), esto debido a las características de evaporación del etanol y a la baja temperatura de combustión.

Además, para los combustibles E30, E+eth y eth la cantidad de emisiones de CO fue mayor que para el isobutanol. En general, la cantidad de emisiones de NO_x son

⁷ FFV: Fuel Flexible Car por sus siglas en inglés, es un auto que es compatible con biocombustibles con alto contenido de oxígeno en su composición.

menores para los combustibles con alto contenido de oxígeno que para los combustibles con bajo contenido de oxígeno

Tabla 2.1 - Combustibles involucrados en el estudio.

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

E = etanol; eth = ETBE (etil-tert-butil-eter); iB = isobutanol; nB = n-butanol; R = bio-hidrocarburos renovables; iB (21) = combustible con una cantidad de isobutanol que contiene una energía equivalente al 21% de la energía suministrada por el combustible constituido por 100% gasolina.

Por otro lado, ya que los autos cuentan con tecnologías distintas, las diferencias entre los biocombustibles y el combustible fósil (gasolina) influyen mucho en el comportamiento de los autos. Consecuentemente, algunos beneficios de los

combustibles para cierto auto, no necesariamente va ser el mismo para cuando se utiliza en otro auto con tecnología distinta.

Entonces, se determinó que, para los autos FSI y MPFI la cantidad de emisiones de CO fue menor cuando se usó biocombustibles, que para cuando se usó combustible fósil; para el auto FSI, la cantidad de emisiones de HC fue menor cuando se usó biocombustibles que cuando se usó combustible fósil, con la excepción del n-butanol; sin embargo, para los autos MPFI y FFV la cantidad de emisiones de HC usando biocombustibles fue casi igual que al usar combustible fósil.

En relación a las emisiones de NO_x, Paivi [31] encontró, que para los autos MPFI y FSI la cantidad de emisiones de NO_x usando biocombustibles fue mayor que al usar combustible fósil; con la excepción del R+eth; contrariamente, cuando se usó biocombustibles en el auto FFV la cantidad de emisiones de NO_x fue menor que al usar combustible fósil.

Eliezer [32] realizó un estudio experimental en un motor de encendido por chispa Lada 1300, de 4 tiempos, con un sistema de alimentación por carburación, con una potencia nominal de 48 kW a 5600 revoluciones por minuto (rpm) y un torque máximo de 96 N.m a 3400 rpm.

El motor fue puesto en marcha con diferentes mezclas de etanol anhidro-gasolina (E0, E10, E20, E30) a diferentes regímenes de giro (1200 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm) para analizar el rendimiento del motor y cantidad de emisiones, por lo que los parámetros analizados en cada experimento fueron el torque o momento efectivo (Me), la potencia efectiva (Ne), consumo específico de combustible (ge) y emisiones de monóxido de carbono.

El torque efectivo máximo tanto para E0, E10, E20, E30 como se puede observar en la Figura 2.1, se encuentra alrededor de los 4000 rpm, en contraste con el valor de torque máximo que nos brinda el fabricante el cual se logra a 3600 rpm. Notando claramente, que el valor de torque máximo, a pesar de ser a 4000 rpm, es el obtenido por la mezcla E10, y este valor es bien próximo al otorgado por el fabricante (96 N.m).

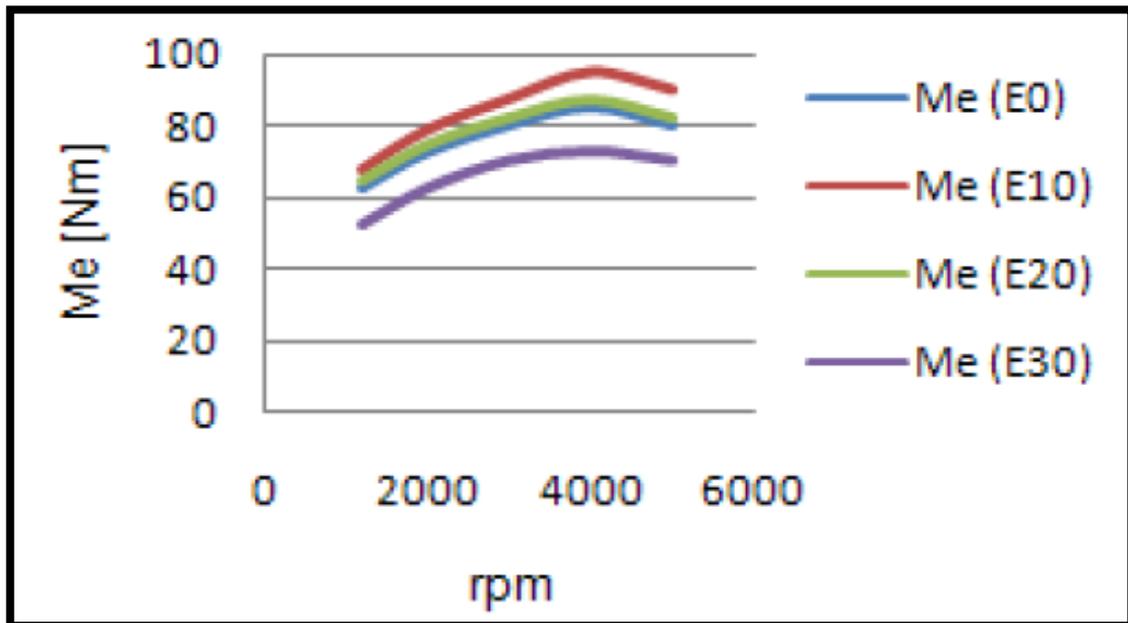


Figura 2.1 - Torque efectivo (Me) versus rpm.

Respecto a la tendencia de la potencia efectiva, observar Figura 2.2, el valor de potencia máxima tanto para E0, E10, E20, E30 se encuentra alrededor de las 5000 rpm, este valor es un poco menos al establecido por el fabricante (5600 rpm).

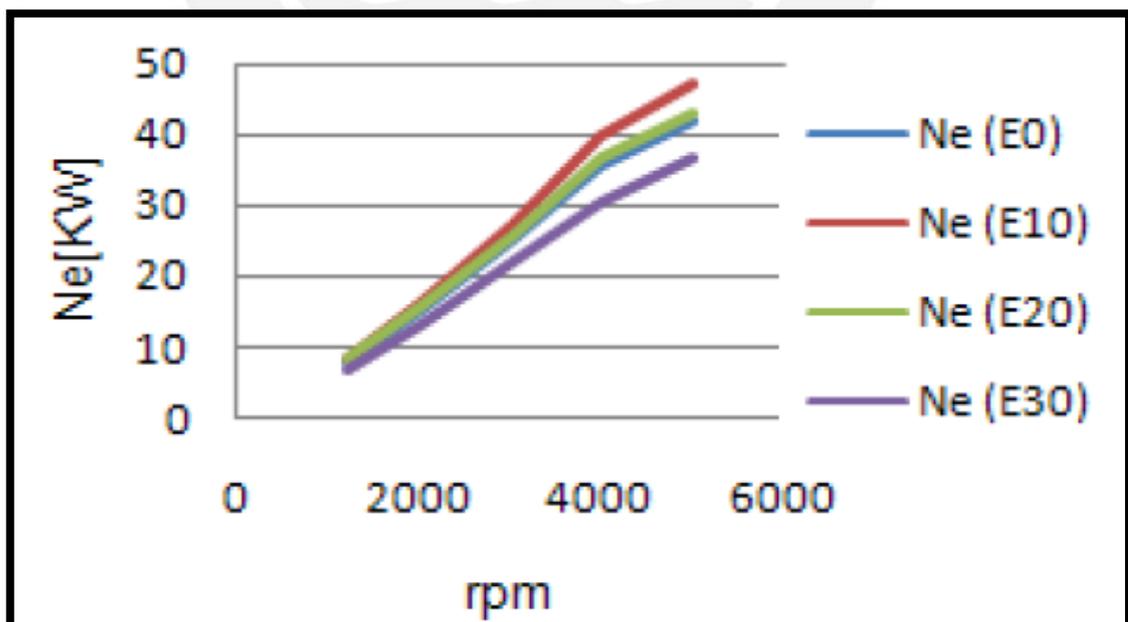


Figura 2.2 - Potencia efectiva (Ne) versus rpm.

Los resultados obtenidos con los combustibles ensayados muestran una tendencia para el comportamiento de la potencia efectiva y torque efectivo. En todos los puntos experimentales se puede observar que los datos obtenidos a partir de la mezcla E10 son los valores que más se aproximan a los establecidos por el fabricante, todo lo contrario ocurre con el E0.

De la misma manera para el consumo específico de combustible, ver Figura 2.3, al usar la mezcla E10 se requiere una menor cantidad de combustible para alcanzar la misma velocidad en el motor que si se usará E0.

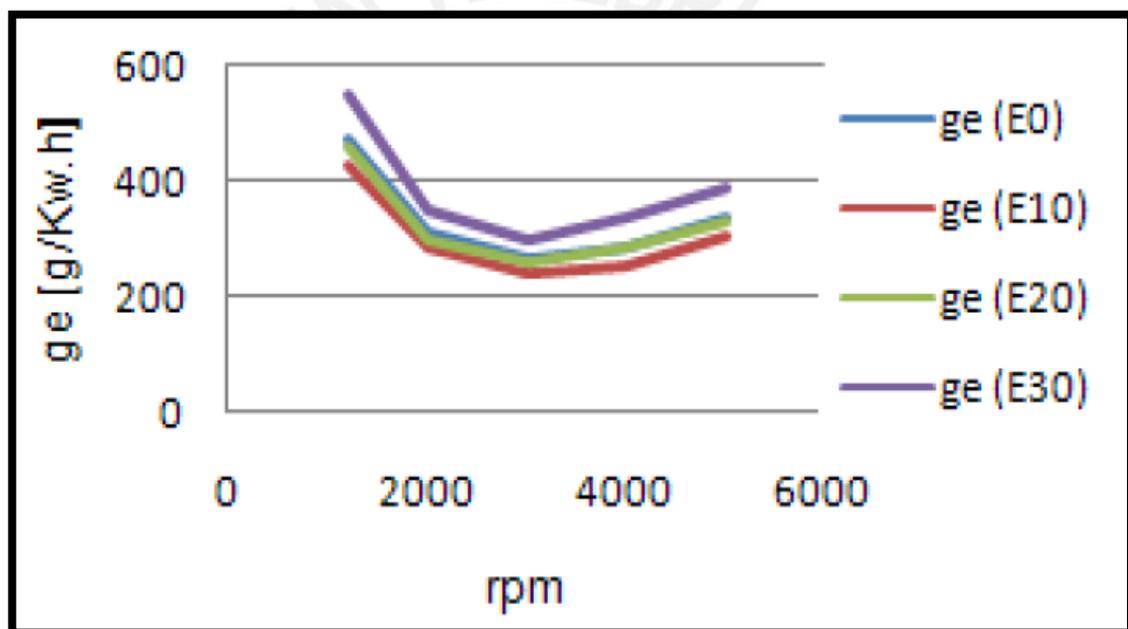


Figura 2.3 - Consumo específico de combustible (ge) versus rpm.

Las emisiones de monóxido de carbono para las mezclas E10, E20, E30 son inferiores para todos los casos al obtenido para E0, observar Figura 2.4, pero los menores valores obtenidos se dan para la mezcla E30, lo que sugiere una tendencia inversamente proporcional; es decir, a mayor porcentaje de etanol en la mezcla con gasolina, menores serán las emisiones de CO, con lo que se llegó a la conclusión de que las mezclas E10 y E20 pueden ser usadas en un motor Lada 1300, ya que ambas disminuyen las emisiones de monóxido de carbono, además que no producen deterioro significativo en el rendimiento del motor, por el contrario lo mejora.

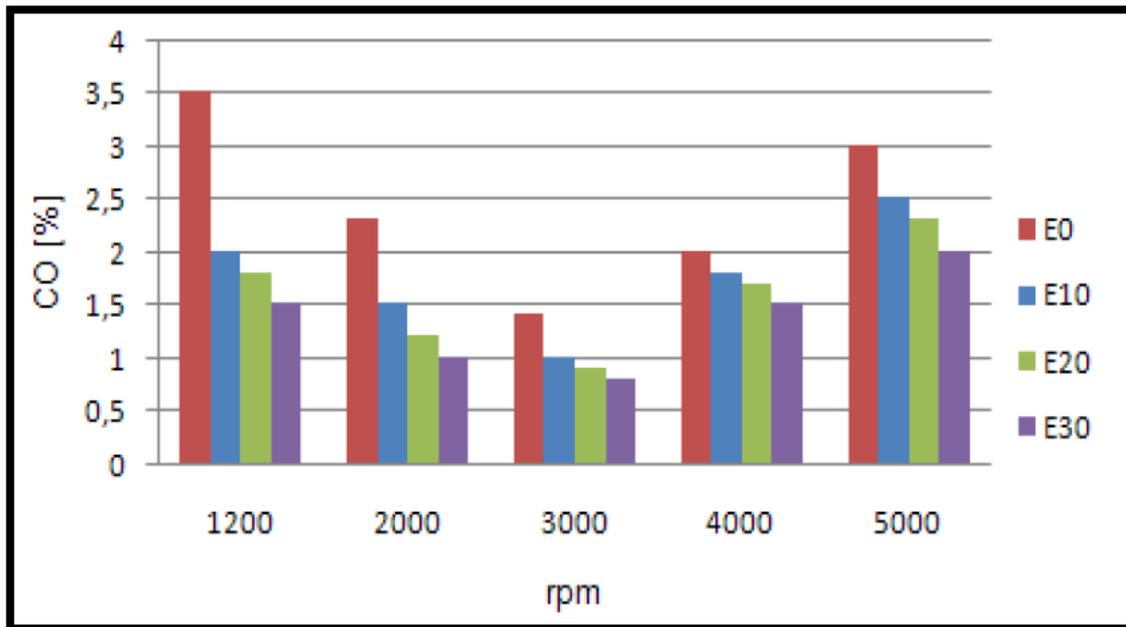


Figura 2.4 - Emisiones de CO versus rpm.

Contreras [33], realizó un estudio experimental en un motor de encendido por chispa, de 6 cilindros en línea con carburador. El motor fue puesto en marcha para ser ensayado con 2 mezclas de etanol-gasolina E5 y E10 (5% y 10% de etanol respectivamente en la mezcla con gasolina) y con E0 (combustible con 0% de etanol; es decir, gasolina pura) a 6 regímenes de giro (750 rpm, 1450 rpm, 2200 rpm, 2800 rpm, 3250 rpm y 3600 rpm) para analizar potencia efectiva, consumo específico de combustible, emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos parcialmente quemados y no quemados (HC).

Contreras [33], determinó que la potencia efectiva disminuye conforme se aumenta la cantidad de etanol en la mezcla, esto se debe principalmente al efecto de empobrecimiento de la mezcla ya que el etanol cuenta con oxígeno en su composición. Asimismo, identificó que el consumo específico de combustible es directamente proporcional al porcentaje de etanol en la mezcla; en otras palabras, a mayor porcentaje de etanol en la mezcla, mayor será el consumo específico de combustible del motor.

Con respecto a las emisiones, se encontró que a mayor porcentaje de etanol en la mezcla, la cantidad de CO y HC tienen una tendencia inversamente proporcional;

dicho de otra forma, a mayor porcentaje de etanol, menor será la cantidad de CO y HC emitido. Para el caso del CO₂, ocurre lo contrario, la relación es directamente proporcional, esto es, a mayor porcentaje de etanol, mayor será la cantidad de CO₂ emitido.

Martínez [34], desarrolló un análisis experimental en un motor de encendido por chispa, con aspiración natural, de 4 cilindros, de 4 tiempos con carburador. Los ensayos se realizaron a 6 regímenes de giro (1000 rpm, 1200rpm, 1500 rpm, 1800 rpm, 2100 rpm, 2400 rpm). Los combustibles utilizados en los ensayos fueron gasolina E0 y mezclas de gasolina-etanol E5, E10 y E15. El número que sigue a la letra E representa el porcentaje en volumen de etanol en la mezcla.

Los datos a analizar fueron monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos (NO_x), oxígeno (O₂) e hidrocarburos quemados y no quemados (HC). En primer lugar, Martínez [34] obtuvo que la influencia de la mezcla gasolina-etanol sobre la reducción de emisión de NO_x en función del régimen de giro del motor, no dependía claramente del contenido de etanol. Esto se debe particularmente a que la emisión de NO_x depende única y exclusivamente de las condiciones de operación de motor y no del contenido de etanol en la mezcla con gasolina.

En segundo lugar, encontró que la cantidad de emisión de CO disminuye mientras se incrementa el contenido de etanol, lo que demuestra, que la adición de etanol reduce considerablemente la emisiones de CO, llegando a alcanzar hasta un 90% la reducción de esta emisión gaseosa, dependiendo también de las condiciones de funcionamiento del motor. Esta reducción se debe a que el etanol tiene en su estructura un átomo de oxígeno en su forma básica, por lo que este alcohol puede ser tratado como un hidrocarburo parcialmente quemado u oxidado, entonces cuando se agrega etanol al combustible se proporciona más oxígeno para el proceso de combustión, lo que ocasiona una reducción en la emisión de CO.

En tercer lugar, obtuvo que la influencia de la mezcla etanol-gasolina sobre la disminución de emisión de CO₂ en función del régimen de giro del motor es directamente proporcional hasta cierta proporción (E10); es decir, a mayor cantidad de etanol habrá mayor cantidad de emisión de CO₂, esto debido a la presencia de exceso

de oxígeno en el mezcla. No obstante, Martínez [34] demostró que al utilizar E15 se obtiene una reducción en la emisión de CO_2 , atribuible a las condiciones propias de operación del motor.

En cuarto lugar, encontró que la influencia de la mezcla etanol-gasolina sobre la emisión de O_2 tiene una tendencia proporcional, ya que a mayor porcentaje de etanol en la mezcla, mayor la cantidad de emisiones de O_2 en los gases de escape del motor. El caso más llamativo es para la mezcla E15, en donde se vio un incremento en la emisión de O_2 de hasta un 500% respecto al E0.

Por último, Martínez [34] determinó que se tiene una reducción de HC hasta de un 10% en ciertas condiciones de operación del motor, primordialmente para los combustibles E5 y E10; esto es debido a que existe una combustión muy completa en el motor por la presencia de oxígeno en el combustible. Para el caso del combustible E15, se presenta un incremento en la emisión de HC, este aumento es atribuible a las condiciones específicas de operación del motor; el cual presentó una operación anormal con dicho combustible.

Wei Dong Hsieh [35], desarrolló un estudio experimental en un motor de encendido por chispa marca New Sentra GA16DE, de 4 tiempos, 4 cilindros, con una cilindrada de 1600 cm^3 y con relación de compresión igual a 9,5. Los ensayos se llevaron a cabo a 4 regímenes de giro (1000 rpm, 2000rpm, 3000 rpm, 4000 rpm); y 5 posiciones de apertura de la válvula de admisión (20%, 40%, 60%, 80% y 100%). Los combustibles utilizados en los ensayos fueron gasolina E0 y mezclas de gasolina-etanol E5, E10, E20 y E30. El número que sigue a la letra E representa el porcentaje en volumen de etanol en la mezcla.

Los datos que analizó fueron torque efectivo, consumo específico de combustible, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos nitrosos (NO_x) e hidrocarburos quemados y no quemados (HC).

Con respecto al torque efectivo, Wei [35] encontró que a mayor porcentaje de apertura de la válvula de admisión se obtuvieron mayores valores de torque efectivo, ver Figura 2.5, esto se cumplió para los diferentes regímenes de giro ensayados en el motor.

Asimismo, observó que los valores de torque efectivo tienen una variación mínima respecto a la cantidad de etanol en la mezcla con gasolina, excepto para el E0, el cual tiene un torque efectivo ligeramente menor que los otros combustibles especialmente en condiciones de operación de baja apertura de válvula (20%) y alto régimen de giro del motor (4000rpm).

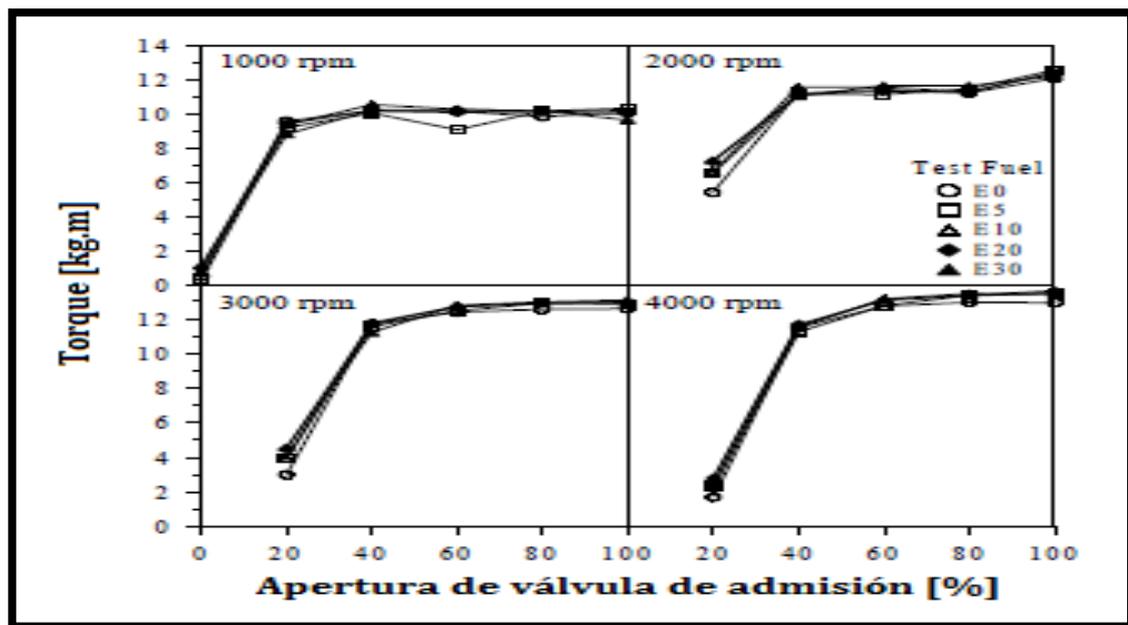


Figura 2.5 - Torque efectivo versus apertura de válvula de admisión.

En relación al consumo específico de combustible, Wei [35] encontró que dicho consumo permanece casi constante a bajas velocidades de operación (1000 y 2000 rpm) con una apertura de válvula de admisión mayor a 20%, o a altas velocidades de operación (3000 y 4000 rpm) con apertura de válvula de aproximadamente 40%, ver Figura 2.6. En general, la relación teórica de aire –combustible para la gasolina es 1.6 veces la del etanol, por lo que el consumo específico de combustible para las mezclas aumenta conforme aumenta el contenido de etanol.

Para la velocidad de 3000 rpm las emisiones de CO disminuyeron conforme aumentaba el factor lambda (λ), ver Figura 2.7, este factor representa la relación aire-combustible, un aumento de λ es asociado con el incremento del contenido de etanol en la mezcla; mientras este factor se encuentre más cerca al valor estequiométrico ($\lambda = 1$), existirá una combustión más completa por lo que disminuirá las emisiones de CO,

lo mismo sucede para 400 rpm. La variación de CO_2 es contraria a la del CO , mientras λ este más próximo al valor de 1, la combustión será más completa y por ende las emisiones de CO_2 aumentarán; al analizar la Figura 2.7 se observa que las emisiones de CO_2 son menores para 4000 rpm que para 3000 rpm.

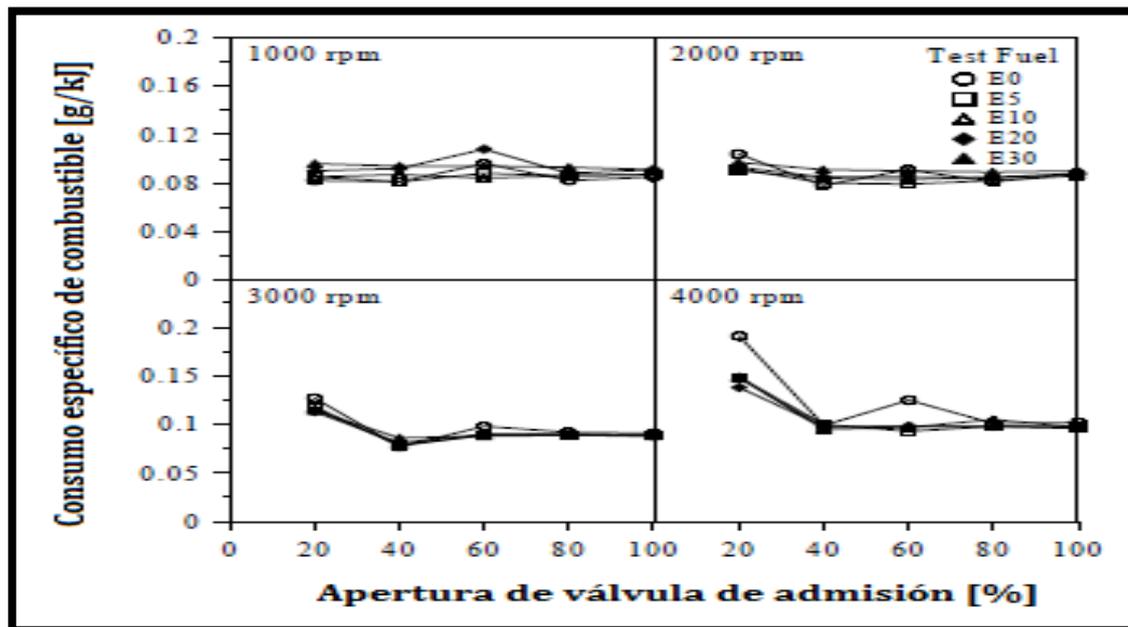


Figura 2.6 - Consumo específico de combustible versus apertura de válvula de admisión.

Por otro lado, Wei [35] encontró que las emisiones de HC disminuyen al aumentar λ , las razones de este fenómeno son las mismas que fueron expuestas para el caso de CO . Para el caso del NO_x , observó un aumento significativo cuando se aumentaba λ , esto debido a que cuando λ está próximo al valor de 1, el proceso de combustión es cercano al estequiométrico y produce una temperatura de flama muy elevada lo que produce cantidades altas de emisiones de NO_x , entonces el contenido de etanol en la mezcla no tiene mucha relevancia cuando se trata de emisiones de NO_x para valores de $\lambda < 1$.

Oscar Piamba [36] desarrolló una investigación en un motor de encendido por chispa, con sistema carburador, aspiración natural, de 4 cilindros, 8 válvulas, cilindrada de 1108 cm^3 , potencia máxima $25,4 \text{ kW}$ (4000 rpm), torque máximo $74,0 \text{ N.m}$ (2500 rpm) y relación de compresión de 9,5:1. Los ensayos lo realizó utilizando gasolina pura (E0) y 10% de etanol en volumen de la mezcla con gasolina (E10) a 10 regímenes de giro

desde 1000 rpm hasta 5500 rpm, con variación de 500 rpm. Los ensayos los realizó a 2600 metros sobre el nivel del mar en Colombia.

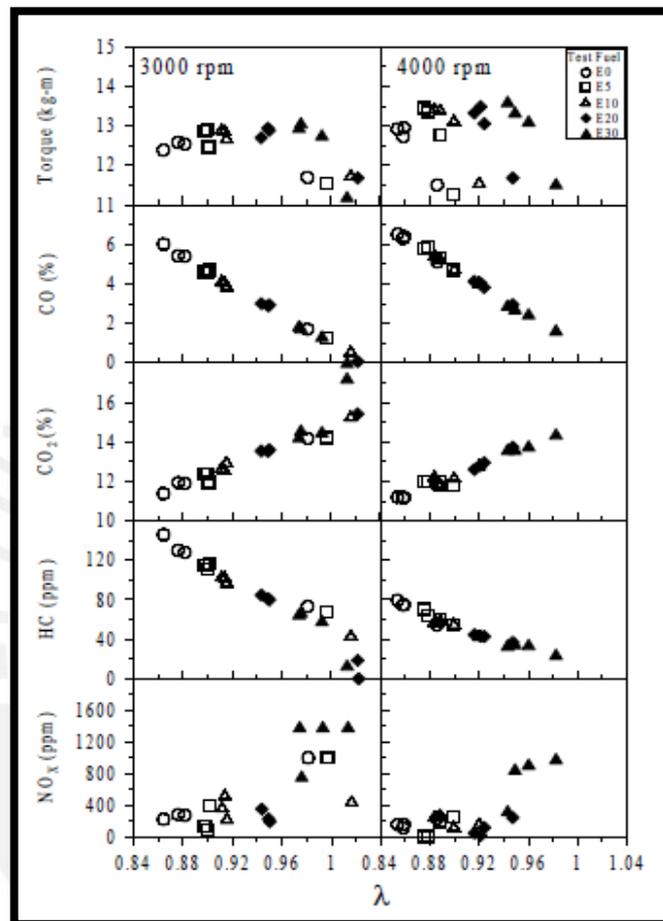


Figura 2.7 - Emisiones versus factor lambda.

Los datos que analizó fueron: par motor, consumo específico de combustible, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos (NO_x), oxígeno (O₂) e hidrocarburos quemados y no quemados (HC).

En primer lugar, Oscar Piamba [36] encontró, que efectivamente el máximo par del motor se da a 2500 rpm. Como se puede observar en la Figura 2.8, la mezcla E10 desarrolló un mayor par para todos los puntos de velocidad; en el caso particular a 2500 rpm el par aumentó en 2,89% respecto a la gasolina pura. Al encontrarse el motor en altura, la potencia y el torque del motor aumentan al aumentar el contenido de etanol en la mezcla, como consecuencia de un mejor proceso de combustión,

siendo el etanol un aditivo eficaz en suplir la demanda de oxígeno para la combustión ante la disminución de la presión atmosférica. Sin embargo las pérdidas de potencia y par con respecto a las especificaciones técnicas del fabricante, son consecuencia de la presión atmosférica y ajuste del motor.

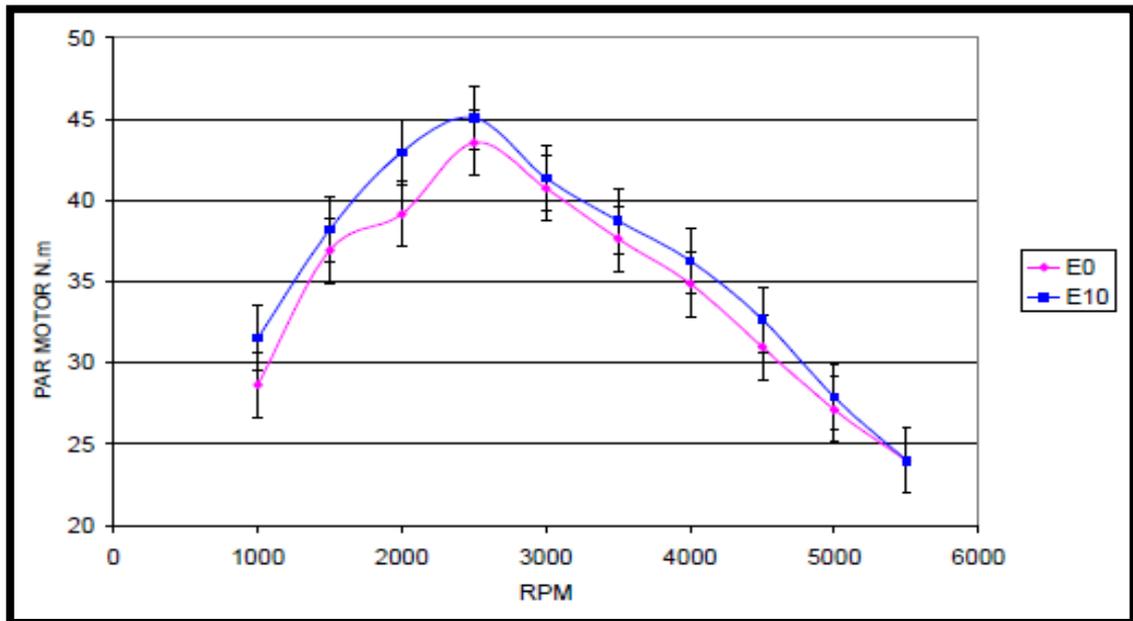


Figura 2.8 - Par motor versus RPM.

En segundo lugar, encontró que el consumo específico de combustible aumentó con el incremento de etanol en la mezcla para todas las velocidades ensayadas, ver Figura 2.9, en el caso particular de 2500 rpm el CEC aumentó en aproximadamente 5,9%; esto debido al menor poder calorífico del etanol comparado con la gasolina.

Por último, en lo que respecta a las emisiones, la cantidad de HC disminuyó considerablemente cuando utilizó E10, para el caso particular de 2500 rpm la disminución es de 236 ppm; la cantidad de NO_x aumentó para todos los puntos ensayados cuando se utilizó E10, como consecuencia de las altas temperaturas en la cámara de combustión, para el caso particular de 2500 rpm el aumento es de 25 ppm. Como era de esperarse las cantidades de CO_2 y O_2 aumentaron cuando se utilizó la mezcla E10, mientras que el porcentaje de CO disminuyó para este mismo combustible.

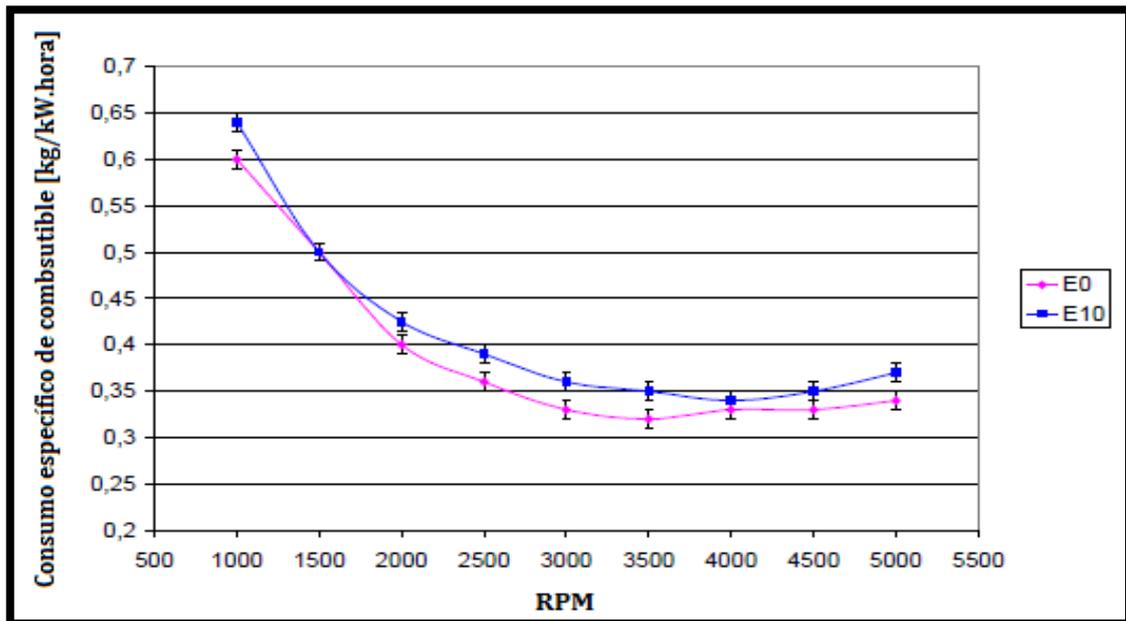


Figura 2.9 - CEC versus RPM.

Fikret [37], realizó un estudio en un motor de encendido por chispa, con sistema carburador, aspiración natural, de 4 cilindros, cilindrada de 1668 cm^3 , potencia máxima 43 kW (4300 rpm), torque máximo $125,6 \text{ N.m}$ ($1800\text{-}2400 \text{ rpm}$) y relación de compresión de 8:1. Los ensayos lo realizó utilizando gasolina pura (E0) y 60% de etanol en volumen de la mezcla con gasolina (E60) a diferentes velocidades entre los valores de mínimo rpm y máximo rpm, sin especificar un valor de referencia.

Los datos que analizó fueron: torque efectivo, potencia efectiva, rendimiento efectivo, consumo específico de combustible (CEC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) e hidrocarburos quemados y no quemados (HC).

Como resultado de los ensayos Fikret [37] encontró que el torque efectivo disminuye en relación al incremento de etanol en la mezcla (E60) para diferentes velocidades comparándolo con gasolina pura (E0), esto debido a la menor cantidad de energía entregada por el combustible. El comportamiento de la potencia efectiva es similar a la del torque hasta una cierta velocidad, luego de esto la curva de potencia es mayor para la mezcla E60 que para el E0. Todo lo contrario sucede para el CEC y el rendimiento efectivo, ambos aumentan para la mezcla E60 con respecto a la mezcla E0, esto sucede para todas las velocidades ensayadas.

Por el lado de las emisiones Fikret [37] concluyó que al usar la mezcla E60 respecto al E0, las emisiones de CO y HC disminuyeron aproximadamente 80% y 50% respectivamente, mientras que las emisiones de CO₂ aumentaron en un 20% dependiendo de la condiciones de operación del motor, del mismo modo, las emisiones de O₂ aumentaron debido justamente a la mayor presencia de oxígeno contenido en el etanol.

Mihai [38] efectuó un trabajo que tuvo como objetivos reducir el consumo específico de combustible, aumentar el rendimiento efectivo del motor y reducir las cantidades de emisiones. Los ensayos los realizó en dos motores, ambos de un cilindro, de dos tiempos, con una cilindrada de 70 cm³. Sin embargo, el primer motor es carburado con una relación de compresión de 8:1, mientras que el segundo motor es de inyección directa con una relación de compresión de 10:1. Los dos motores fueron ensayados con gasolina pura, mezcla de etanol-gasolina (E85) y etanol puro (E100).

En primer lugar, Mihai [38] puso a trabajar el motor a 5500 rpm con gasolina pura y encontró que al usar el sistema de inyección directa en vez del sistema con carburador las cantidades de emisiones de HC disminuyeron en aproximadamente 71%, al comparar el uso de gasolina pura y E85 en el primer motor obtuvo como resultado una disminución de HC de 63%, para el caso del segundo motor con los mismos combustibles la disminución fue de 38%; y al usar E100, la reducción de HC en el primer motor fue de 69% y para el segundo motor fue de 54%.

En segundo lugar, encontró que para los combustibles E85 y E100 las cantidades de CO disminuyeron sin importar el sistema de inyección de combustible al compararlos con gasolina pura; mientras que las emisiones de CO₂ aumentaron para ambos sistemas de inyección.

Por último, Mihai [38] concluyó que las cantidades de emisiones de NO_x al usar proporciones de alcohol en el combustible disminuyeron cuando se usó el primer motor con carburador, que cuando se usó el segundo motor con inyección directa.

CAPÍTULO 3 EXPERIMENTACIÓN

3.1 Preparación de las mezclas de etanol y gasolina

Para preparar las mezclas de los respectivos combustibles involucrados en los ensayos, se utilizaron probetas graduadas de diferentes medidas, ver Figura 3.1, en las cuales se vertía gasolina comercial de 90 octanos (ver **Anexo 1**), la cual contiene 7,8% de etanol en volumen, para luego echarlo al recipiente de 5 galones, esto se hizo repetidas veces hasta tener un volumen de 12 litros en el recipiente. Luego de tener como base 12 litros de gasolina dentro del recipiente, se añadió etanol (ver **Anexo 2**) en las proporciones necesarias calculadas previamente (ver Tabla 3.1) para cada combustible utilizando las mismas probetas.



Figura 3.1 – Probetas graduadas y recipiente de 5 galones utilizados para la preparación y almacenamiento de las mezclas.

1 – Probetas graduadas utilizadas para la preparación de las mezclas; 2 – Recipiente de 5 galones.

Después de tener la mezcla lista dentro de los recipientes, estos fueron almacenados en un refrigerador, con la finalidad de poder evitar pérdidas por evaporación del combustible obtenido.

Tabla 3.1 - Combustibles involucrados en el ensayo.

Mezcla	E7,8	E10	E12,5	E15	E17,5	E20
Porcentaje de etanol [%]	7.8	10	12.5	15	17.5	20
Volumen de etanol [l]	0.936	1.229	1.581	1.952	2.347	2.766
Volumen de gasolina [l]	11.064	11.064	11.064	11.064	11.064	11.064
Volumen total [l]	12.000	12.293	12.645	13.016	13.411	13.830

A continuación se describe la composición volumétrica de las 6 mezclas obtenidas en la preparación:

- **E7,8:** 7,8% de etanol y 92,2% de gasolina (gasohol comercial).
- **E10:** 10% de etanol y 90% de gasolina.
- **E12,5:** 12,5% de etanol y 87,5% de gasolina.
- **E15:** 15% de etanol y 85% de gasolina.
- **E17,5:** 17,5% de etanol y 82,5% de gasolina.
- **E20:** 20% de etanol y 80% de gasolina.

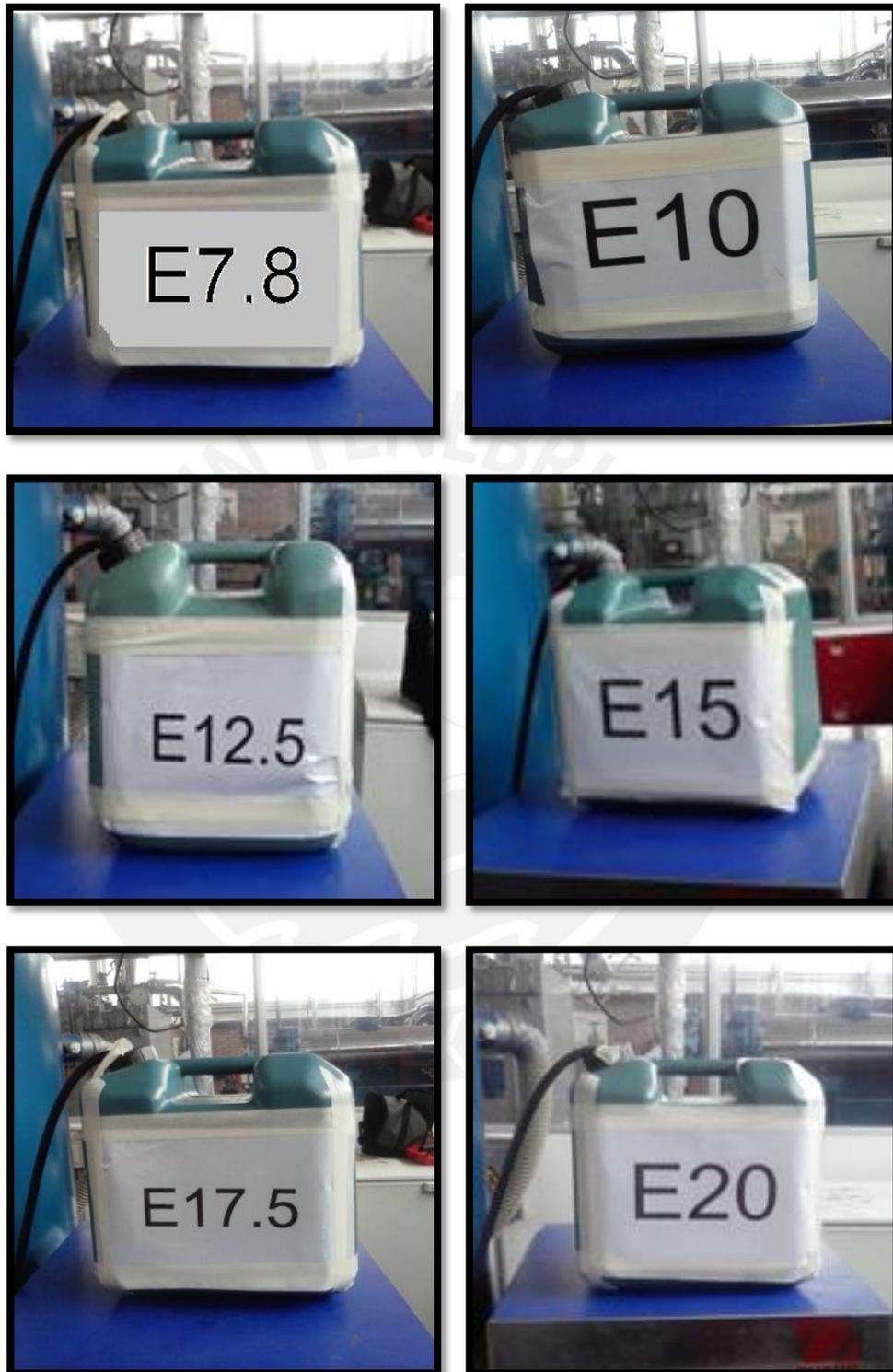


Figura 3.2 : Tanques conteniendo los diferentes combustibles, montados en la balanza antes de iniciar los ensayos.

3.2 Metodología

La Figura 3.3 ilustra el esquema del banco de pruebas utilizado durante los ensayos, los cuales, fueron realizados dentro del Laboratorio de Energía. Este banco cuenta con un dinamómetro de la marca Zöllner y puede probar motores con torque máximo de 300 N.m con una resolución de $\pm 0,5$ N.m. La máxima velocidad permitida para este equipo es de 10000 rpm. La Figura 3.4 ilustra partes importantes del equipo mencionado.

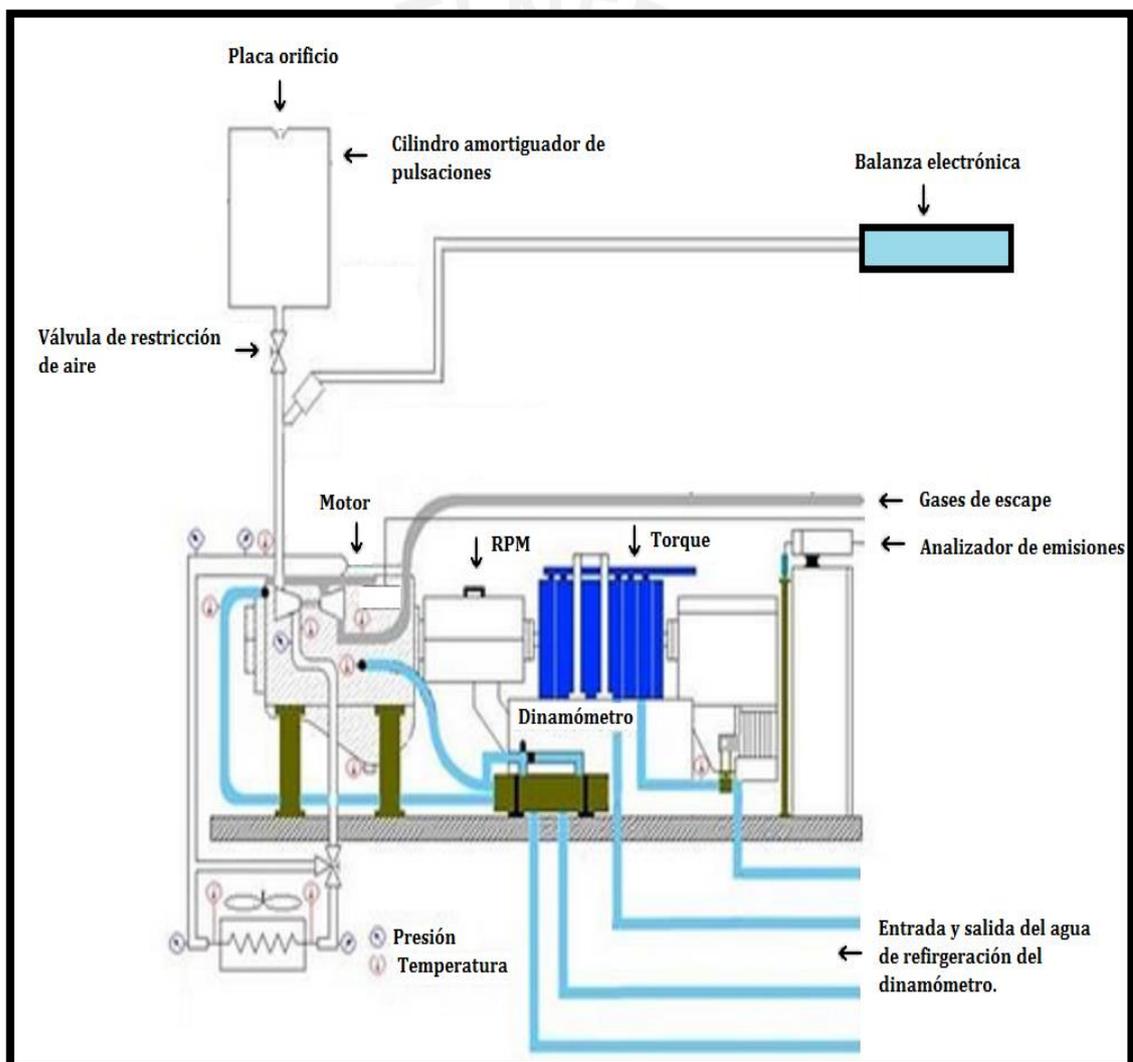


Figura 3.3 – Esquema del banco de pruebas utilizado para los ensayos.

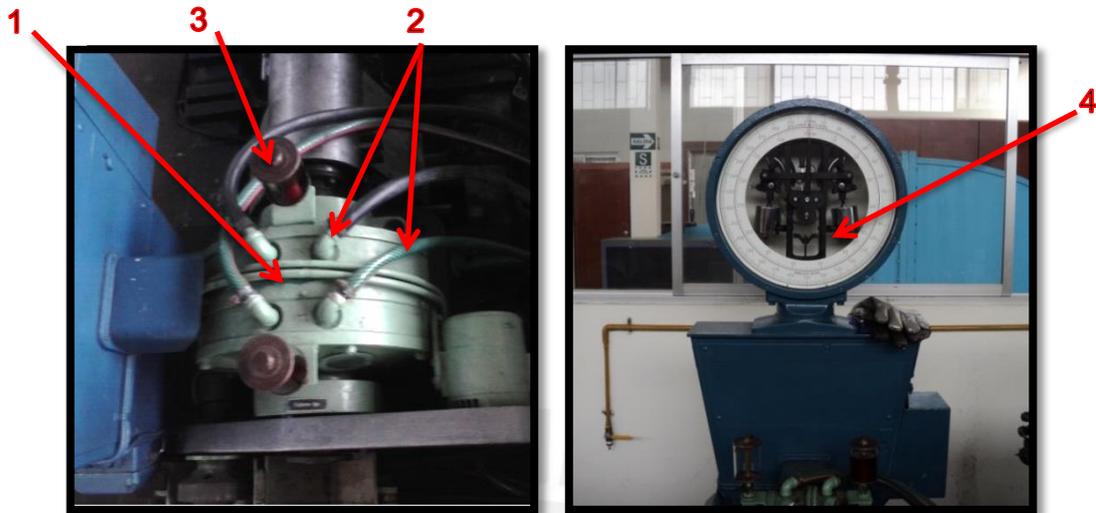


Figura 3.4 – Dinamómetro instalado en el banco de pruebas.

**1 – Freno del dinamómetro; 2 – Mangueras de entrada y salida del agua de refrigeración;
3 – Aceiteras; 4 – Indicador analógico.**

En la Tabla 3.2 se proporciona los principales datos del motor de encendido por chispa utilizado para los ensayos. Este motor de modelo GA15DS es de aplicación vehicular (ver Figura 3.5) y fue instrumentado con un sensor de presión (admisión de aire) y tres sensores de temperatura (aceite lubricante, entrada de refrigerante y salida de refrigerante).

Tabla 3.2 – Datos del motor utilizado para los ensayos.

Marca:	Nissan GA15DS
Potencia:	70 kW – 6000 rpm
Torque:	126 N.m – 3600 rpm
Cilindrada:	1497 cc (centímetros cúbicos)
Diámetro de cilindro:	73,6 mm
Carrera del pistón:	88 mm
Relación de compresión:	9,5:1
Número de cilindros:	4
Tipo de encendido:	Chispa
Inyección de combustible:	Carburador
Admisión de aire:	Válvula mariposa

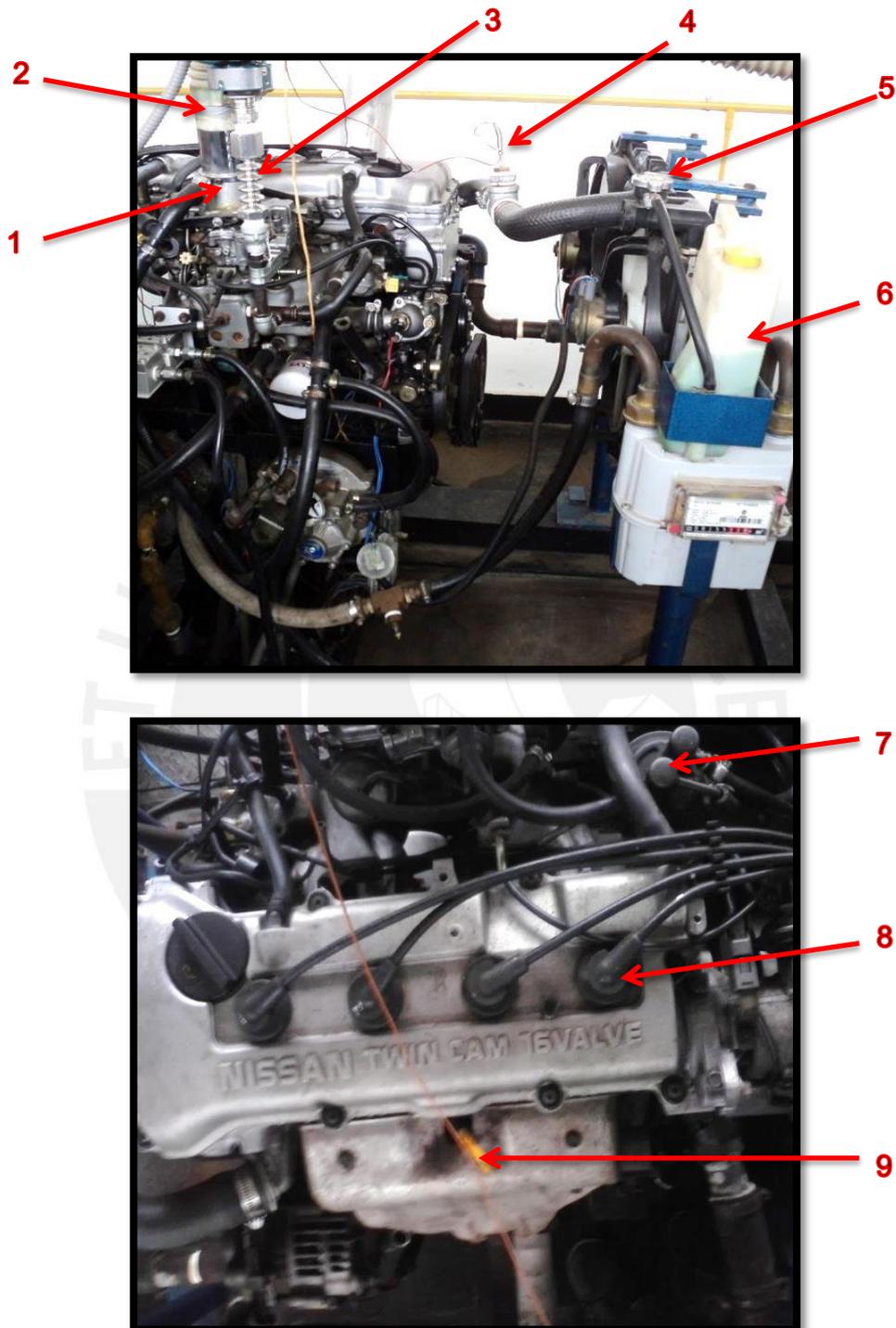


Figura 3.5 – Motor Nissan GA15 instalado en el Laboratorio de Energía.

1 – Carburador; 2 – Entrada de aire al carburador; 3 – Sensor de presión instalado en la admisión; 4 – Termocupla instalada en la conexión entrada de refrigerante; 5 – Intercambiador de calor; 6 – Refrigerante; 7 – Bomba de combustible; 8 – Protectores de bujías para cada cilindro; 9 – Medidor de nivel de aceite.

Para tener una mayor precisión de la medición de las RPM del motor, fue instalado un sensor inductivo, colocado en la carcasa de la volante, cuya resolución es de ± 1 rpm. Este sensor de velocidad conjuntamente con los de presión y temperatura mencionados anteriormente; así como, un sensor de presión digital marca Dwyer, fueron conectados a un registrador de datos (Yokogawa), ver Figura 3.6, para tener una constante y rápida lectura de los registros, ya que el registrador podía grabar los datos leídos por los sensores a cada segundo; lo que permitía, una vez terminado los ensayos poder pasar esos datos a una memoria externa y poder trabajar los datos obtenidos en una hoja de cálculo.

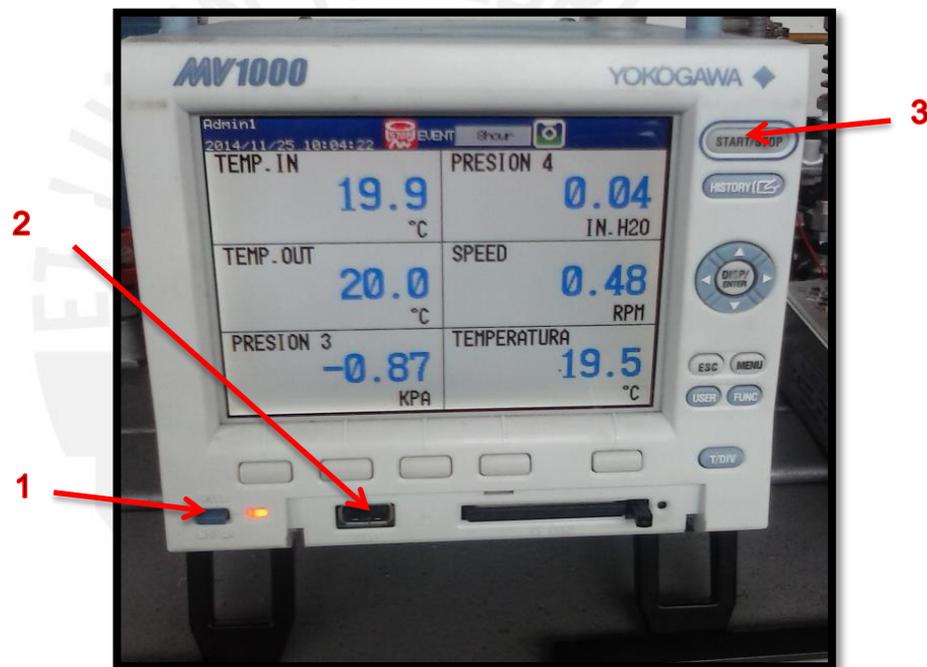


Figura 3.6 – Registrador de datos marca Yokogawa.

1 – Botón de encendido y apagado; 2 – Puerto para la conexión de memoria externa; 3 – Botón para grabar los datos durante el ensayo.

La Figura 3.7 ilustra el sistema usado en la medida del consumo combustible. Un recipiente de 5 galones era constantemente pesado en una balanza electrónica (resolución ± 1 gramo). Cuando el punto “torque x rotación” era estable, se medía la masa de combustible consumida durante un intervalo de tiempo en que dicho consumo ocurría (normalmente 60 segundos). La relación entre la masa y el tiempo para su consumo proporcionó el valor del consumo de combustible.

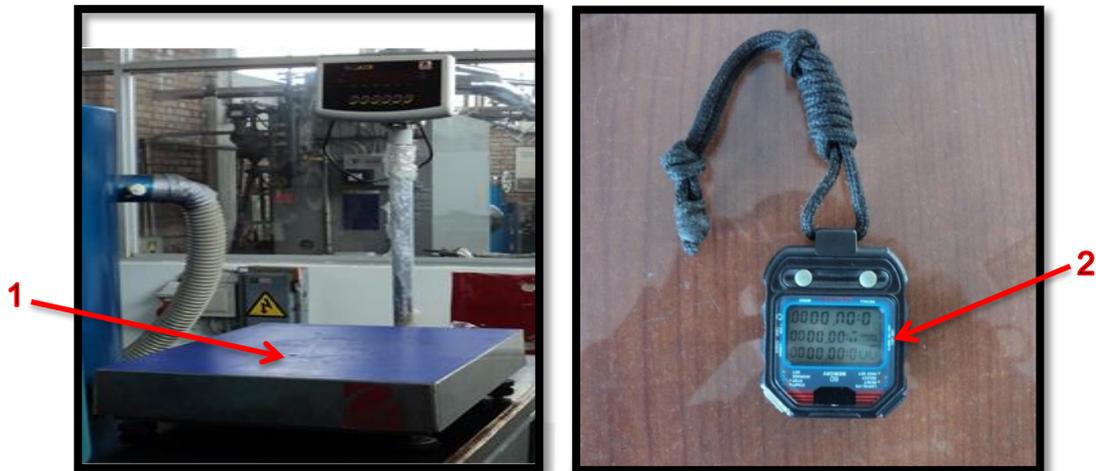


Figura 3.7 – Sistema usado para la medición del consumo de combustible.

1 – Balanza electrónica; 2 – Cronómetro digital.

En la Figura 3.8 se ilustra la placa orificio y el tanque empleado en la medida del consumo de aire. El diámetro de la placa es de 76 mm y, según datos de calibración, el coeficiente de pérdida de carga es de 0,6. El tanque empleado en la admisión tiene como misión el amortiguamiento de las pulsaciones de presión durante las fases de admisión del motor. De ese modo se garantizaba el flujo permanente en la placa orificio.



Figura 3.8 – Sistema usado para la medición del consumo de aire.

1 – Placa orificio; 2 – Conexión dirigida al sensor de presión; 3 – tanque amortiguador de pulsaciones.

La Figura 3.9 muestra el manómetro digital Dwyer utilizado para medir la diferencia de presión a través de la placa orificio, en este instrumento un orificio conecta al inferior del tambor del tanque amortiguador, mientras que el otro se encontraba libre a la atmósfera. Además se muestra el higrómetro usado para medir temperatura de ambiente (resolución de ± 2 °C) y porcentaje de humedad relativa (resolución de ± 1 %) en la zona de ensayo.

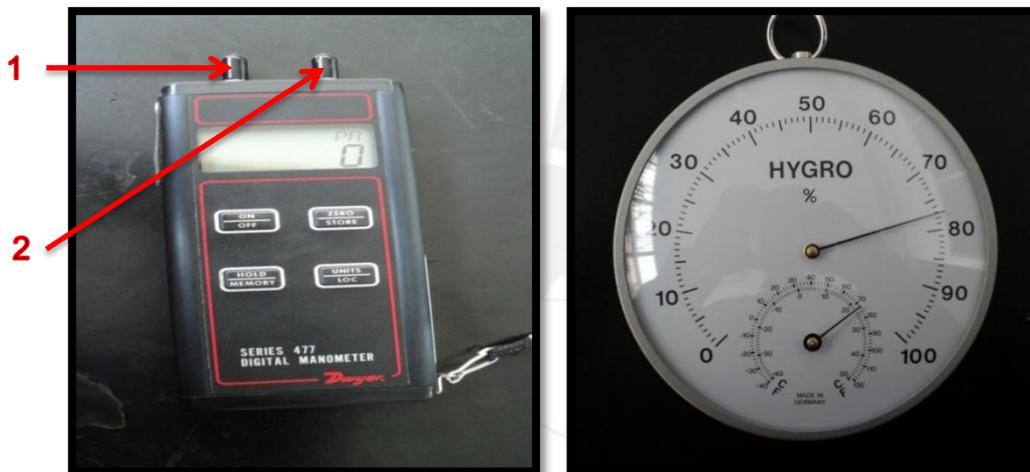


Figura 3.9 – Manómetro digital Dwyer e higrómetro.

1 – Orificio conectado a la conexión del tanque; 2 – Orificio libre a la atmósfera.

Finalmente, las mediciones de emisiones se llevaron a cabo en el segundo piso del Laboratorio de energía, pues la instalación de la tubería de escape está dispuesta de esa manera. Para poder tomar registros de los datos de emisiones se tuvo que colocar una sonda dentro del tubo de escape, y esperar unos segundos para que el analizador de gases de fabricación AVL leyera los datos respectivos para CO, HC, CO₂, O₂ y factor lambda. En la Figura 3.10 se muestra el sistema de medición de emisiones, mientras que en la Tabla 3.3 se presenta características del analizador de gases.

Tabla 3.3 – Características del analizador de gases.

Emisiones	Rango	Resolución
CO	0 – 10%	$\pm 0.01\%$
CO ₂	0 – 20%	$\pm 0.1\%$
HC	0 – 20000 ppm	± 1 ppm
O ₂	0 – 22%	$\pm 0.01\%$



Figura 3.10 – Sistema usado para la medición de emisiones.

1 – Analizador de gases AVL; 2 – Sonda a introducir en el tubo de escape; 3 - tubo de escape instalado.

3.3 Protocolo de ensayo

3.3.1 Registro de variables del motor en banco de pruebas

Después de haber explicado de qué manera se realizarán las mediciones de los diferentes parámetros involucrados en los ensayos y, asimismo, mostrar los equipos e instrumentos utilizados para realizar dichas medidas.

A continuación se presentan en la Tabla 3.4 las variables a medir para cada uno de los ensayos:

Tabla 3.4 – Variables involucradas en los ensayos.

Variable	Unidad
Temperatura de entrada de refrigerante	[°C]
Temperatura de salida de refrigerante	[°C]
Temperatura de aceite	[°C]
Temperatura de ambiente	[°C]
Presión de ambiente	[milibar]
Presión de admisión	[kPa]
Variación de presión en la placa orificio del aire de admisión	[pulgadas H ₂ O]
Torque	[N.m]
Régimen de giro	[rpm]
Humedad relativa de ambiente	[%]
Medida gravimétrica del consumo de combustible	[kg]
Tiempo	[s]
Monóxido de carbono	[%]
Dióxido de carbono	[%]
Oxígeno	[%]
Hidrocarburos no quemados	[ppm]
Factor lambda	-

3.3.2 Verificación del banco de pruebas.

Cada día antes de iniciar los ensayos respectivos, se verificaba que el tanque de aceite del motor se encuentre lleno, de no ser así, se procedía a llenarlo. Asimismo, se verificaba el nivel de refrigerante en el tanque de expansión y que exista flujo de agua para poder refrigerar el dinamómetro. Además se requintaban los pernos del eje cardan que unía la volante del motor con el dinamómetro. Del mismo modo se constataba que haya flujo de corriente para poder energizar el panel de control del motor (ver Figura 3.11).

En general, una vez encendido el motor, se tuvo que esperar algunos minutos para que este alcance algunas condiciones óptimas de operación, tales como, que la temperatura del refrigerante llegue hasta 80°C aproximadamente lo que significaba que el motor ya había calentado lo suficiente y se podían iniciar los ensayos.

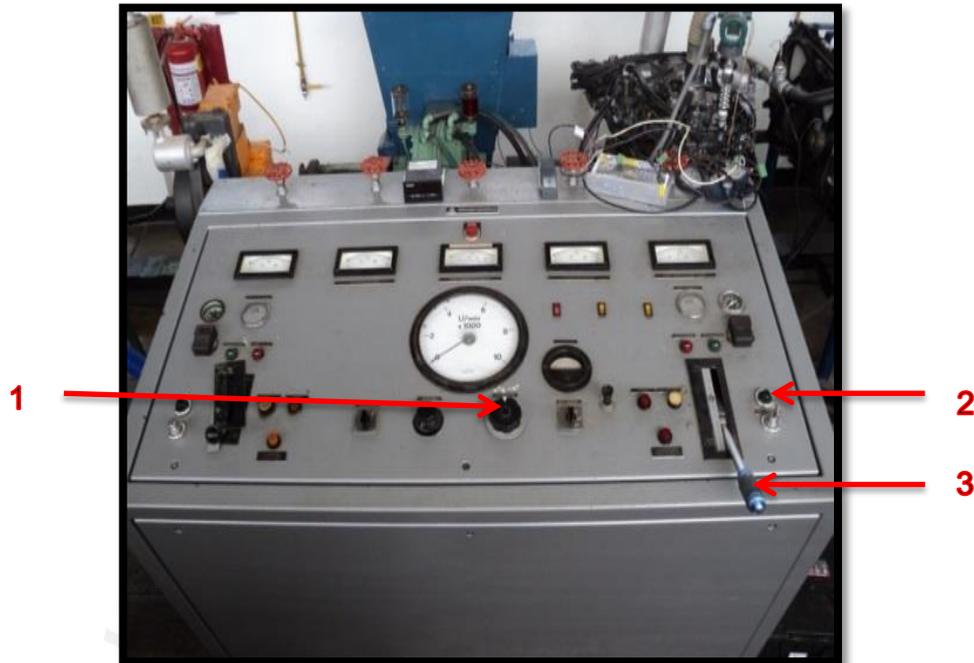


Figura 3.11 – Panel de control del motor Nissan.

1 – Perilla de excitación para aplicar el freno al motor; 2 – Botón para encender el motor;
3 - Acelerador manual del motor.

3.3.3 Procedimiento de ensayo a plena carga y carga parcial

Para los ensayos a plena carga, se maniobró la palanca del acelerador hasta poder ponerlo en la posición de máxima apertura de la válvula de admisión; una vez fijada esta posición, se maniobró la perilla de excitación y se iba aplicando freno paulatinamente hasta obtener la velocidad requerida definida por la matriz de ensayo, la cual consta de 12 puntos “3 velocidades x 4 torques” (Figura 3.12), este procedimiento se realizó para 2500 rpm, 3500 rpm y 4500 rpm para un determinado combustible, con lo que se obtuvo la curva a plena carga (línea azul).

Una vez que se obtuvieron los torques máximos para cada velocidad, se calcularon los torques parciales a 75%, 50% y 25% del torque máximo, lo cual generó las otras tres curvas de las matriz de ensayo (líneas guinda, verde y morado respectivamente). Al tener los valores de los nueve puntos faltantes se procedió a ensayar el motor a cargas parciales. En tal sentido, se hizo operar el motor a 2500 rpm y 75% del torque máximo maniobrando simultáneamente la palanca del acelerador y la perilla de excitación. Una vez estabilizado el motor a estas condiciones se procedió a tomar registro de todas las variables; lo mismo se realizó para los puntos a 50% y 25% del

torque máximo tanto para 2500 rpm como para 3500 rpm y 4500 rpm. Una vez completada la matriz para determinado combustible se realizó el cambio del recipiente para ensayar otro combustible.

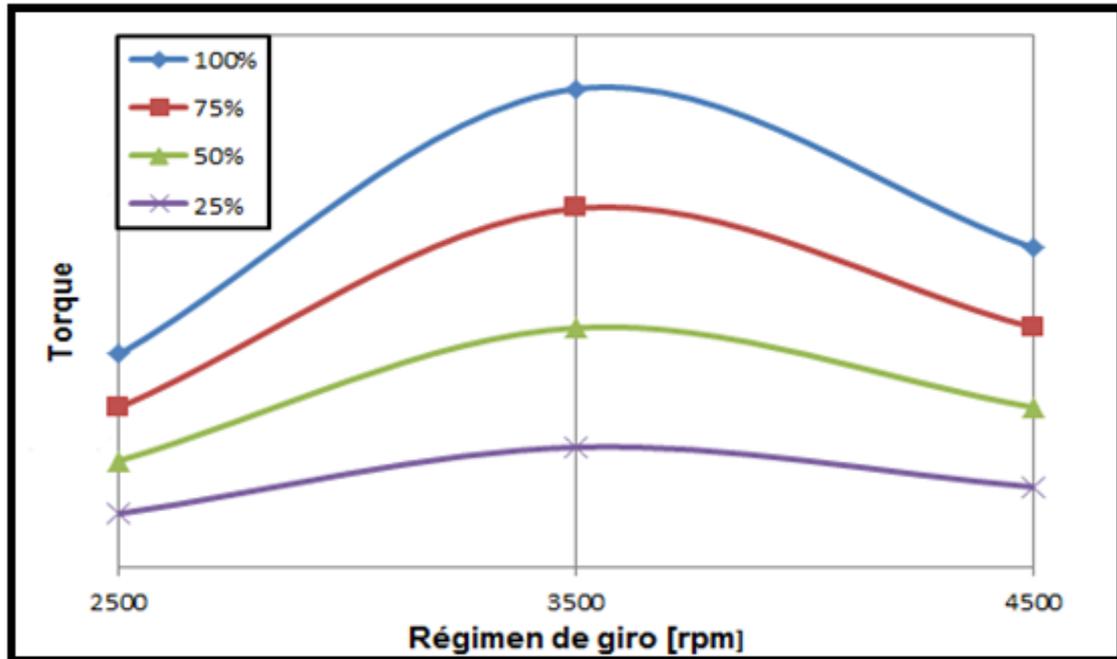


Figura 3.12 – Esquema referencial de la matriz de ensayos “Torque x rpm”.

Nota: Los valores de torque serán obtenidos durante los ensayos.

Tener en cuenta que para cada punto de la matriz se hicieron dos mediciones y, que la matriz contiene 12 puntos, y que fueron ensayados 6 combustibles diferentes, se obtiene un total de 144 mediciones, considerando además que son 17 variables registradas por medición, resulta que son 2448 datos registrados; lo que verifica la repetitividad de los mismos.

Para la correcta medición de los gases de escape, se introdujo la sonda de gases al menos 30 cm dentro del tubo de escape del motor, se esperó algunos segundos, se registraron los datos que aparecieron en la pantalla del analizador de gases y se retiró la sonda.

Una vez terminadas todas las mediciones en el día se procedió a apagar el motor, primeramente se redujo el torque aplicado en el dinamómetro maniobrando la perilla de excitación, al mismo tiempo se desaceleró el motor para cuidar que este no se

embale al disminuirle la carga. Luego de esto, cuando el motor ya no gira, se desenergiza el panel de control y se gira la llave de encendido.

3.4 Expresiones para cálculo de parámetros

Potencia efectiva:

La potencia efectiva que entrega el motor, depende del torque efectivo y del régimen de giro del motor, es dada por la siguiente expresión:

$$P_e = T * 2\pi * \frac{n}{60000} \quad (1)$$

Donde:

P_e = potencia efectiva [kW].

T = torque [N.m].

n = régimen de giro [rpm].

Presión media efectiva:

La presión media efectiva es un parámetro que permite poder comparar motores de muy distinto tamaño y régimen de giro; el cual se define como la presión constante que durante una carrera del pistón, produce un trabajo igual al trabajo efectivo, y es dada por la siguiente expresión:

$$pme = \frac{W_e}{V_t} = \frac{P_e}{(n * V_t * i)} \quad (2)$$

Donde:

pme = presión media efectiva [bar].

W_e = trabajo efectivo del motor [kJ].

V_t = volumen total desplazado o cilindrada del motor [m³].

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

Flujo másico de aire:

El flujo o consumo de aire que es admitido por el motor se realiza a través de la placa orificio, por lo que se debe conocer la densidad del aire ambiente y la velocidad del aire a través de la placa.

- Densidad del aire

$$\rho_{aire} = \frac{P_{atm}}{R_{aire} * (273 + T_{amb})} \quad (3)$$

Donde:

ρ_{aire} = densidad del aire ambiente [kg/m³].

P_{atm} = presión atmosférica [kPa].

R_{aire} = constante del aire ambiente [0.287 kJ/kg.K].

T_{amb} = temperatura del aire ambiente [°C].

- Velocidad del aire

$$V_{aire} = Cd * \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{aire}}{\rho_{aire}}} \quad (4)$$

Donde:

Cd = Coeficiente de descarga en la placa orificio [0.6].

ΔP_{aire} = La diferencia de presión a través de la placa orificio [kPa].

V_{aire} = Velocidad del aire en la placa orificio [m/s].

- Flujo volumétrico del aire

$$\dot{V}_{aire} = V_{aire} * A \quad (5)$$

$$\dot{V}_{aire} = \frac{V_{aire} * \pi * d_{placa}^2}{4} \quad (6)$$

Donde:

A = área de la placa orificio [m^2].

\dot{V}_{aire} = flujo volumétrico de aire [m^3/s].

d_{placa} = diámetro de la placa orificio [m].

- Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{aire} = \dot{V}_{aire} * \rho_{aire} \quad (7)$$

Donde:

\dot{m}_{aire} = flujo másico de aire [kg/s].

Consumo específico de combustible:

El consumo específico de combustible es un parámetro que indica el consumo de combustible por unidad de tiempo referido a la potencia efectiva desarrollada; este depende del flujo másico de combustible y de la potencia efectiva del motor.

Para el uso de mezclas, el cec fue determinado empleando la siguiente expresión:

$$cec = \frac{\dot{m}_g + \left(\frac{PCI_e}{PCI_g}\right) * \dot{m}_e}{P_e} \quad (8)$$

Donde:

cec = consumo específico de combustible [$g/kW.h$].

\dot{m}_g = flujo másico de gasolina correspondiente a la mezcla [g/h].

\dot{m}_e = flujo másico de etanol correspondiente a la mezcla [g/h].

PCI_g = poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg].

PCI_e = poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg].

Rendimiento efectivo:

El rendimiento efectivo del motor es un parámetro que depende de la potencia efectiva desarrollada por el motor y la energía que suministra el combustible.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_g * PCI_g + \dot{m}_e * PCI_e} * 100 \quad (9)$$

$$\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} = \frac{\rho_e \cdot \dot{V}_e}{\rho_g \cdot \dot{V}_g} \quad (10)$$

$$\dot{V}_T = \dot{V}_e + \dot{V}_g \quad (11)$$

El porcentaje de etanol en la mezcla es: $\frac{\dot{V}_e}{\dot{V}_T}$ (12)

Donde:

η_e = rendimiento efectivo [%].

ρ_e = densidad del etanol [kg/m³].

ρ_g = densidad de la gasolina [kg/m³].

\dot{V}_T = flujo volumétrico total de la mezcla [m³/h].

\dot{V}_e = flujo volumétrico del etanol [m³/h].

\dot{V}_g = flujo volumétrico de la gasolina [m³/h].

Rendimiento volumétrico:

Es un indicador de llenado del cilindro, el cual depende del flujo de masa de aire real admitido en el cilindro y el flujo de masa de aire a unas condiciones de referencias (en nuestro caso fue considerando las condiciones de la sala de pruebas).

$$\eta_V = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{aireref}} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire} \cdot V_t \cdot l \cdot \frac{n}{60}} * 100 \quad (13)$$

Donde:

η_V = rendimiento volumétrico [%].

$\dot{m}_{aireref}$ = flujo másico de aire a unas condiciones de referencia [kg/s].

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las planillas conteniendo todas las variables medidas y calculadas se encuentran detalladas desde el **Anexo 3.1** hasta el **Anexo 3.8**. Cabe destacar que, en las planillas, cada una de las medidas experimentales incluye su respectiva incertidumbre y/o desviación estándar.

Para el caso del torque efectivo y la potencia efectiva del motor, a plena carga, ver Figura 4.1 y Figura 4.2 respectivamente. De modo general, se puede observar que conforme se aumenta el régimen de giro del motor el torque efectivo tiende a disminuir. En relación al efecto de las mezclas sobre el torque máximo a una determinada RPM, se muestra que no existen variaciones considerables a tomar en cuenta, ya que para todos los combustibles el torque efectivo varía en un rango muy pequeño, siempre teniendo en cuenta que el mayor torque lo genera el combustible E7,8.

En lo que respecta a la potencia (Figura 4.2), la variación también es mínima ya que es dependiente del torque y del régimen de giro del motor. Inicialmente, se observa un aumento de la máxima potencia con el régimen de giro; sin embargo a partir de 3500 rpm, el aumento de la velocidad tiende a disminuir la potencia efectiva. Asimismo, conforme se aumentan las RPM queda evidenciada una mayor caída de la potencia observada cuando mayor es el porcentaje de etanol en la mezcla. En el caso particular, observando los resultados a 4500 rpm, por ejemplo, las máximas potencias

fueron 21,1 y 19,8 kW para E7,8 y E12,5 respectivamente. Esta diferencia representa una caída de 6,3% de la potencia al usar E12,5 con respecto a E7,8.

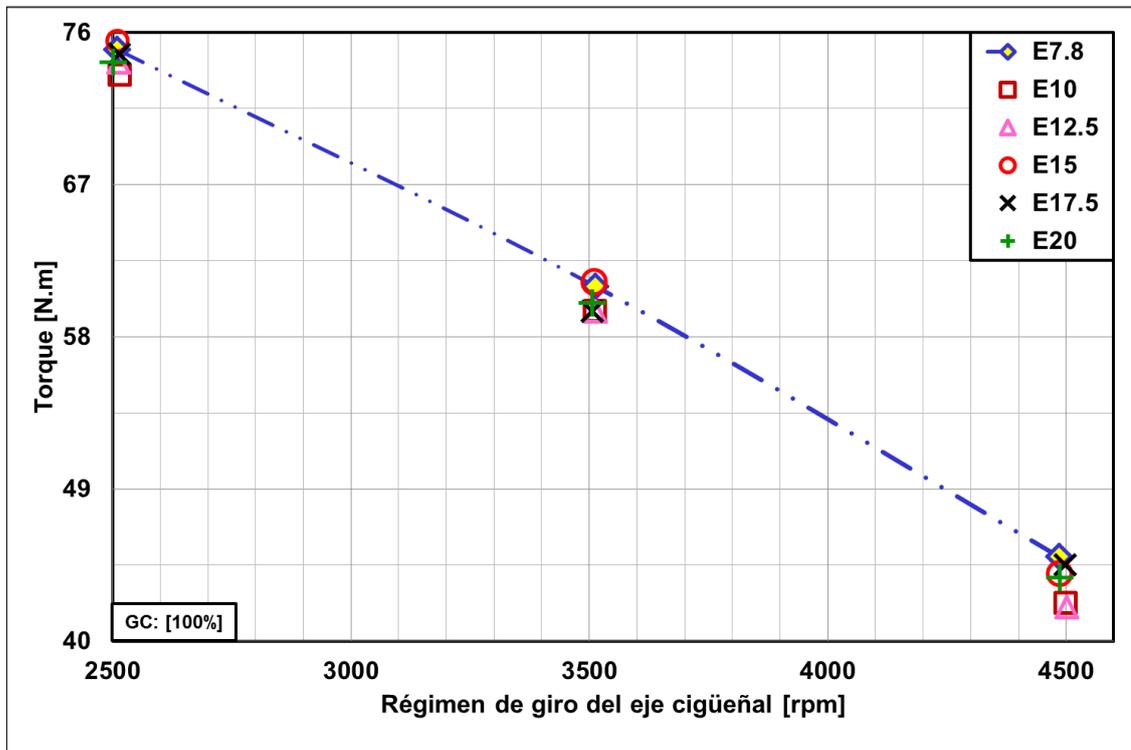


Figura 4.1 – Torque versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

En las figuras 4.3 a 4.5 son ilustrados los datos y tendencias del consumo de combustible en los tres regímenes de giro, los cuales muestran que el \dot{m}_c , como era de esperarse, aumente para producir una mayor potencia efectiva.

Otra particularidad importante de mencionar es que conforme se aumenta la velocidad del motor, el consumo de combustible aumenta proporcionalmente con este, sin importar el porcentaje de carga a la que se encuentre sometido, ni la cantidad de etanol contenido en la mezcla.

No obstante, en 4500 rpm (Figura 4.5) se constata que en la menor potencia, aproximadamente 5 kW, el valor del consumo con E7,8 provoca una inflexión en la curva del consumo. Al parecer, este resultado estaría asociado a un error experimental en la medición, ya que, como es sabido, el uso de mayor porcentaje de etanol debería incrementar el flujo de combustible por causa del menor poder calorífico del etanol.

En la Figura 4.4, cuando el motor funcionó a 22 kW aproximadamente en 3500 rpm, por ejemplificar un caso específico, el máximo flujo de combustible con E20 fue 7,5 kg/h (símbolo verde) lo que generó un aumento del 4,2% del consumo de combustible con respecto al E7,8 (símbolo azul), el cual tiene un $\dot{m}_c = 7,2$ kg/h; sin embargo, existe una excepción a la tendencia por parte del combustible E17,5 (símbolo negro) que a plena carga tiene un flujo de 6,6 kg/h lo que genera una disminución del consumo de combustible en aproximadamente 8,3% con respecto al E7,8. Este fenómeno puede ser, posiblemente, debido a algún error en los registros de datos cuando se realizaron los ensayos correspondientes.

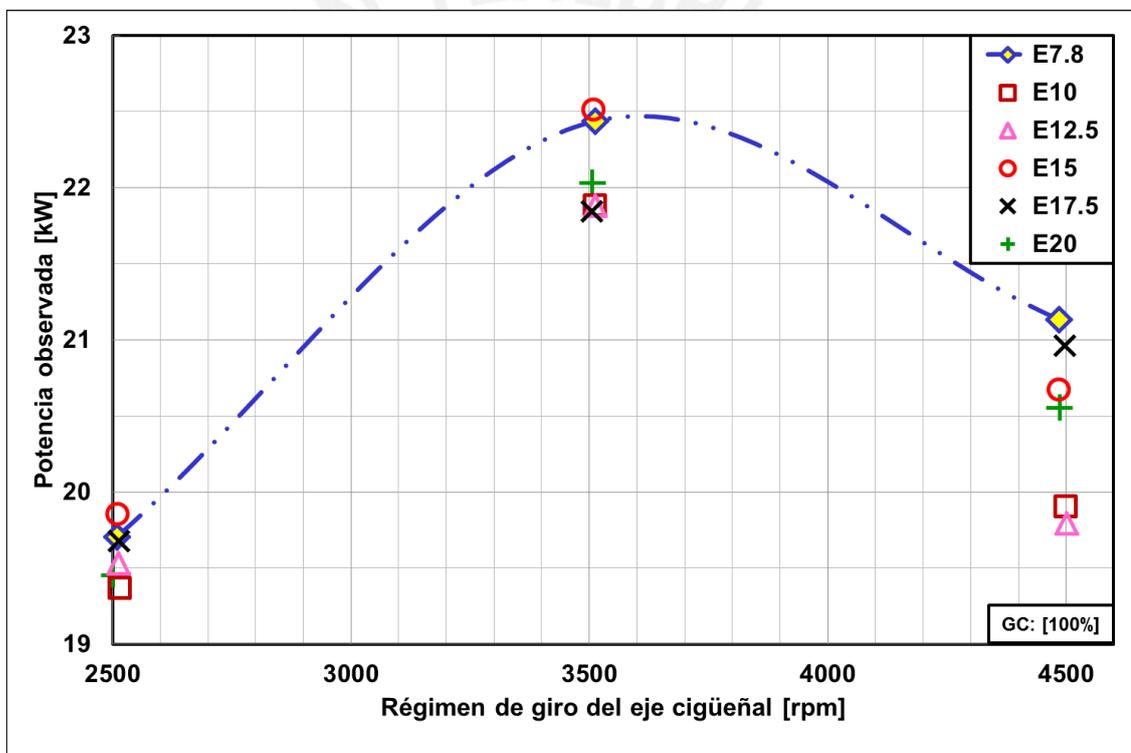


Figura 4.2 – Potencia observada versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Para los resultados adquiridos a 2500 rpm y plena carga, se observa una notoria dispersión en los puntos graficados de potencia efectiva al comparar los combustibles ensayados, esto debido a que el torque efectivo para cada uno de ellos es diferente, sin embargo, la predisposición de los demás puntos de potencia efectiva conseguidos a 75%, 50% y 25% de plena carga, tienen el mismo comportamiento que a plena carga, es decir, si el E7,8 tiene un valor potencia efectiva más a la derecha (mayor valor) a plena carga, con respecto a los demás combustibles, la misma conducta se tiene para

los puntos de potencia efectiva a cargas parciales del mismo combustible. El sistema de análisis es el mismo a 3500 rpm y 4500 rpm.

Una particularidad importante de dar a conocer es que para la Figura 4.5, cuando el motor trabaja a 4500 rpm, el menor consumo de combustible es propio de la mezcla E15, para todas las cargas a la que es sometido el motor; entonces cuando el motor trabaja a altas velocidades, sin importar el porcentaje de exigencia a la que es sometido, la mejor opción es usar E15, por ejemplo para 75% de carga se tiene un valor de 6,45 kg/h lo que genera una disminución del flujo de combustible en 12,2% con respecto al E7,8 cuyo valor es 7,35 kg/h. Del mismo modo, se debe poner atención en el punto E7,8 a 25% de plena carga, ya que se obtuvo un resultado que no sigue la predisposición de los demás puntos, por lo que se infiere que para este punto también existió un error del registro de datos.

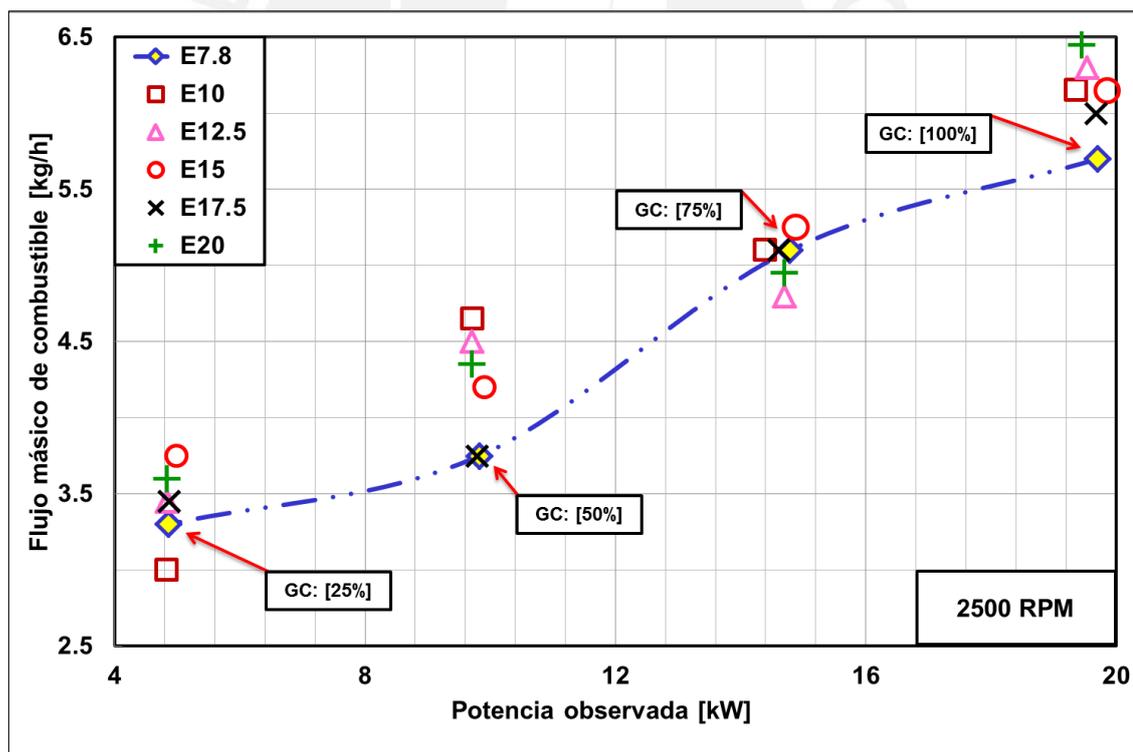


Figura 4.3 – Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

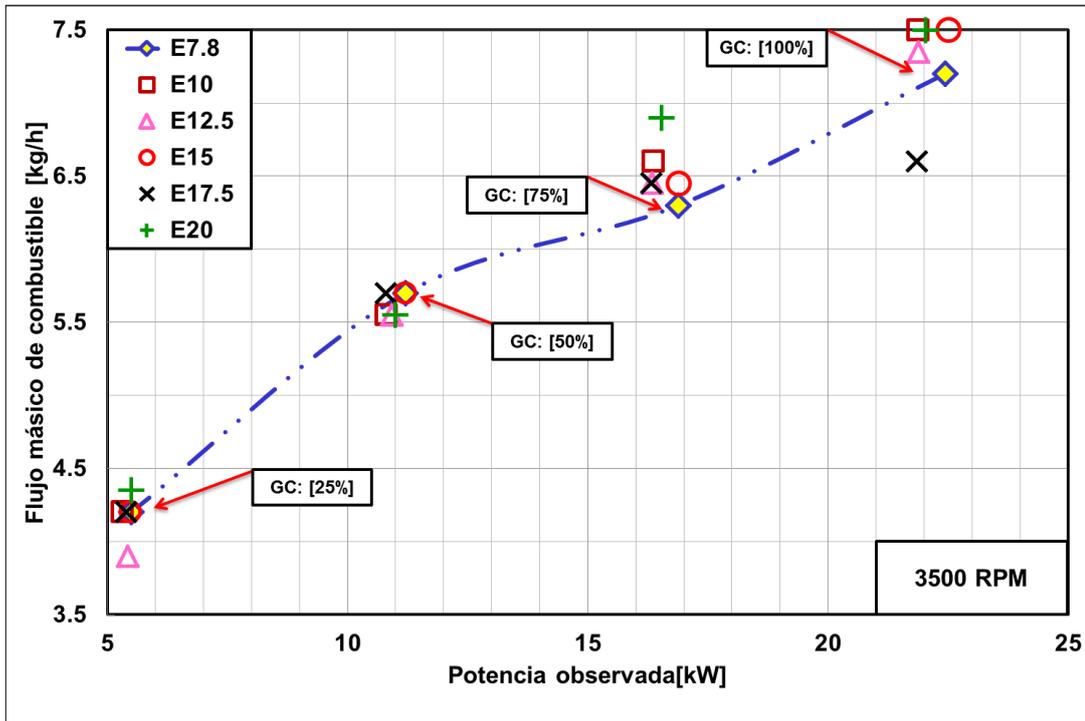


Figura 4.4 – Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

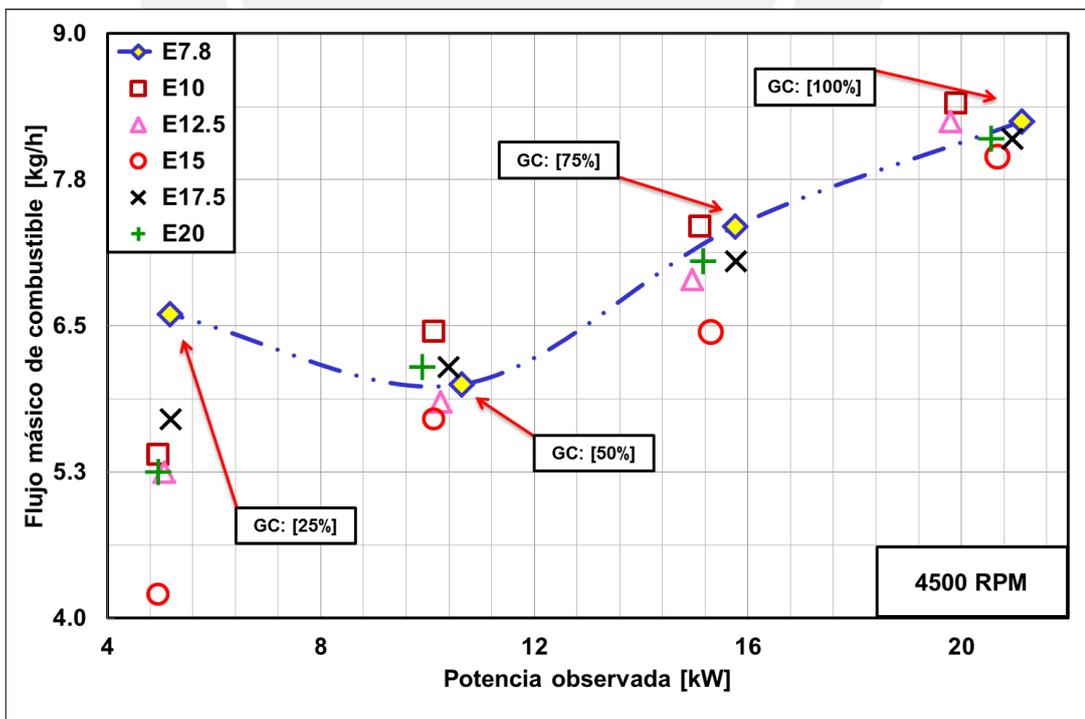


Figura 4.5 – Flujo másico de combustible versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

El flujo másico de aire aumenta conforme se aumenta la potencia y el régimen de giro del motor, esto se cumple para todos los combustibles involucrados en el ensayo, observando que mayormente para todos los puntos ensayados, los combustibles que necesitan una mayor cantidad de aire para la combustión son el E7,8 y el E20 (ver figuras 4.6 a 4.8).

Al ensayar el motor a la velocidad de 2500 rpm, ver Figura 4.6, se observa una disminución del consumo másico de aire conforme se aumenta la cantidad de etanol a la mezcla, para todas las cargas a las que fue sometido el motor; y esto es debido al aumento del flujo de combustible (ya observada en las figuras 4.3 a 4.5), el cual es admitido en el múltiple de admisión ocasionando un desplazamiento del oxidante; es decir, al entrar más combustible al motor, la cantidad de aire admitido disminuye.

Este fenómeno antes descrito es uno de los efectos ocasionados por la adición de etanol a la mezcla; el otro efecto ocasionado por este incremento del combustible, es que el etanol al tener un mayor calor latente de vaporización, necesita más energía por kilogramo para evaporarse, y esta energía extra que necesita es absorbida del aire admitido, con lo que disminuye la temperatura y, por ende, aumenta la densidad y masa del aire dentro de los cilindros del motor. El balance de estos dos efectos definirá el menor o mayor flujo de aire. Es así que, por ejemplo, en la Figura 4.6 y Figura 4.8 a 2500 rpm y 4500 rpm respectivamente se observa claramente que este segundo efecto es quien se impone al usar E17,5. Asimismo, este aumento es más notorio a bajas velocidades; dando un ejemplo concreto de lo antes explicado se tiene que para aproximadamente 10 kW en 2500 rpm se obtuvo una disminución del 4 % en el consumo de aire admitido al comparar el E7,8 (74 kg/h) y E17,5 (71 kg/h), es aquí donde se produce el primer efecto; ahora al comparar el E17,5 y el E20 (78 kg/h) se observa un aumento del consumo de aire en un 9,8% con lo que se explica el segundo efecto de adicionar etanol a la mezcla.

Al parecer el uso de E17,5 sería el límite de ponderación de uno u otro efecto sobre el consumo de aire, de la misma forma, una idéntica predisposición en los resultados se tiene cuando el motor fue puesto en marcha a 22 kW y 3500 rpm (Figura 4.7), el E17,5 sigue siendo el límite de quiebre. Para las demás cargas parciales el punto de quiebre

es el E15, y después de este punto el flujo de aire admitido aumenta por las razones antes explicadas.

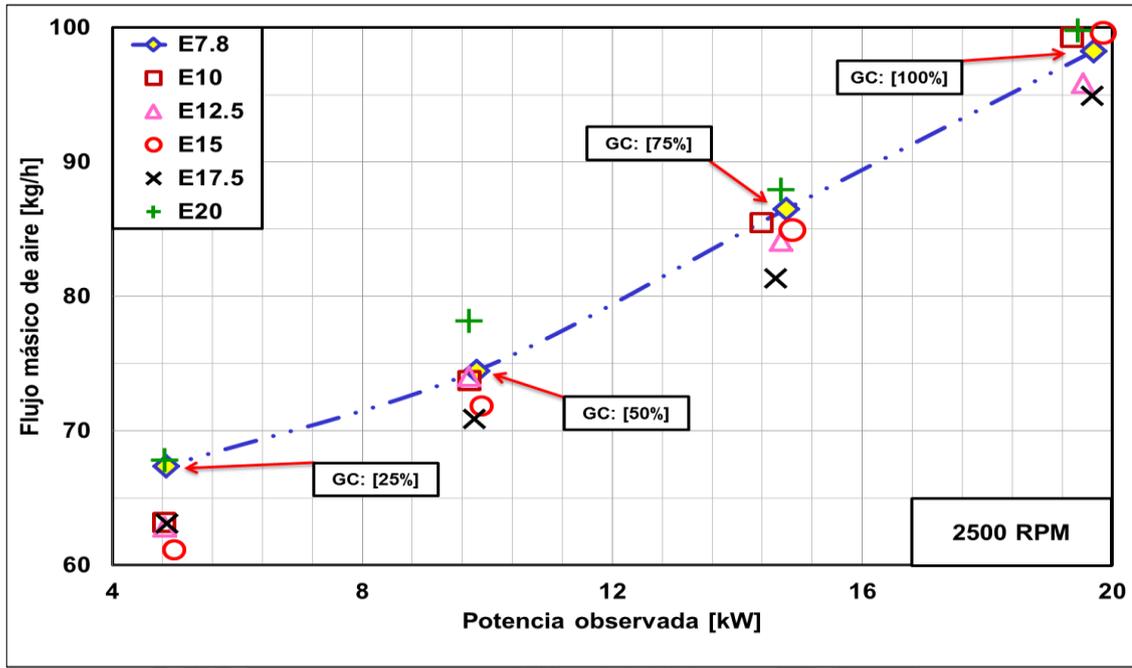


Figura 4.6 – Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

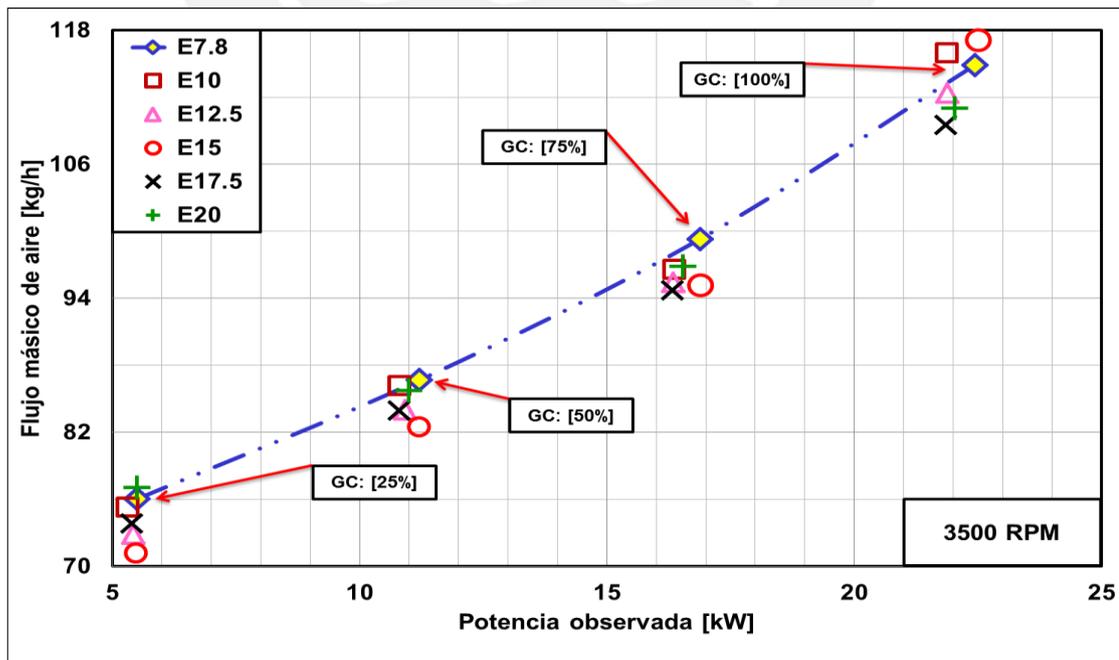


Figura 4.7 – Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

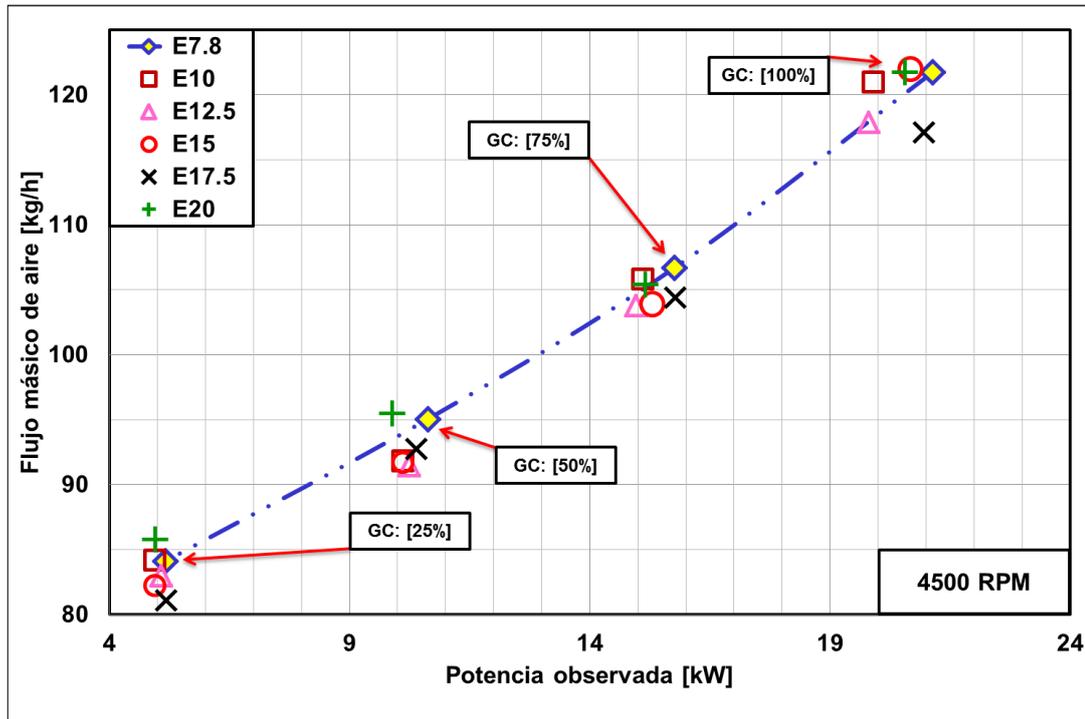


Figura 4.8 – Flujo másico de aire admitido versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

El factor lambda está fuertemente relacionado con el flujo másico de aire y flujo másico de combustible, viene a ser la relación entre el dosado estequiométrico de la mezcla y el dosado absoluto (masa de combustible/ masa de aire) del proceso de combustión. Es así que, en general, para la velocidad de 2500 rpm, ver Figura 4.9, el factor lambda aumenta conforme aumenta el porcentaje de etanol contenido en el combustible ensayado, esto se da para todas las cargas a las que fue sometido el motor, sin embargo, no hay una tendencia tan precisa de acuerdo al cambio o comportamiento del factor lambda al usar combustibles con diferentes porcentajes de etanol, ya que el dosado estequiométrico es propio y diferente para cada combustible.

Lo que si se debe resaltar, es que para cada potencia efectiva entregada por el motor, en cada punto de ensayo, al hacer el cálculo del lambda con el flujo másico de combustible y aire medido, este valor es estrechamente cercano con el valor del lambda directamente medido con el analizador de gases. En la Figura 4.10 y Figura 4.11 se observa el mismo comportamiento del factor lambda, excepto para el combustible E12.5, donde en algunos puntos y para algunas potencias tiene un valor menor al valor obtenido con E7.8.

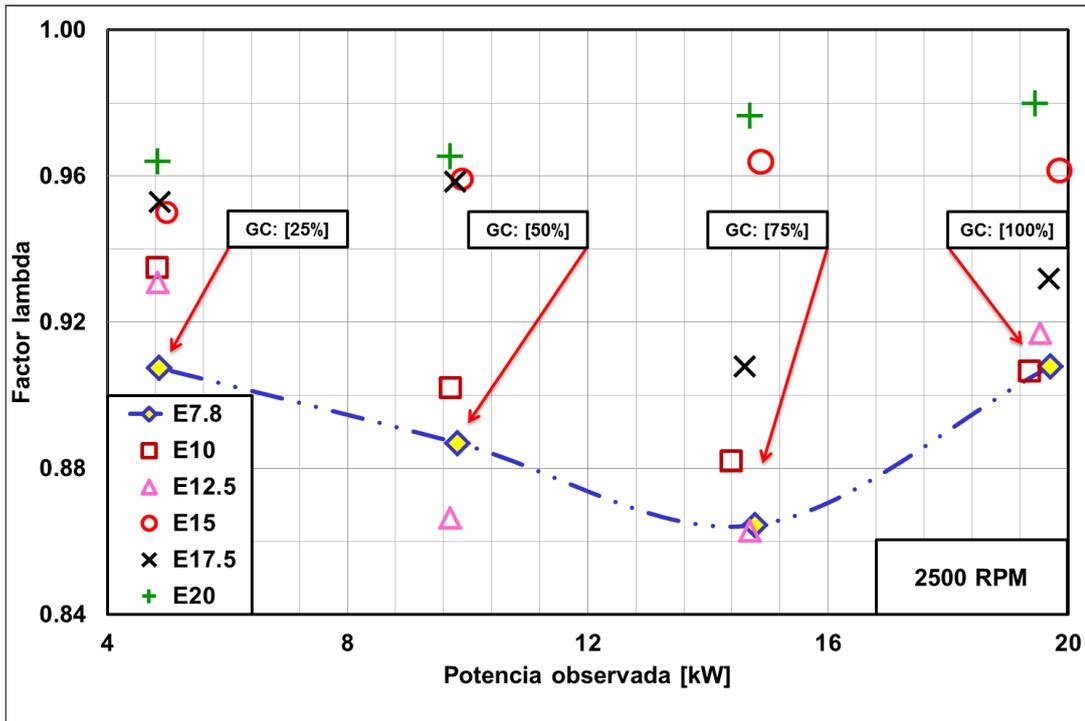


Figura 4.9 – Factor lambda versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

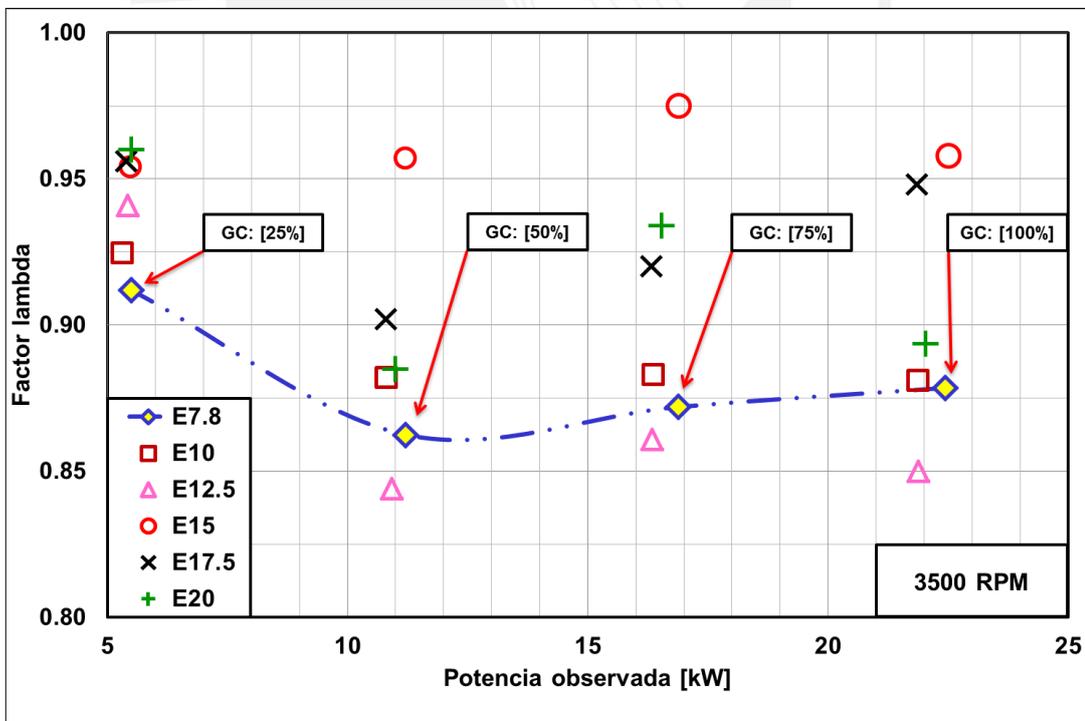


Figura 4.10 – Factor lambda versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

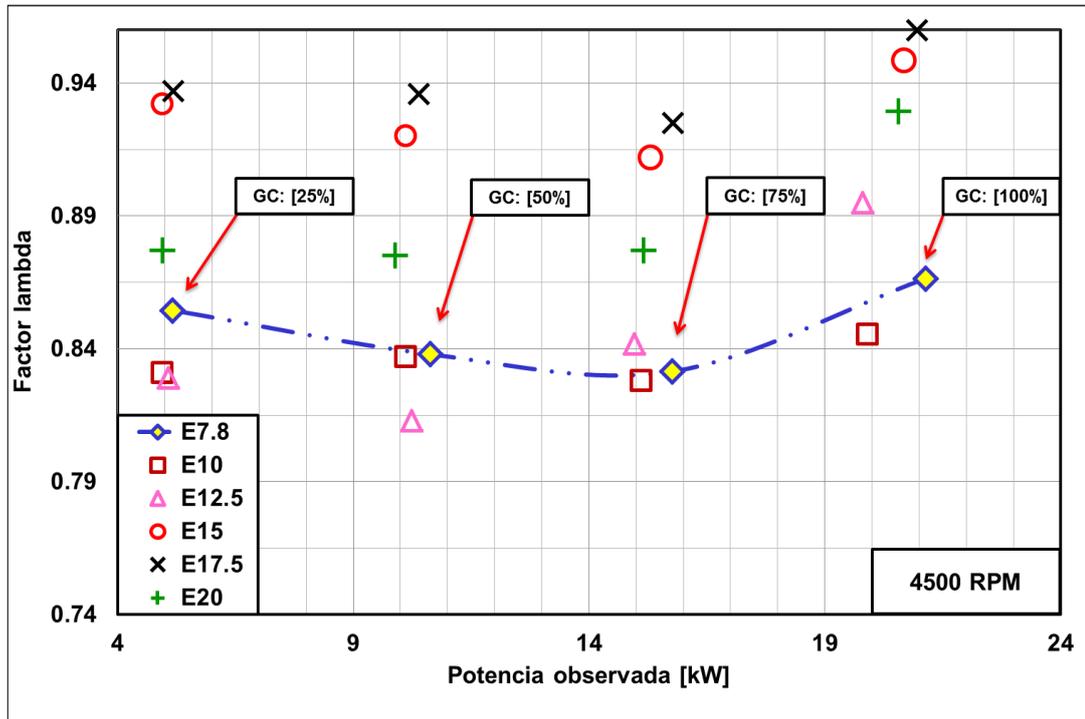


Figura 4.11 – Factor lambda versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Desde la Figura 4.12 hasta la Figura 4.14 son presentados los resultados obtenidos para el rendimiento efectivo del motor, donde se observa claramente un aumento del rendimiento conforme se aumenta el porcentaje de carga a la que es sometido el motor, esta tendencia se da para las tres velocidades ensayadas y para todos los combustibles utilizados. Teniendo en cuenta este aspecto, el rendimiento efectivo a plena carga de todos los combustibles para cada rpm (Figura 4.15) varía proporcionalmente a la potencia efectiva generada por el motor e inversamente proporcional al consumo de combustible y el poder calorífico inferior del combustible.

De modo general, en las figuras 4.12 a 4.14, se observa una tendencia a la reducción del rendimiento conforme se aumenta el régimen de giro del motor. En el caso de los rendimientos correspondientes a 2500 rpm (Figura 4.12) se muestra una tendencia al decrecimiento del rendimiento conforme se aumenta la cantidad de etanol en la mezcla, el cual está relacionado esencialmente con los resultados de la Figura 4.3 donde para el punto de plena carga, se observa, por ejemplo, un aumento del flujo de combustible conforme se aumenta el porcentaje de etanol; ya que la potencia a este punto es casi constante y el poder calorífico de cada combustible no varía

sustancialmente, por lo que el rendimiento efectivo queda enlazado mayormente al consumo de combustible. El mismo efecto e interpretación se aplica para los rendimientos correspondientes a 3500 rpm y 4500 rpm.

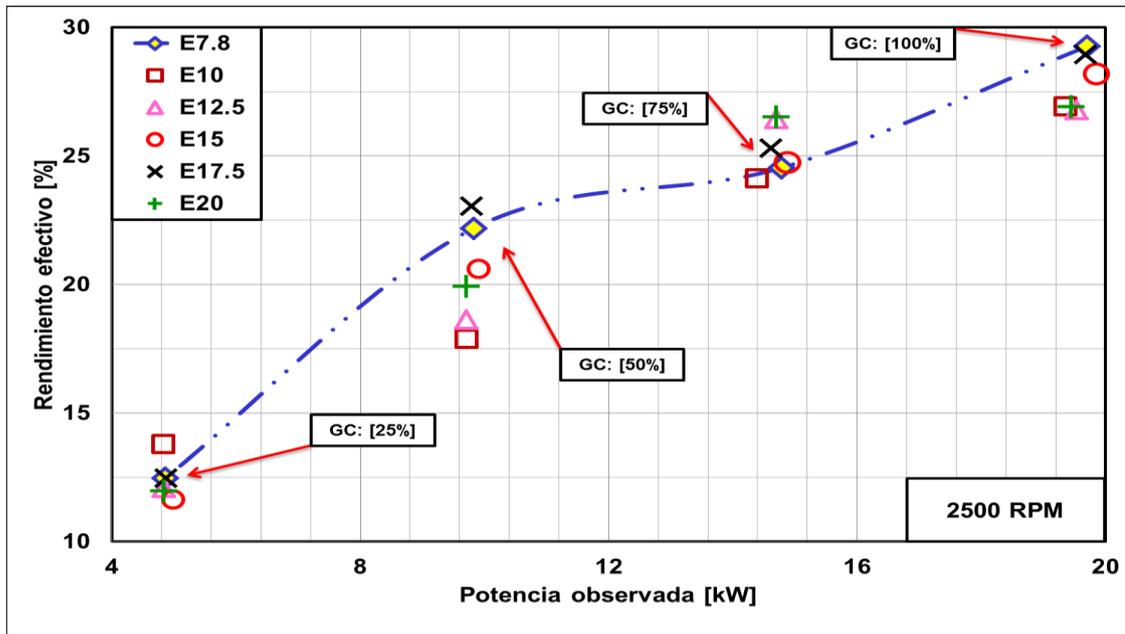


Figura 4.12 – Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

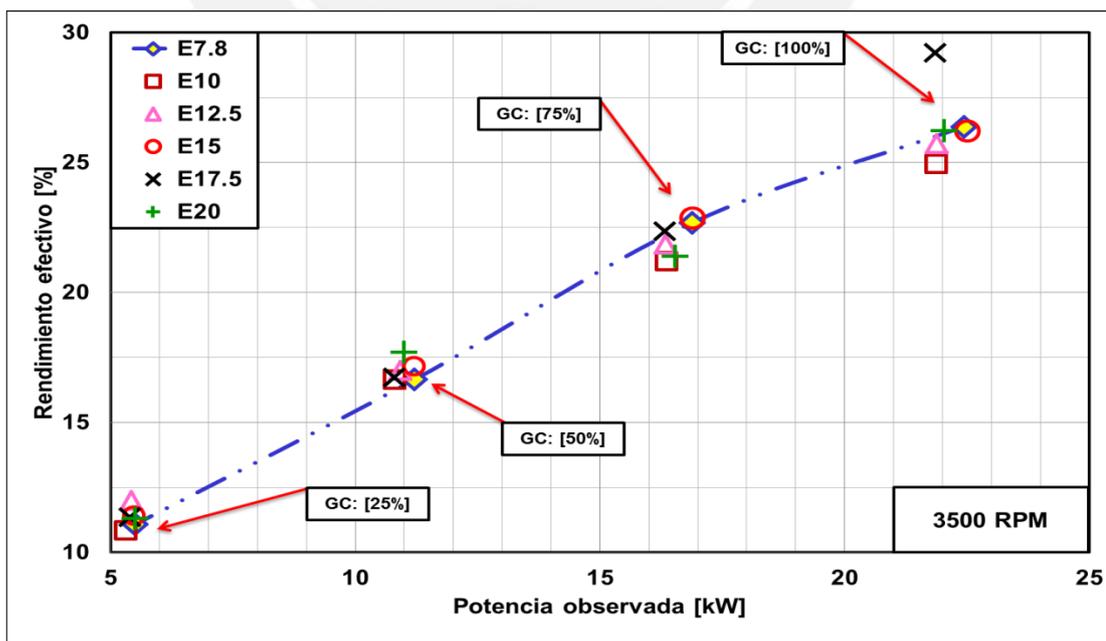


Figura 4.13 – Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 3500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

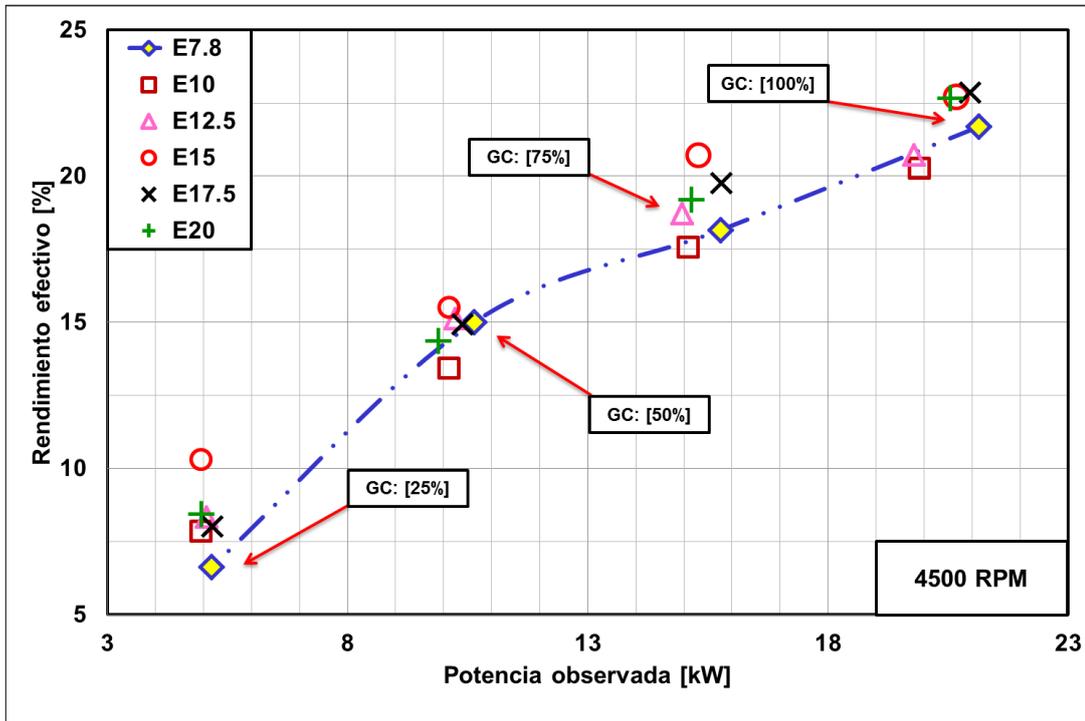


Figura 4.14 – Rendimiento efectivo versus Potencia observada a 4500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

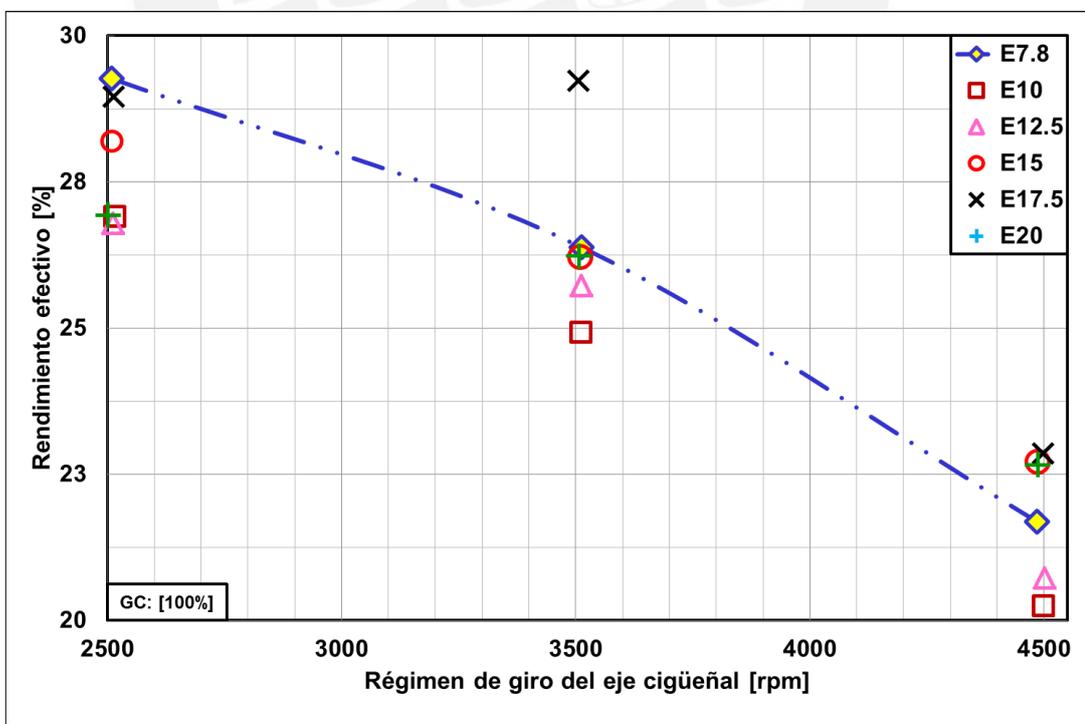


Figura 4.15 – Rendimiento efectivo a plena carga versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

El consumo específico de combustible, para los puntos a plena carga para cada velocidad, Figura 4.16, varía inversamente proporcional a la potencia efectiva generada por el motor y proporcionalmente al consumo de combustible. En el caso de 2500 rpm, el CEC aumenta directamente proporcional a la cantidad de etanol en la mezcla, con valores particulares de 289 y 331 g/kW.h para los combustibles E7,8 y E20, respectivamente con lo que se obtiene un aumento del CEC en 14,6% para esta velocidad; esto quiere decir, que para generar una misma potencia, los combustibles con mayor contenido de etanol necesitan quemar más combustible y esto es debido al menor poder calorífico inferior del etanol en comparación a la gasolina.

Para 3500 rpm, el CEC tiene la misma predisposición que para 2500 rpm, sin embargo, se registra un comportamiento distinto para el combustible E17,5, ya que para los demás combustibles la tendencia es a aumentar el CEC con respecto al E7,8, sin embargo para el E17,5 se registra un valor de 302 g/kW.h mientras que para el E7,8 el valor registrado es 320 g/kW.h con lo que se obtiene una disminución del 5,8 % en el CEC. Por tal motivo, se infiere que en este punto existe, posiblemente, un error de medición.

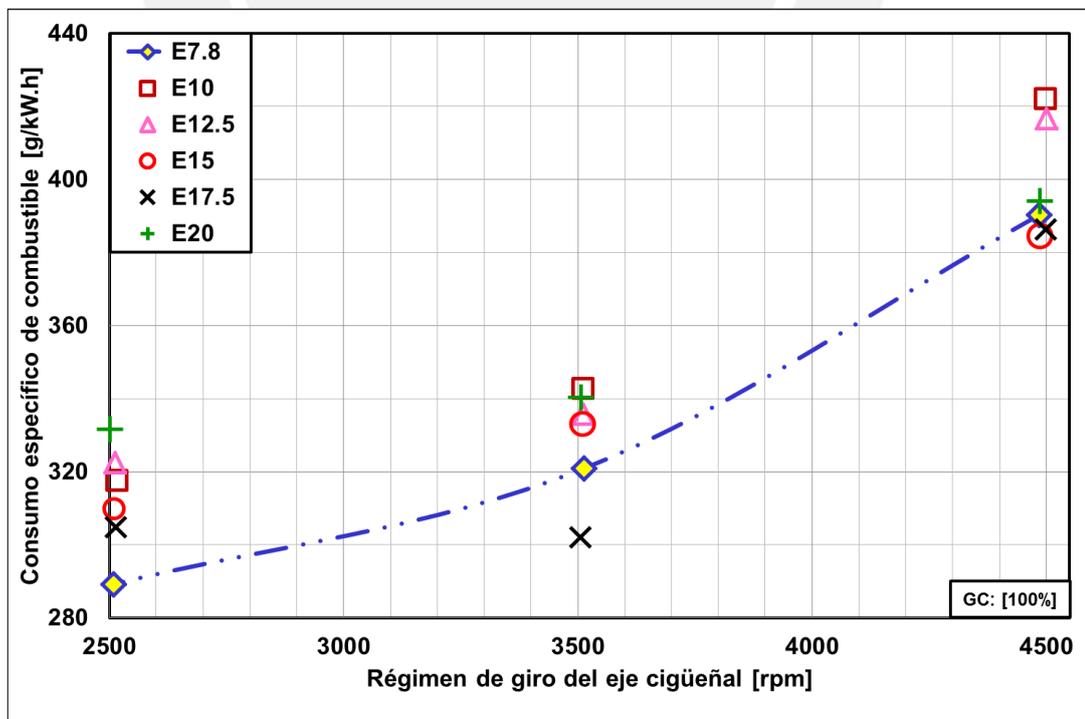


Figura 4.16 – Consumo específico de combustible versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

En la Figura 4.17, se observa una tendencia a la reducción del rendimiento volumétrico conforme se aumenta el régimen de giro del motor, sin importar la cantidad de etanol en la mezcla.

El rendimiento volumétrico del motor, para los puntos a plena carga, ver Figura 4.17, varía proporcionalmente con el flujo másico real del aire admitido e inversamente proporcional al flujo másico de aire admitido a unas condiciones de referencia, estas condiciones son temperatura y presión medidas para la mezcla aire-combustible en el punto justo antes de la entrada a la válvula de admisión. Aquí es importante tener en cuenta que durante los ensayo no se realizó la medición de esas variables en ese punto de referencia, por lo que las condiciones de referencia se analizaron con la presión y temperatura del ambiente. Es decir el rendimiento volumétrico considera las restricciones causadas por todo el sistema de admisión.

Para las velocidades de 2500 rpm y 3500 rpm, ver Figura 4.17, el rendimiento volumétrico es menor para los combustibles E17.5 y E12.5 con respecto al E7.8, mientras que para los combustibles E10, E15 y E20 (puntos de color guinda, rojo y verde respectivamente) el rendimiento volumétrico aumenta, por ejemplo: para 3500 rpm se tienen valores de 61,4 y 64,1 % para los combustibles E7,8 y E20, respectivamente, lo que produce un aumento del rendimiento en 4,4%. Para la velocidad de 4500 rpm, el rendimiento volumétrico disminuye al existir una mayor cantidad de etanol en las mezclas combustibles; como se observó en la Figura 4.17 los valores a este régimen son 51,1 % para la mezcla E7,8 y 48,7 % para la mezcla E12,5, con lo que se tiene una disminución de aproximadamente 4,7 % del valor del rendimiento volumétrico.

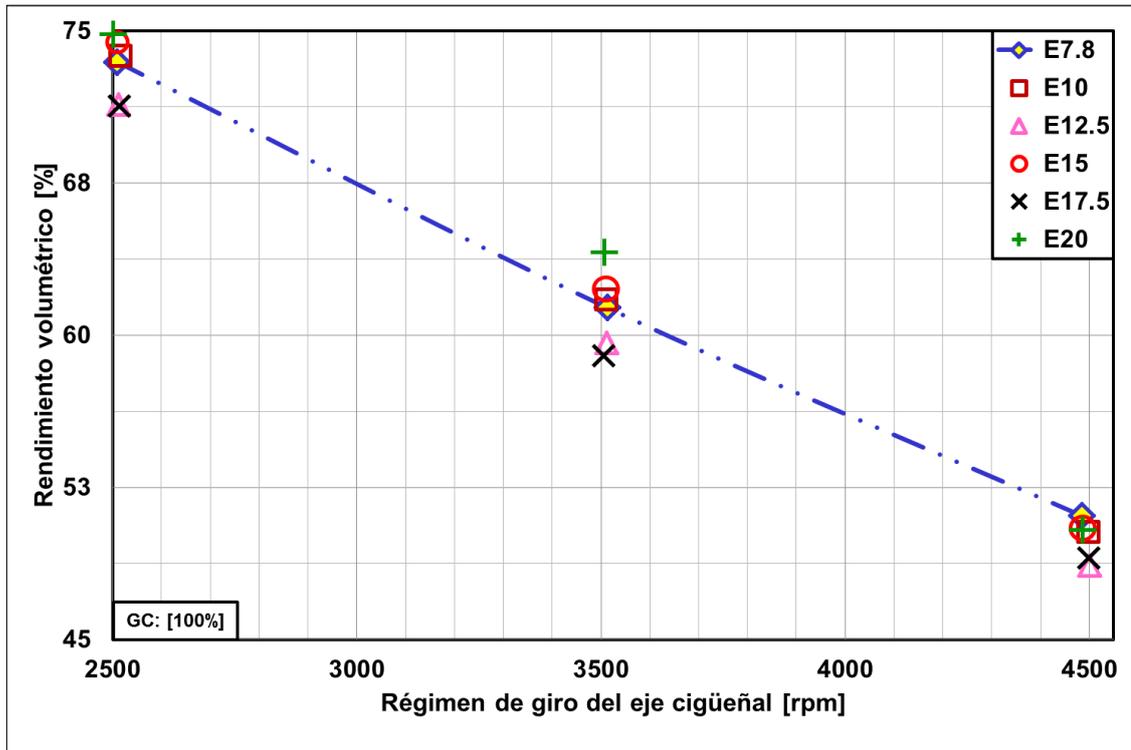


Figura 4.17 – Rendimiento volumétrico versus RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

En las siguientes figuras son presentados los resultados comparativos de las emisiones de CO, CO₂, HC y O₂ en el escape para las diferentes mezclas de combustibles. Debido a las pequeñas variaciones en la potencia (ver Figura 4.2) se decidió por conveniente representar las emisiones en función de los valores medios de la potencia, incluyendo sus respectivas desviaciones estándar.

Como era de esperarse, las cantidades de CO, de modo general, se redujeron considerablemente conforme se aumentó la cantidad de etanol en la mezcla, esto se observa para todos los grados de carga, véase la Figura 4.18, Anexo 4 y Anexo 5; para las velocidades de 2500 rpm, 3500 rpm y 4500 rpm respectivamente; esto es debido a que el etanol contiene más oxígeno en su composición, y por ende, en la combustión existirá mayor oxígeno para quemar combustible, es decir, habrá una combustión más completa con lo que se reduce los niveles de CO, por ejemplo para la potencia [4,87 ± 0,06 kW] a 3500 rpm se registran valores de 3,25 y 1,71 [%] de CO para E7,8 y E20 (barras de color azul y naranja) respectivamente, con lo que se obtiene una reducción de 47,4% en las emisiones de este gas.

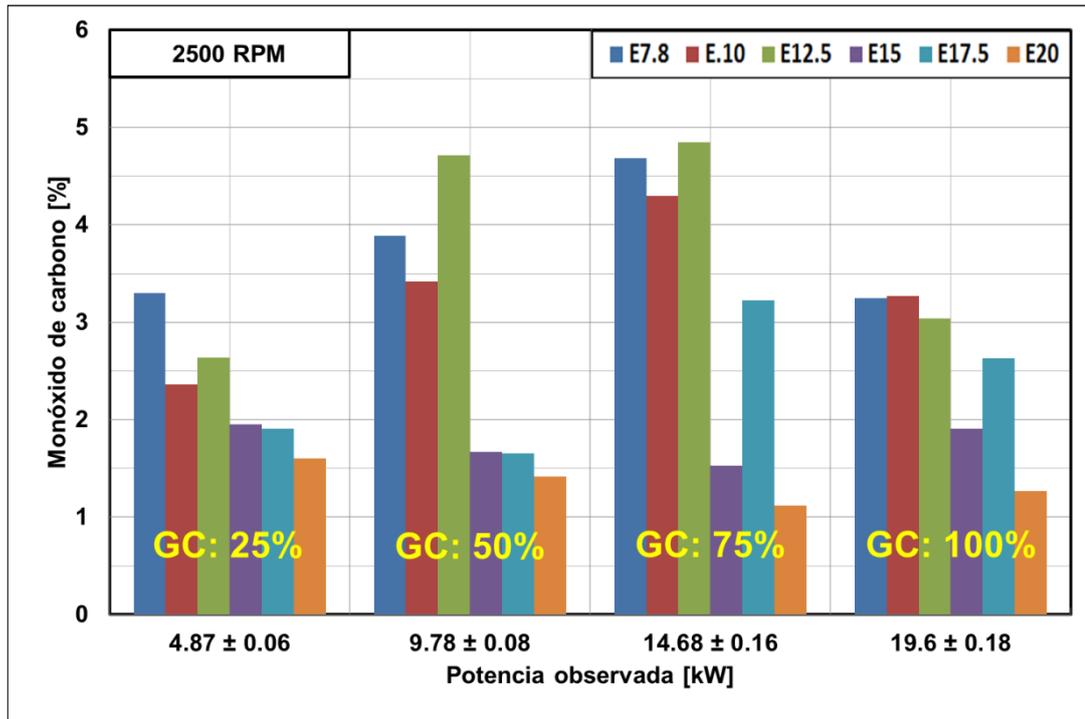


Figura 4.18 – CO versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Por la misma razón, al existir una combustión más completa, las cantidades de emisiones de CO_2 aumentarán acorde se acrecienta la cantidad de etanol en la mezcla, tal como se puede apreciar en la Figura 4.19, Anexo 6 y Anexo 7; mostrando numéricamente esta explicación se tiene que para la potencia de $[14.68 \pm 0.16 \text{ kW}]$ a 2500 rpm los valores de emisiones de CO_2 fueron de 11,6 y 13,95 [%] para las mezclas E7,8 y E20 respectivamente, con lo cual se registra un aumento de 20,3% en las cantidad de emisiones de CO_2 .

Sin embargo, como se puede distinguir en las gráficas antes mencionadas, para los combustibles E10 y E12.5 (barras de color rojo y verde) se observa una anomalía en la tendencia con respecto a los demás combustibles, estas mezclas hacen que aumente las cantidades de CO para algunas potencias de operación del motor, en vez de disminuir, que sería lo esperado para el caso del CO; asimismo, se observa una disminución de la cantidad de CO_2 para algunas potencias del motor, cuando debería aumentar.

Aquí, cabe destacar que en cada punto “potencia x rpm” fue realizado solamente una medición de emisiones para cada mezcla combustible, con la finalidad de prolongar la “vida útil” de los sensores durante la ejecución de las pruebas. En tal sentido, queda claro que serían necesarias un mayor número de mediciones para verificar la repetitividad de los valores medidos y, de ese modo, interpretar correctamente la tendencia de algún resultado fuera del patrón esperado.

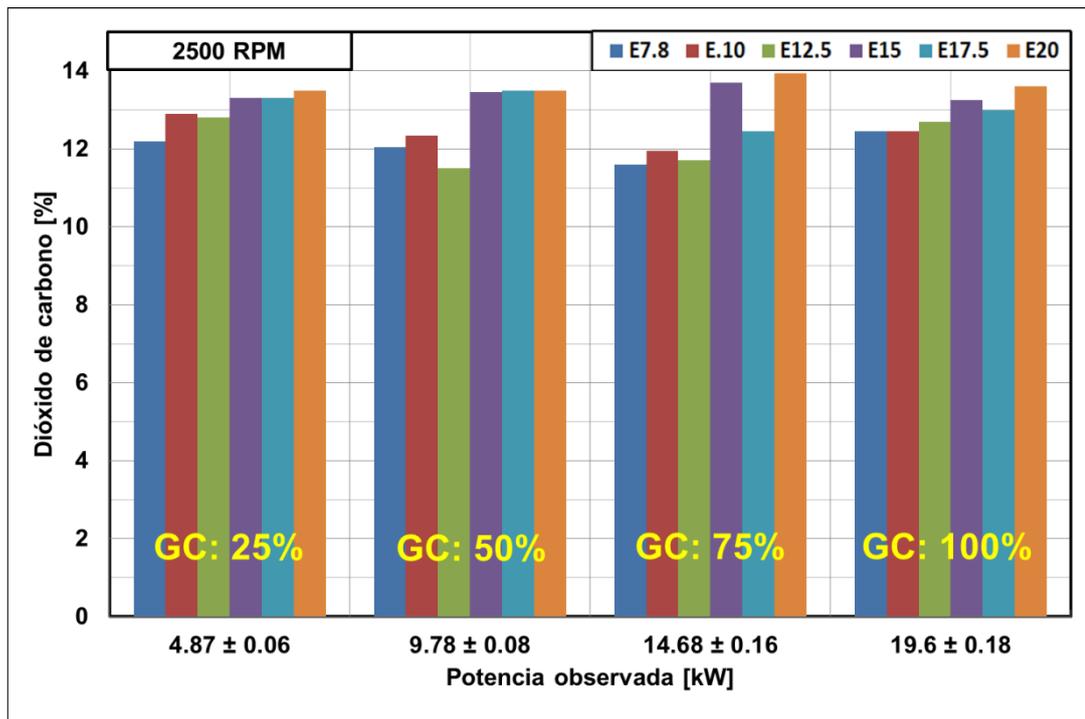


Figura 4.19 – CO₂ versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Por otro lado, se obtuvo una reducción de las emisiones de HC conforme se aumentó la proporción de etanol en la mezcla, cuando el régimen de giro del motor fue de 2500 rpm (ver Figura 4.20) esto debido también a que la combustión con mayor contenido de oxígeno es más completa y por ese motivo se quemará mayor combustible, lo cual se manifiesta con menores emisiones de HC, como muestra se analizan los datos para la potencia de [4,87 ± 0,06 kW] a 2500 rpm con lo que se obtienen valores de 400 y 330 [ppm] para las mezclas de E7,8 y E20 respectivamente, esto resulta en una disminución de 17,5% en la cantidad de HC.

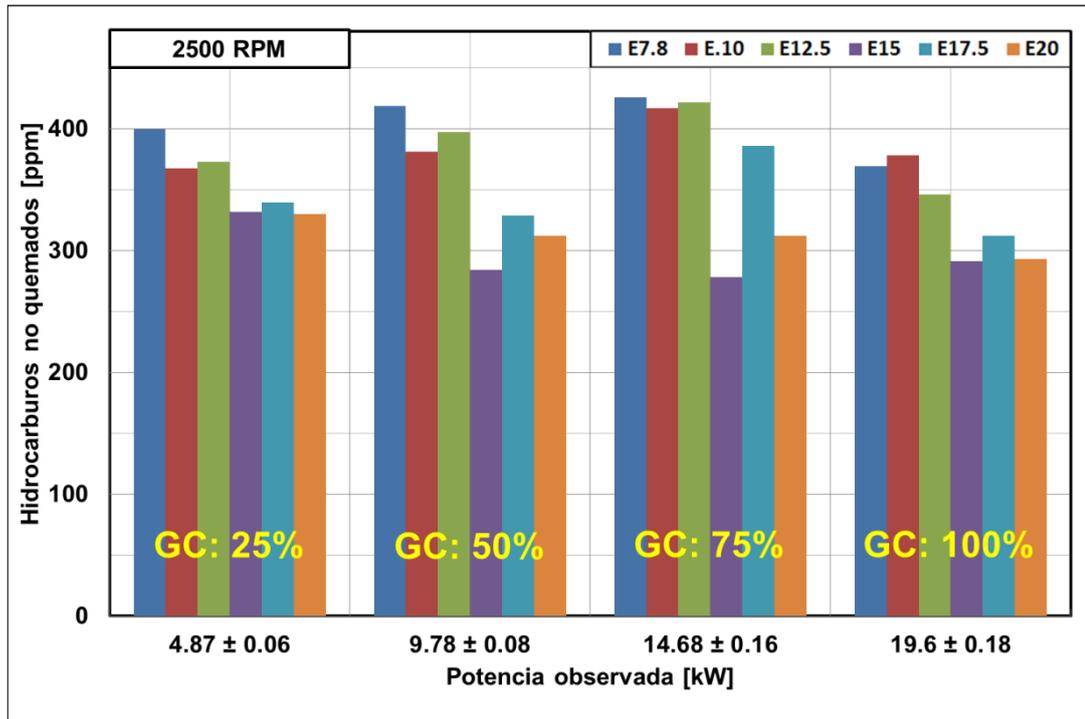


Figura 4.20 – HC versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Se muestra la misma tendencia para 3500 rpm, véase Anexo 8, excepto para los combustibles E10, E12.5 y E20 (barra de color naranja); donde para estos comburentes las cantidades de HC aumentan cuando el motor es trabajado a máxima potencia [$22,1 \pm 0,3$ kW]. Una predisposición similar pero menos ordenada se examina para 4500 rpm (Anexo 9) ya que la tendencia siempre pretende disminuir la cantidad de emisiones de HC; pero para algunos combustibles como E10 y E12.5 se destacan algunos altibajos en la figura mostrada.

En general, para las tres velocidades: 2500 rpm, 3500 rpm y 4500 rpm, véase Figura 4.21, Anexo 10 y Anexo 11 respectivamente, se observa una predisposición a aumentar la cantidad de emisiones de O_2 proporcionalmente al aumento del porcentaje de etanol en el combustible, esto debido principalmente al oxígeno contenido en la composición química del etanol; por ejemplo, al analizar la potencia de [$19,6 \pm 0,18$ kW] a 2500 rpm para las mezclas E7,8 y E20 se registraron valores de 0,33 y 0,63 % de O_2 respectivamente, con lo que se obtiene un aumento en la cantidad de O_2 de 91%. No obstante, las mediciones del oxígeno en el escape para la

mezcla E10 mostraron que en algunas potencias y velocidades existió un menor valor registrado de O₂ en comparación al medido con E7,8.

Finalmente, es importante mencionar que las pequeñas variaciones en la potencia de las respectivas mediciones pueden también haber aportado una pequeña alteración en todos los resultados presentados.

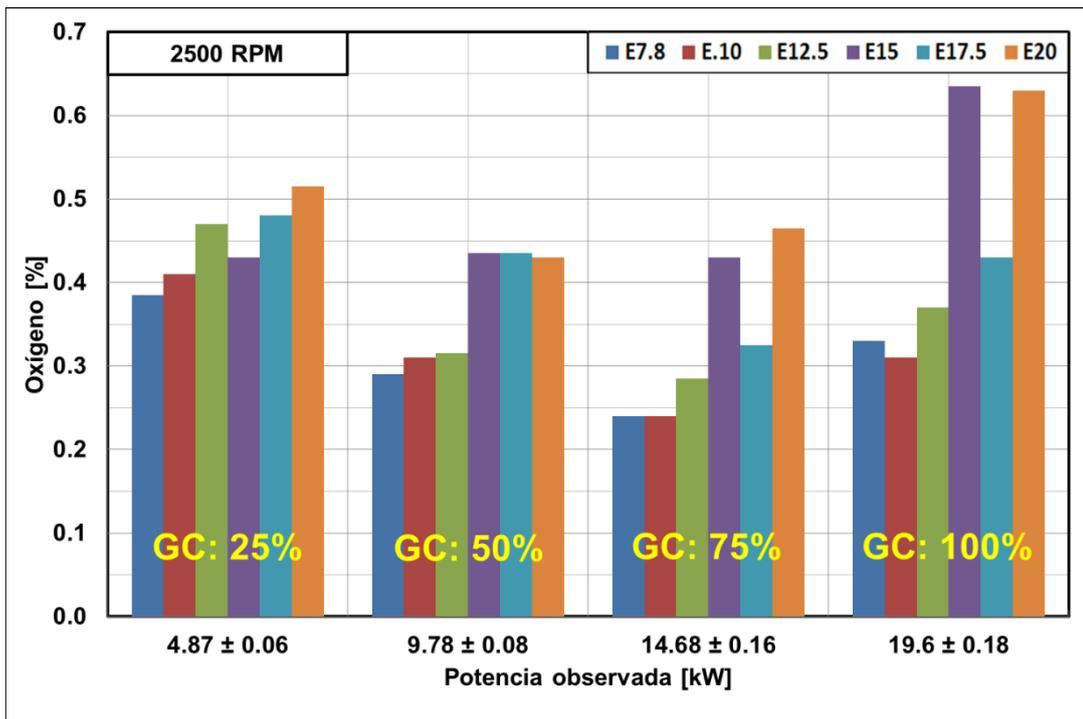


Figura 4.21 – O₂ versus Potencia observada a 2500 RPM para diferentes mezclas gasolina-etanol.

Conclusiones

- Entre las mezclas estudiadas, se encontró que, de modo general, el mejor desempeño se obtuvo al usar el combustible E17,5. Como constatado en Figura 4.12 y Figura 4.13, para las distintas cargas evaluadas en 2500 rpm y 3500 rpm, los mayores rendimientos efectivos correspondieron al uso del E17,5 (por ejemplo: a plena carga (100% del torque) de 3500 rpm, el rendimiento con E17,5 y E7,8 fueron 26% y 29%, respectivamente). En 4500 rpm (Figura 4.14), el uso de E17 también mostró altos rendimientos en altas cargas de operación.
- Para el caso del CEC, como era de esperar, también se concluye que el combustible E17,5 es la mejor opción a plena carga (Figura 4.16) ya que se tienen los menores valores de consumo específico de combustible.
- Las cantidades de emisiones de CO se redujeron notoriamente a medida que se aumentó la cantidad de etanol a la mezcla, lo cual se observó para los cuatro grados de carga, esto se debe principalmente a que el etanol contiene mayor cantidad de moléculas de oxígeno en su composición, y por ende, en la combustión existirá mayor oxígeno para quemar el combustible, esto quiere decir que, habrá una combustión más completa con lo que se redujeron los niveles de CO (por ejemplo: a plena carga (100% del torque) de 3500 rpm, las emisiones de CO con E7,8 y E17,5 fueron 4,3% y 2,1%, respectivamente).
- El mismo efecto de reducción de emisiones se obtuvo para los hidrocarburos quemados y no quemados (HC), ya que al haber combustión más completa, se quema mayor cantidad de hidrocarburos del combustible.
- Por otro lado, la cantidad de emisiones de CO₂ y el O₂ aumentaron considerablemente conforme se aumentó etanol a la mezcla, debido a la composición de oxígeno del etanol carburante, lo cual causa el efecto ya explicado anteriormente.

Recomendaciones

- Futuras investigaciones deberán hacer estudios sobre la durabilidad de los materiales del sistema de inyección, debido a la baja viscosidad y efecto corrosivo del etanol (higroscópico), los cuales pueden agravarse cuando se adiciona una mayor cantidad de etanol a la gasolina.
- El trabajo de tesis fue desarrollado sobre un motor de tecnología antigua, donde el suministro de combustible es a través de carburador. En tal sentido, sería recomendable repetir los ensayos sobre motores de inyección electrónica y que posean sistemas de post-tratamiento de escape.
- Debido a la diversidad de condiciones de altitud de nuestro país, se recomienda realizar estudios sobre el uso de mezclas de gasolina-etanol considerando la variación de las condiciones atmosféricas (presión, temperatura y humedad) para evaluar sus efectos sobre el desempeño y emisiones del motor de encendido por chispa.

Bibliografía

[1] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

2012 Balance Nacional de Energía 2012". Ministerio de Energía y Minas.
Consulta: 22 de abril de 2014.
http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=469

[2] LA REPÚBLICA

2013 <http://www.larepublica.pe/01-05-2013/peru-gasto-mas-de-s-50-mil-mlls-en-importar-petroleo>.

[3] FUNDACIÓN CONSEJO PARA EL PROYECTO ARGENTINO

2005 Comentario del 31 de Diciembre "Ferrocarril Con Gas Natural Comprimido". Consejo para el Proyecto Argentino. Consulta: 4 de Junio de 2014.
http://www.gabinete.org.ar/Enero_2006/trengnc.htm

[4] BRASIL: UN GRAN MERCADO EN EXPANSIÓN SOSTENIDA

https://www.camarabrasilespana.com/assets/files/informes_sectoriales/Brasil-Universidad-Nebrija.pdf

[5] AMÉRICA ECONÓMICA

2013 Gobierno de Brasil anuncia elevación de mezcla etanol en gasolina.
<http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/gobierno-de-brasil-anuncia-elevacion-de-mezcla-de-etanol-en-gasolina>

[6] GUTIERREZ EDGAR

2003 Guía de clases de tribología: Procesos de refinación del petróleo, lubricantes.

[7] MC GRAWHILL

2001 Tecnología energética e impacto ambiental.

[8] RIVAS MEZA VÍCTOR ALFONSO

2006 Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial.

[9] CRUZ HUMBERTO

Elaboración de gasolina en Pemex Refinación.

[10] CRUZ HUMBERTO

Elaboración de gasolina en Pemex Refinación.

[11] RIVAS MEZA VÍCTOR ALFONSO

2006 Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial.

[12] VIDEOCONFERENCIA

2014 Biocombustibles, nuevos retos y desafíos Perú.
Oportunidades de mejora en el sector bio-energético.
http://www.livestream.com/sierraexportadora/video?clipId=pla_b3ddbc7627ff-467e-ac8c18a7857ab768&utm_source=lslibrary&utm_medium=ui-thumb

[13] VIDEOCONFERENCIA

2014 Biocombustibles, nuevos retos y desafíos Perú.
Oportunidades de mejora en el sector bio-energético.
http://www.livestream.com/sierraexportadora/video?clipId=pla_b3ddbc7627ff467e-ac8c-18a7857ab768&utm_source=lslibrary&utm_medium=ui-thumb

[14] ABRIL ALEJANDRO

2012 Etanol a partir de biomasa lignocelulósica.

[15] MINCETUR

2013 Perfil del mercado y competitividad exportadora de etanol.
<http://www.mincetur.gob.pe/comercio/otros/penx/pdfs/Etanol.pdf>

[16] ABRIL ALEJANDRO

2012 Etanol a partir de biomasa lignocelulósica.

[17] CAVIERES KORN PATRICIO

Biocombustibles de primera generación.

<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959&tip=7>

[18] CAVIERES KORN PATRICIO

Biocombustibles de primera generación.

<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959&tip=7>

[19] GENTINA JUAN CARLOS

2013 Bioetanol de segunda generación.

<http://aiquruguay.org/congreso/download/GENTINA2.pdf>

[20] GENTINA JUAN CARLOS

2013 Bioetanol de segunda generación.

<http://aiquruguay.org/congreso/download/GENTINA2.pdf>

[21] HOSPINAL MUNIVE GIOVANI

Energías renovables.

<http://es.slideshare.net/fmcslides/giovani-hospinal-el-presente-y-futuro-del-etanol-en-el-norte-del-pas>

[22] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

2014 Estudio de análisis de ciclo de vida de biocombustibles en Perú.

[23] MINCETUR

2013 Perfil del mercado y competitividad exportadora de etanol.

<http://www.mincetur.gob.pe/comercio/otros/penx/pdfs/Etanol.pdf>

[24] CUISANO JULIO

2014 Guía de clases de motores: Combustión.

[25] CUISANO JULIO

2014 Guía de clases de motores: Combustión.

[26] GARCÍA MARTÍNEZ ANTONIO

2009 Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores Diesel.

[27] EL MUNDO DEL AUTOMÓVIL

<http://elmundodelautomovil.wikispaces.com/Combustibles>

[28] CASTILLO CALDERÓN JAIRO

2013 Diseño e implementación de un modelo matemático para el cálculo del ciclo Otto del motor ARMFIERLD VOLKSWAGEN CM11-306.

[29] CASTILLO CALDERÓN JAIRO

2013 Diseño e implementación de un modelo matemático para el cálculo del ciclo Otto del motor ARMFIERLD VOLKSWAGEN CM11-306.

[30] G. BROUSTAIL, F. HALTER

2012 Comparison of regulated and non-regulated pollutants with iso - octane/ butanol and iso-octane/ethanol blends in a port-fuel injection Spark-Ignition engine.

[31] PAIVI AAKKO-SAKSA

2011 Biogasoline Options – Possibilities for Achieving High Bio-share and Compatibility with Conventional Cars.

[32] ELIEZER AHMED

2012 Evaluation of the spark-ignition engine fueled with ethanol-gasoline blends.

[33] CONTRERAS CASAS, C. H.

2010 Evaluación del desempeño de un motor de combustión interna alimentado con etanol y mezclas de etanol-gasolina.

[34] MARTÍNEZ MARTÍNEZ SIMÓN

2008 Estudio de los efectos reductivos de emisiones gaseosas como: HC, CO, CO₂, O₂ y NO_x durante la combustión gasolina-etanol en un motor de combustión interna

[35] WEI-DONG HSIEH

2002 Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels.

[36] PIAMBA TULCÁN OSCAR

2007 Desempeño de motor utilizando como combustible mezcla de etanol anhidro y gasolina en relación de 10% en volumen E10.

[37] YÜKSEL FIKRET

2004 The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine.

[38] ALEONTE MIHAI

2011 Influences of alcohol blends on combustion and emissions in a two-stroke SI engine.