

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL USO DE MEZCLAS DE
GASOLINA-BUTANOL EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR
CHISPA**

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

JOSÉ ALBERTO MOSCOSO RIVADENEIRA

ASESOR: Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza

Lima, enero del 2016

RESUMEN

En la presente tesis, se realizó un análisis experimental del rendimiento y las emisiones gaseosas de un motor carburado de encendido por chispa, modelo Nissan GA15 de 4 cilindros, el cual funcionó con diferentes mezclas gasolina-butanol y está instalado en el Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cabe resaltar que para realizar la preparación de las mezclas gasolina-butanol, se tuvo que destilar el gasohol para obtener gasolina pura, ya que no se pudo conseguir de ningún punto de venta debido a la legislación peruana. Por este motivo, se elaboró todo un protocolo de destilación.

Para realizar los ensayos, el motor fue debidamente instrumentado mediante una serie de sensores tanto de presión como de temperatura y esto permitió el registro de los datos necesarios para la investigación. Los combustibles en cuestión fueron gasolina pura, gasohol comercial (E7,8) y 6 mezclas gasolina-butanol (B7,8, B10, B12,5, B15, B17,5 y B20). Todas estas mezclas fueron ensayadas a 3 velocidades y 4 porcentajes de torque. Con los resultados obtenidos, se pudo constatar que el consumo de combustible aumento ligeramente cuando se adiciona el butanol a la gasolina, sin embargo para la mezcla B15 hubo una disminución promedio de -1%.

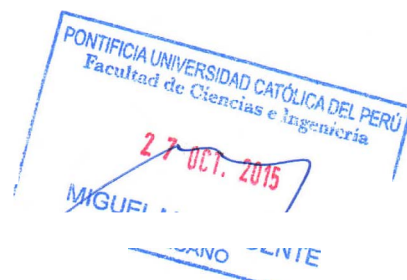
Acerca de los parámetros calculados, se puede decir que el rendimiento efectivo del motor aumenta conforme se incrementa la carga y el régimen de giro, esto sin importar cuál sea el combustible utilizado; pero cabe resaltar que el B20, para alta y baja velocidad en la mayoría de puntos de carga fue el que generó mayor rendimiento efectivo con un aumento promedio del +5% respecto a la gasolina.

Con respecto a la generación de las emisiones gaseosas, se observó una gran disminución en las concentraciones de CO al aumentar el porcentaje del contenido de butanol en la mezcla con disminuciones del -56% para la mezcla B20 con respecto a la gasolina. En cambio, las emisiones de HC incrementaron en un promedio de +3% para la mezcla B7,8 y esto aumentó conforme se incrementaba el butanol y de igual manera ocurrió con las emisiones CO₂.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL USO DE MEZCLAS DE GASOLINA-BUTANOL EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA
ÁREA	Energía # 386
PROPUESTO POR	Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza
ASESOR	Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza
TESISTA	José Alberto Moscoso Rivadeneira
CÓDIGO	2008.4387
FECHA	16 de octubre de 2015


DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El Perú, se caracteriza por tener un saldo deficitario en la balanza comercial de hidrocarburos, ya sea por la baja producción de petróleo o por limitaciones tecnológicas en las refinerías, las cuales propician la importación de crudos livianos y productos de alto valor comercial como las gasolinas de alto octanaje y de bajo contenido de azufre.

En la actualidad, existen componentes que se adicionan a la gasolina para lograr disminuir el uso de combustibles fósiles, tal es el caso del uso del etanol. No obstante, este biocombustible posee algunos inconvenientes al mezclarse con la gasolina, debido, en parte, al menor contenido energético y su característica higroscópica. Por otra parte, el butanol se destaca por tener una densidad energética de un 50% mayor al etanol, además, genera una menor corrosión en las tuberías de transporte, debido a su menor efecto higroscópico. Sin embargo, los efectos sobre el comportamiento y desempeño en motores todavía no ha sido del todo estudiado y recién se viene desarrollando la producción industrial, bajo la misma ruta tecnológica que el bioetanol.

En la presente tesis, se pretende abordar una investigación sobre el uso de diferentes mezclas gasolina-butanol en motores de encendido por chispa, principalmente, para aplicaciones vehiculares, mediante el análisis de su desempeño y las emisiones gaseosas.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL USO DE MEZCLAS DE
GASOLINA-BUTANOL EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR
CHISPA

Introducción

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

Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

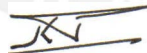
Anexos

Máximo: 100 páginas


Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza

Asesor







DEDICATORIA

Dedicada a mis padres, José Moscoso Echeandia y Roxana Rivadeneira Castro. A mi hermana, Pamela Moscoso Rivadeneira.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por brindarme comprensión, motivación y apoyo incondicional en todo el tiempo que tomo culminar mi tesis.

A mi asesor y compañeros por brindarme su apoyo y su tiempo durante el periodo de realización de la presente tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
APROBACIÓN DEL TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
INTRODUCCIÓN	1
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO 1 : FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
1.1. Gasolina	7
1.1.1. Definición	7
1.1.2. Materia prima.....	7
1.1.3. Producción.....	8
1.2. Butanol	10
1.2.1. Definición	10
1.2.2. Materia prima.....	11
1.2.3. Producción.....	11
1.3. Propiedades de la gasolina y el butanol.	14
1.4. Motor de combustión interna de encendido por chispa	17
1.4.1. Definición	17
CAPÍTULO 2 : ESTADO DEL ARTE	20
2.1 Investigación 1	20
2.2 Investigación 2	22
2.3 Investigación 3	24
2.4 Investigación 4	25
2.5 Investigación 5	26

2.6	Investigación 6.....	26
2.7	Investigación 7.....	28
2.8	Investigación 8.....	29
CAPÍTULO 3 : EXPERIMENTACIÓN.....		31
3.1.	Obtención del butanol y de la gasolina pura.....	31
3.2.	Protocolo de destilación del Gasohol 90 a escala real.	32
3.3.	Preparación de la mezclas butanol y gasolina.....	37
3.4.	Metodología de las máquinas, equipos e instrumentos a utilizar	40
3.5.	Protocolo de ensayo.....	48
3.5.1.	Registro de los parámetros medidos en el banco de pruebas del motor.	48
3.6.	Verificación del banco de pruebas.	49
3.6.1.	Procedimiento de ensayo a plena carga y carga parcial.	51
3.7.	Expresiones para el cálculo.....	53
3.7.1.	Fórmulas para el cálculo de parámetros	53
3.7.2.	Fórmulas estadísticas para la correcta presentación de los parámetros y el cálculo de los errores de medición (incertidumbres).	62
CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		66
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....		90
CONCLUSIONES.....		91
BIBLIOGRAFÍA.....		94
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. 1 – Tasa crecimiento para sectores seleccionados, 2013 - 2014 [1].	1
Tabla I. 2 – Producción de hidrocarburos líquidos (MBPD) [2].	2
Tabla 1. 1 – Principales propiedades físico-químicas de los alcoholes y de la gasolina [21].	15
Tabla 2. 1 – Consumo específico de combustible relativo y cambio en el PCI en función de la adición de butanol a 2000 RPM y 367kPa de presión media indicada [28].	22
Tabla 2. 2 – Especificaciones y parámetros del motor [29].	23
Tabla 2. 3 – Propiedades de los isómeros de butanol y del etanol [34].	29
Tabla 3. 1 – Composición de las mezclas gasolina-butanol utilizadas.	38
Tabla 3. 2 – Características del motor de encendido por chispa.	41
Tabla 3. 3 – Características del analizador de gases.	47
Tabla 3. 4 – Datos medidos en los ensayos.	48
Tabla 3. 5 – Parámetros de la medición gravimétrica.	51
Tabla 3. 6 – Parámetros grabados mediante el registrador de datos.	52
Tabla 3. 7 – Parámetros ambientales	52
Tabla 3. 8 – Parámetros relacionados a las emisiones	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. 1 – Proceso de reformación catalítica [15].	9
Figura 1. 2 – Proceso de craqueo catálico fluidizado [15].	9
Figura 1. 3 – Estructura molecular y principales aplicaciones de los isómeros de butanol [18].	10
Figura 1. 4 – Proceso Petroquímico para la producción de n-butanol [20].	12
Figura 1. 5 – Proceso de fermentación del butanol empleando la bacteria Clostridium Acetobutylicum [18].	13
Figura 1. 6 – Nomenclatura para motores alternativos cilindro-pistón [23].	17
Figura 1. 7 – Fases de un motor de 4 tiempos [27].	18
Figura 1. 8 – Motor Ideal de Explosión de 4 tiempos [13].	19
Figura 2. 1 – Emisiones específicas de NO _x , HC y CO versus dosado relativo para diferentes mezclas de gasolina y butanol [28].	21
Figura 2. 2 – Emisiones de HC, CO ₂ y CO versus velocidades del motor [29].	24
Figura 2. 3 – Variación de la potencia efectiva en función del régimen de velocidad y combustible utilizado [32].	27
Figura 2. 4 – Variación del rendimiento efectivo en función del régimen de velocidad y combustible utilizado [32].	28
Figura 3. 1 – Envases de transporte.	32
Figura 3. 2 – Instrumentos usados para la destilación del Gasohol 90.	33
Figura 3. 3 – Tanque para destilación.	34
Figura 3. 4 – Secuencia de destilación.	35
Figura 3. 5 – Filtrado de la gasolina pura.	36
Figura 3. 6 – Instrumentos para preparación de las mezclas gasolina – butanol.	37
Figura 3. 7 – Recipiente de 5 galones para preparación de las mezclas.	38
Figura 3. 8 – Refrigerador para almacenamiento de las mezclas.	39
Figura 3. 9 – Galonera que contiene la mezcla B10 montada en la balanza antes de comenzar el ensayo.	39
Figura 3. 10 – Banco de pruebas experimental utilizado para los ensayos.	40
Figura 3. 11 – Motor Nissan GA15 instalado en el Laboratorio de Energía	42
Figura 3. 12 – Conjunto de equipos electrónicos de medición.	43
Figura 3. 13 – Equipos de medición para el consumo de combustible.	44
Figura 3. 14 – Conjunto de equipos de medición del aire húmedo y seco admitido al motor.	45
Figura 3. 15 – Sistema de medición de las emisiones.	46
Figura 3. 16 – Sistema de medición para fijar el ángulo de encendido.	47

Figura 3. 17 – Control de la bomba de agua del sistema de refrigeración del dynamómetro.....	49
Figura 3. 18 – Tablero de control del motor.	50
Figura 4. 1 – Potencia Efectiva Corregida versus rpm a 100% de Carga para diferentes mezclas.....	67
Figura 4. 2 – Consumo Másico de Combustible versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	68
Figura 4. 3 – Consumo Másico de Combustible versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	69
Figura 4. 4 – Consumo Específico de Combustible Corregido versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	70
Figura 4. 5 – Consumo Específico de Combustible Corregido versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.....	71
Figura 4. 6 – Rendimiento Efectivo versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.	72
Figura 4. 7 – Rendimiento Efectivo versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.	73
Figura 4. 8 – Consumo Másico de Aire Seco versus PME a 4420 RPM con diferentes mezclas.....	74
Figura 4. 9 – Consumo Másico de Aire Seco versus PME a 2460 rpm con diferentes	75
Figura 4. 10 – Rendimiento Volumétrico versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	76
Figura 4. 11 – Rendimiento Volumétrico versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.....	78
Figura 4. 12 – Temperatura de los Gases de Escape versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	79
Figura 4. 13 – Temperatura de los Gases de Escape versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.....	80
Figura 4. 14 – Factor Lambda Medido versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas. .	81
Figura 4. 15 – Factor Lambda Medido versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas ..	82
Figura 4. 16 – Hidrocarburos no Quemados versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	83
Figura 4. 17 – Hidrocarburos no Quemados versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.....	85
Figura 4. 18 – Monóxido de Carbono versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas....	86
Figura 4. 19 – Monóxido de Carbono versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas....	87
Figura 4. 20 – Dióxido de Carbono versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.....	88
Figura 4. 21 – Dióxido de Carbono versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{enc}	Ángulo de encendido
ABE	Fermentación acetona-butanol-etanol
BCRP	Banco de la Reserva del Perú
B0	Combustible contiene 0% de butanol y 100% de gasolina en volumen
B5	Combustible contiene 5% de butanol y 95% de gasolina en volumen
B7,8	Combustible contiene 7,8% de butanol y 92,2% de gasolina en volumen
B10	Combustible contiene 10% de butanol I y 90% de gasolina en volumen
B12,5	Combustible contiene 12,5% de butanol y 87,5% de gasolina en volumen
B15	Combustible contiene 15% de butanol y 85% de gasolina en volumen
B17,5	Combustible contiene 17,5% de butanol y 82,5% de gasolina en volumen
B20	Combustible contiene 20% de butanol y 80% de gasolina en volumen
C	Carbono
cec	Consumo específico de combustible [g/kW.h]
Co	Cobalto
Cu	Cobre
C-C	Doble enlace de carbono
CO	Monóxido de carbono [%]
CO ₂	Dióxido de carbono [%]
CH ₂ O	Formaldehído
CH ₄	Metano
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₄ H ₉ OH	Butanol
C ₄ - C ₁₂	Gasolina
C ₆ H ₆	Benceno
C ₇ H ₁₆	Heptano
C ₈ H ₁₈	Octano
C ₉ H ₂₀	Nonano
C ₁₀ H ₂₂	Decano
C _x H _y	Fórmula química para los hidrocarburos
C _d	Coefficiente de descarga en la placa orificio [0.6]
div _{me}	División menor de la escala del instrumento [misma unidad]

D_p	Diámetro de la placa orificio [m]
EGR	Recirculación de gases de escape
E7,8	Combustible contiene 7,8% de etanol y 92,2% de gasolina en volumen
FFC	Craqueo catalítico fluidizado
GLP	Gas licuado de petróleo
GNV	Gas natural vehicular
H_2	Hidrógeno
HOBS	Mezcla de alto octanaje
HC	Hidrocarburos no quemados [ppm]
iB	Isobutanol
iB50	Combustible contiene 50% de isobutanol y 50% de gasolina en volumen
iB100	Combustible contiene 100% de isobutanol y 0% de gasolina en volumen
k	Factor de corrección para MECH
MBPD	Miles de barriles por día
MECH	Motor de encendido por chispa
MON	Número de octano del motor
MFB	Fracción de masa quemada
MSDS	Hoja de seguridad del material
m_{comb}	Masa de combustible (kg)
m_i	Masa inicial de combustible [kg]
m_f	Masa final de combustible [kg]
$\dot{m}_{aire.ref}$	Consumo másico de aire a unas condiciones de referencia [kg/h]
$\dot{m}_{a.h}$	Consumo másico de aire húmedo [kg/h]
$\dot{m}_{a.s}$	Consumo másico de aire seco [kg/h]
\dot{m}_{comb}	Consumo másico de combustible [kg/h]
$\dot{m}_{butanol}$	Consumo másico de butanol [kg/h]
$\dot{m}_{gasolina}$	Consumo másico de gasolina [kg/h]
N	Número de muestras o de variables involucradas
n	Régimen de giro [rpm]
nB	n-butanol
nB3	Combustible contiene 3% de n-butanol y 97% de gasolina en volumen
nB7	Combustible contiene 7% de n-butanol y 93% de gasolina en volumen
nB10	Combustible contiene 10% de n-butanol y 90% de gasolina en volumen
NO_x	Óxidos de nitrógeno

O_2	Oxígeno [%]
ON	Número de octano
p_{me}	Presión media efectiva [bar]
PBI	Producto bruto interno
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
P_{atm}	Presión atmosférica [kPa]
$P_{a.s}$	Presión de aire seco [kPa]
P_{adm}	Presión manométrica en el múltiple de admisión [kPa]
$P_{e.co}$	Potencia efectiva corregida [kW]
$P_{e.obs}$	Potencia efectiva observada [kW]
P_s	Presión de saturación del vapor del aire [kPa]
P_v	Presión parcial del vapor de aire [kPa]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
$PCI_{gasolina}$	Poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg]
$PCI_{butanol}$	Poder calorífico inferior del butanol [kJ/kg]
R	Constante del aire ambiente [0.287 kJ/kg.K]
Rh	Rodio
RON	Número de octano de investigación
RPM	Revoluciones por minuto
Ru	Rutenio
$R_{a.s./comb}$	Relación de flujo másico aire seco entre combustible
P_v	Presión parcial del vapor de aire [kPa]
t	Tiempo de consumo másico de combustible [s]
T°_{amb}	Temperatura del aire ambiente [°C]
T°_{adm}	Temperatura de admisión [°C]
T_{co}	Torque neto corregido [N.m]
$T^{\circ}_{e.ref}$	Temperatura de entrada del refrigerante [°C]
T°_g	Temperatura de los gases de escape [°C]
T_{obs}	Torque neto observado [N.m]
$T^{\circ}_{s.ref}$	Temperatura de salida del refrigerante [°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]

$\dot{V}_{butanol}$	Consumo volumétrico de butanol [m ³ /h]
\dot{V}_{comb}	Consumo volumétrico de combustible [m ³ /h]
$\dot{V}_{gasolina}$	Consumo volumétrico de gasolina [m ³ /h]
W_e	Trabajo efectivo [kJ]
X	Humedad específica
\bar{Y}	Media ponderada de las incertidumbres

Suscritos a letras griegas

ϕ	Humedad relativa
σ_A	Incertidumbre aleatoria [misma unidad que la del dato asociado]
σ_L	Incertidumbre de presión [misma unidad que la del dato asociado]
σ_{N-1}	Desviación estándar de una muestra [misma unidad que la del dato asociado]
σ_T	Incertidumbre estándar [misma unidad que la del dato asociado]
σ_x	Incertidumbre estándar [misma unidad que la del dato asociado]
σ_y	Incertidumbre general [misma unidad que la del dato asociado]
$\sigma_{\bar{y}}$	Incertidumbre total [misma unidad que la del dato asociado]
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]
$\rho_{aire.ref}$	Densidad del aire referencia [kg/m ³]
$\rho_{butanol}$	Densidad del butanol [kg/m ³]
$\rho_{gasolina}$	Densidad de la gasolina [kg/m ³]
λ	Factor lambda
ΔP_{aire}	Presión diferencial del aire en la placa orificio [kPa]

INTRODUCCIÓN

El Perú, con un crecimiento acumulado del 195% de su PBI entre 2003 y 2013 (Banco Mundial, 2014), está posicionado entre uno de los países con mayor crecimiento en los últimos años. El PBI peruano se compone en un 21% de los sectores primarios, siendo el sector de minería e hidrocarburos el de mayor aporte, con un 12%. Además, según datos del Banco Central de Reserva del Perú [1], ver **Tabla I. 1**, las tasas de crecimiento para los sectores más dinámicos de la economía en el último año muestran al de hidrocarburos en tercer lugar con 7.2% en el 2013 y 3% en el primer trimestre del 2014.

Tabla I. 1 – Tasa crecimiento para sectores seleccionados, 2013 - 2014 [1].

	2013	I Trim. 2014
Manufacturas (recursos primarios)	9,8%	8,6%
Construcción	8,9%	5,3%
Hidrocarburos	7,2%	3,0%
Comercio	5,9%	5,2%
Minería metálica	4,2%	5,2%
Global	5,8%	4,8%

A pesar de estos logros, el Perú aún tiene varios de desafíos que superar, uno de ellos se encuentra justamente en el ámbito de los hidrocarburos, ya que también es sabido que, en los últimos años, este sector del país ha tenido una serie de dificultades. Si bien la producción total de hidrocarburos ha aumentado, debido a la producción de gas natural y condensados (luego del inicio del Proyecto Camisea en el 2004), la producción de petróleo crudo ha disminuido en los últimos 10 años, comenzando desde el 2002, ver **Tabla I. 2**. Además, la demanda interna del crudo de petróleo ha crecido, lo que ha causado que el Perú haya optado por la importación de derivados de petróleo, que se estima genera gastos de hasta cinco mil millones de dólares. Este déficit de producción de petróleo se debe a dos factores, primero a la incesante reducción de la producción nacional, ya que no sólo no se han desarrollado nuevos campos de producción sino, adicionalmente, al excesivo tiempo que se requiere para gestionar y obtener autorizaciones para explorar, explotar y luego producir [2]; y en segundo lugar, a la

baja calidad de nuestras reservas, debido a que posemos una tecnología obsoleta de refinación lo que obliga a importar crudo y combustibles derivados [3].

Tabla I. 2 – Producción de hidrocarburos líquidos (MBPD¹) [2].

Hidrocarburo Líquido	Miles de Barriles por día										
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Petróleo Crudo	92.6	87.1	80.0	75.3	77.5	77.3	76.7	68.8	72.6	68.8	66.7
Líquidos GN	4.1	4.1	14.2	35.9	38.1	36.7	45.8	74.2	84.4	83.0	86.2
TOTAL	96.7	91.2	94.2	111.2	115.6	114.0	122.5	145.2	157.0	151.8	152.9

Fuente: MINEM.

En el 2013, en el país, se ha tenido una demanda de petróleo y productos derivados de 200 mil barriles diarios para abastecer la creciente demanda interna, pero solo contamos con una producción total de 65 mil barriles diarios de petróleo, es decir, importamos aproximadamente 135 mil barriles. Por este motivo, somos un país deficitario, es decir, producimos menos de lo que demandamos, sobretodo, en diesel y en gasolinas de alto octanaje [4].

A pesar de que en el 2014, la curva de producción de petróleo del Perú empezó a elevarse (de los 62 mil barriles por día que se producía a comienzos del año) y continuó en aumento en un promedio diario de 70 mil barriles para diciembre, esto no basta, ya que se sigue presentando el déficit mencionado anteriormente [5].

Por otro lado, los combustibles alternativos en el Perú son una vía de escape para el desarrollo energético. Por esto, se han iniciado múltiples prácticas gubernamentales que sirvan como motor para el uso de nuevas formas energéticas como el gas natural, biodiesel² y etanol a partir de un marco legal determinado, ya que estos contribuirán a mejorar el sistema energético debido a la disminución de la demanda del petróleo y la reducción de contaminantes, debido a su alta biodegradabilidad y baja toxicidad. El

¹ MPBD: Miles de barriles por día.

² Biodiesel: puede definirse como un carburante elaborado a partir de aceites vegetales o grasas animales, apto como sustituyente parcial o total del gasóleo o gasoil en motores diesel, sin que resulten necesarias conversiones, ajustes o regulaciones especiales del motor.

objetivo es hallar una posibilidad distinta a los combustibles fósiles y reducir la dependencia, ya que son altamente contaminantes. De esta manera, beneficiar a la población y convertir al país en referente energético alternativo al igual que Brasil. Además, en el caso del biodiesel y etanol, estos biocombustibles tienen su origen en la agricultura, así se podría integrar este rubro con las demandas energéticas y disminuir las importaciones de petróleo. [6]

La Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles crea un mercado interno obligatorio que permite desde enero del 2009, la comercialización del diesel B2 (mezcla que contiene 98% de Diesel N° 2 y 2% de biodiesel) debía hacerse obligatoria en todo el país, en reemplazo del diesel N° 2, y, a partir del 2011, el contenido de biodiesel en esta mezcla alcanzó el 5%. Asimismo, desde de enero del 2010, el gasohol (mezcla que contiene 92,2% gasolina y 7,8% de alcohol carburante o etanol) ha reemplazado a las gasolinas y su uso ya es obligatorio en casi todo el país [7].

Por otra parte, existe el butanol que tiene una gran posibilidad de convertirse en el combustible del futuro. Así lo considera, la petrolera BP, quien se ha unido con la química DuPont para producir y comercializar a gran escala este alcohol que es muy similar al etanol. Muchos expertos en la materia lo llaman "biobutanol", ya que posee un origen vegetal, sin olvidarse también que puede producirse a partir de combustibles fósiles, con las mismas propiedades químicas. A pesar de tener mejores propiedades que el etanol, en la actualidad, tiene un precio más elevado en comparación con la gasolina normal. En la actualidad, en el Perú, aún no se utiliza como componente de ningún combustible. [8]

Cabe resaltar que en los últimos años, ha habido un creciente aumento en el número de investigaciones y publicaciones internacionales, y que vienen aumentando, sobre el uso de butanol en motores de combustión interna de encendido por chispa como en los motores de compresión para uso vehicular.

En el país, el n-butanol es importado y vendido por empresas farmacéuticas y laboratorios químicos. Asimismo, es usado principalmente por laboratorios de investigación, industrias de pintura, plásticos, entre otras.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A nivel mundial, en el último siglo, el consumo de petróleo y sus derivados han aumentado, principalmente, por el crecimiento de la población y la industrialización de muchos países. Esto ha ocasionado una crisis ecológica inminente, ya observable como el caso del calentamiento global, debido fundamentalmente al alto consumo de los derivados del petróleo como fuente de energía. Esto nos obliga, como seres humanos protectores del planeta, a un replanteamiento de urgencia sobre posibles alternativas tanto industriales como económicas que sean viables y logren sustituir, o por lo menos que ayuden a disminuir el uso de combustibles fósiles como el de sus derivados.

El Perú, como mencionamos, se caracteriza por tener un saldo deficitario en la balanza comercial de hidrocarburos, ya sea por la baja producción de petróleo o por limitaciones tecnológicas en las refinerías, por lo que se ve obligado a importar crudos livianos y productos de alto valor comercial como las gasolinas de alto octanaje y de bajo contenido de azufre.

En la actualidad, existen componentes que se le agregan a la gasolina para lograr disminuir las emisiones que producen al hacer combustión, llamados biocombustibles o biocarburantes como el etanol, el cual es el más usado por el momento. Sin embargo, este alcohol no es el más eficiente, ya que existe otro considerado una mejor alternativa llamado butanol, por ser mejor carburante y poseer otras propiedades que lo convierten en un mejor candidato para la masificación de su uso, como por ejemplo que es menos soluble con el agua y es higroscópico por lo tanto resultará menos corrosivo, entre otras características sobresalientes.

En el caso peruano, deberían investigarse los efectos que provocaría el uso de mezclas gasolina-butanol, en comparación a la mezcla gasolina-etanol, sobre el comportamiento de motores de encendido por chispa. Si bien es cierto que aún no contamos con producción local de este biocombustible, de igual manera se deberían realizar investigaciones en concordancia con los estudios y publicaciones internacionales que vienen incrementando año tras año.

JUSTIFICACIÓN

El presente documento de tesis pretende abordar una investigación para determinar los efectos del uso de diferentes mezclas gasolina-butanol sobre el desempeño y las emisiones en motores de encendido por chispa, para aplicaciones vehiculares.

Si bien en los últimos 30 años, la producción de bio-etanol como combustible renovable ha aumentado de forma significativa. Actualmente, a pesar de que países como Estados Unidos, Brasil y China, que son los mayores productores de etanol en el mundo, generan y utilizan grandes cantidades de este alcohol en el sector del transporte, este dista de ser el reemplazo más conveniente para la gasolina, ya que posee un menor contenido energético y es higroscópico³ [9].

Por este motivo, se ha incrementado el interés por el uso del butanol como un potencial candidato sustituto del etanol y la gasolina debido a que como combustible posee propiedades tales como la de un 50% de mayor densidad energética que el etanol (en este aspecto, muy cercano a la gasolina) y puede ser transportado por tuberías debido a que causa menor corrosión, ya que no capta la humedad del medio ambiente. Sin embargo, su desempeño en motores todavía no ha sido del todo estudiado [10].

Si bien, en el Perú, la gasolina de uso comercial (gasohol) contiene un 7.8% de etanol en volumen, surge la inquietud de tener otra alternativa viable y aquí es donde entra el butanol como nueva alternativa y solución a esta dependencia. Asimismo, las razones más relevantes tanto económicas, ambientales, sociales y técnicas en las que nos apoyaremos para defender el uso de estos biocombustibles como una opción para mejorar el sistema energético del país, están íntimamente relacionada con la reducción de la mayoría de emisiones contaminantes, su posible producción local e integración de la agricultura, la reducción de la dependencia del petróleo importado y, por ende, el incremento de la soberanía energética [6].

Por último, debido a un trabajo anterior de tesis de la Pontificia Universidad Católica del Perú sobre mezclas de gasolina-etanol con porcentajes de 7,8%, 10%, 12,5%,15%, 17,5% y 20% de etanol, se decidió usar estos mismos porcentajes para las mezclas de gasolina-butanol y, así, complementar el trabajo anterior. [11]

³ Higroscopia: es la capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medio que los rodea.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar experimentalmente las características del desempeño y las emisiones de un motor de encendido por chispa mediante el uso de mezclas gasolina-butanol, en diferentes proporciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una metodología para separar el etanol del gasohol comercial (E7,8) para ,posteriormente, realizar las mezclas con gasolina pura y butanol.
- Evaluar el comportamiento de un motor de encendido por chispa al usar 6 diferentes mezclas gasolina-butanol (7,8%, 10%, 12,5%, 15%, 17,5% y 20%) y compararlas con el gasohol comercial (E7,8) y la gasolina pura.
- Proponer una metodología experimental para evaluar el rendimiento de un motor de encendido por chispa usando diversas mezclas de gasolina-butanol.
- Proponer una metodología experimental para evaluar las emisiones gaseosas de un motor de encendido por chispa usando diversas mezclas gasolina-butanol.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Gasolina

1.1.1. Definición

Las gasolinas son una mezcla líquida de hidrocarburos (agrupan átomos de carbono con átomos de hidrógeno ordenados en forma de cadenas) y son volátiles, inflamables y de un olor característico, con un intervalo de temperaturas de ebullición de 50°C a 200°C, en donde predominan las parafinas (hidrocarburos alifáticos) en muchos tipos de ellas. Las cadenas de la gasolina tienen de siete a once átomos de carbono en cada cadena. Las configuraciones más conocidas son Heptano (C_7H_{16}), también el Octano (C_8H_{18}), el Nonano (C_9H_{20}) y Decano ($C_{10}H_{22}$) [12].

1.1.2. Materia prima

En la actualidad, la mayor parte de los combustibles líquidos utilizados se producen a partir del destilado de petróleo y el más notable de estos es la gasolina. En sí, el petróleo es un líquido aceitoso, menos denso que el agua, de color oscuro y un olor fuerte, el cual se encuentra en el interior de la tierra formando manantiales. Esta sustancia se forma mediante la fosilización de animales y vegetales entre las rocas sedimentarias, principalmente en los mares, formando hidrocarburos [13].

Este recurso, puede poseer una gran variación de propiedades en cuanto al color, densidad, viscosidad, contaminantes, capacidad calorífica, entre otras. Esto debido a la presencia de diferentes hidrocarburos, cuya fórmula química es de la forma C_xH_y y que pueden ser saturados, no saturados, parafínicos, etilénicos, bencénicos, etc. [13]

1.1.3. Producción

La gasolina puede obtenerse por diferentes procesos, cada uno de los cuales le proporciona ciertas características, a su vez, se pueden clasificar según su proceso de fabricación los cuales se describen a continuación.

Gasolina Primaria (C3 – C8): esta proviene de la unidad de destilación primaria fraccionada del petróleo crudo y constituye la fracción que destila entre los 40 °C y 200 °C. Es un líquido volátil incoloro con un olor característico, de acuerdo al tipo de crudo procesado, su número de octano (ON) llega en promedio a los 60 octanos. Sin embargo, la fracción de crudo que no pudo ser destilada a presión atmosférica (residuo atmosférico) se somete posteriormente a una destilación a vacío donde se obtiene los gasóleos ligeros [12,14].

Gasolina de Reformación Catalítica: proceso cuyo objetivo es producir aromáticos a partir de los naftenos y las parafinas provenientes de la destilación primaria y otros procesos, ver **Figura 1. 1**. Asimismo, es un proceso llevado a cabo para aumentar el número de octano. El principio de esto consiste en hacer pasar la mezcla de hidrocarburos e hidrógenos sobre un catalizador formulado a base de metales nobles soportados en gama de alúmina halogenada. El proceso semiregenerativo cuenta con tres o cuatro reactores alineados en serie, interconectados a través de un calentador, ya que el proceso es altamente endotérmico [14].

Gasolina de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC - FLUID CATALYSTIC CRACKING): este proceso convierte hidrocarburos pesados provenientes de la destilación atmosférica y a vacío en productos más livianos de mayor valor, ver **Figura 1. 2**. Las conversiones se efectúan en un reactor de lecho fluidizado, en el cual las moléculas de cadena larga son fragmentadas e isomerizadas a moléculas de cadenas más cortas y mayor número de octano. Gracias a esto, se llegan a producir gasolinas de 94-98 octanos [14].

Gasolina de Alto Octanaje (HOBS – High Octane Blend Stock): es una gasolina oxigenada, a la cual, por lo general, se le aditiva compuestos de tipo Éter o Alcohol, para elevarle el octanaje [12].

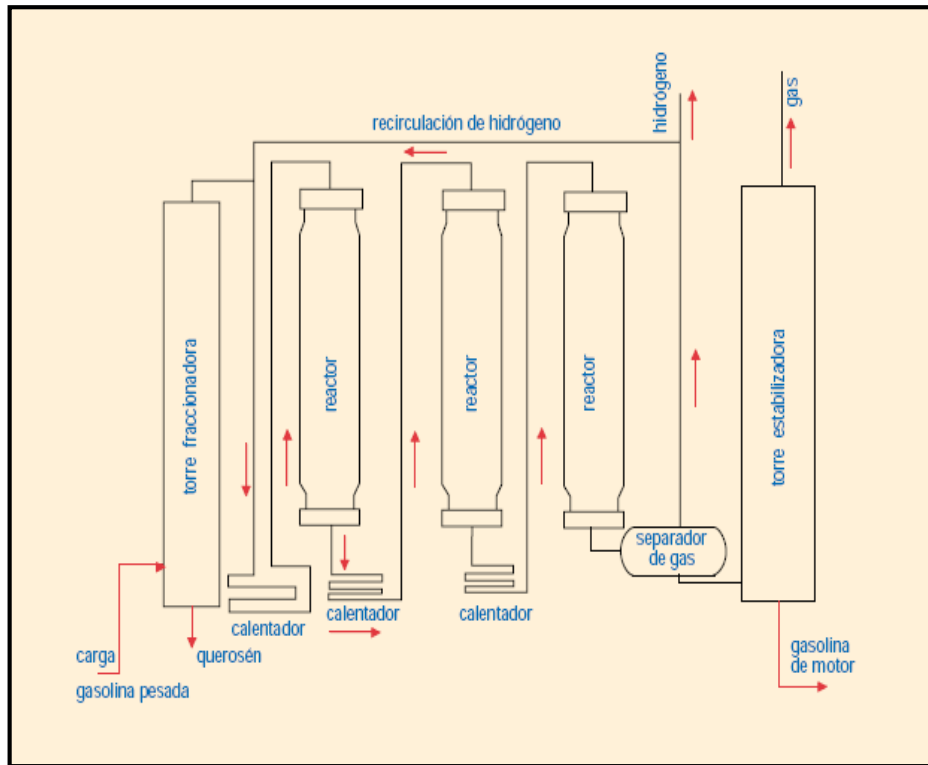


Figura 1. 1 – Proceso de reformación catalítica [15].

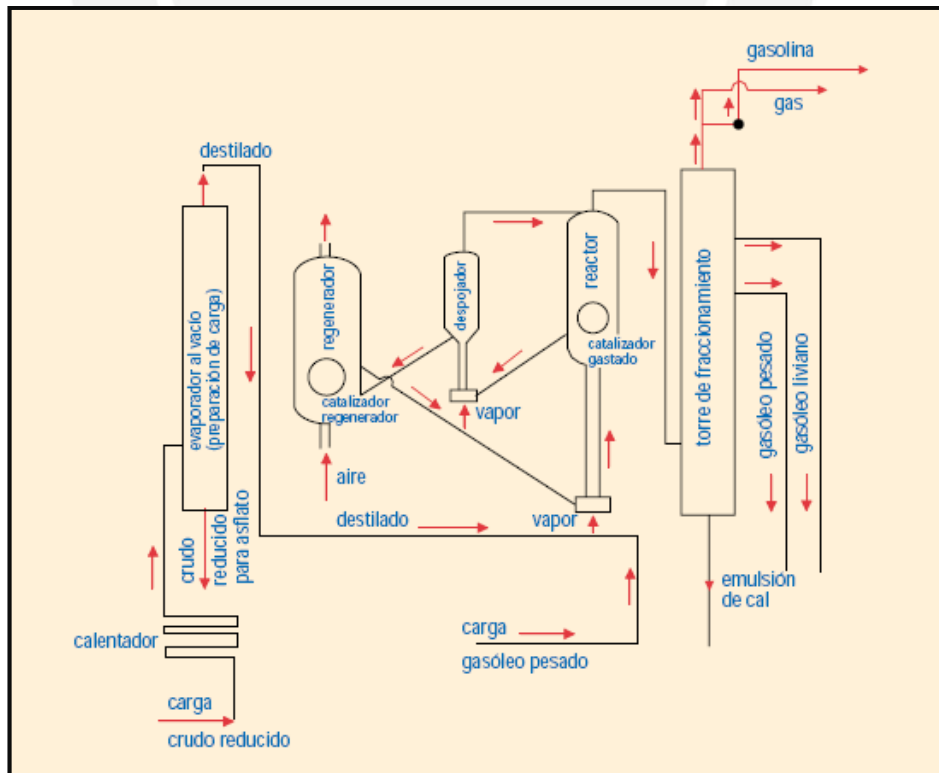


Figura 1. 2 – Proceso de craqueo catalítico fluidizado [15].

1.2. Butanol

1.2.1. Definición

El butanol o alcohol butílico es un alcohol primario de cuatro carbonos en su fórmula molecular (C_4H_9OH). Es un líquido incoloro, que debido a sus propiedades puede reemplazar directamente a la gasolina o puede servir como aditivo del combustible. La producción industrial se basa en un proceso fermentativo llevado a cabo por la bacteria *Clostridium Acetobutylicum*; fermenta carbohidratos y produce principalmente butanol y acetona. Asimismo, se utiliza como solvente, en una amplia variedad de aplicaciones químicas, textiles e industriales, en procesos de cloración, en síntesis orgánicas de ésteres disolventes, plastificantes y otros compuestos [16].

El butanol es altamente inflamable, soluble en agua y miscible con la mayoría de solventes orgánicos. Entre sus isómeros se encuentran: n-butanol (1-butanol), sec-butanol (2-butanol), iso-butanol (2-metil-1-propanol) y tert-butanol (2-metil-2-propanol), ver **Figura 1. 3**. De estos cuatro isómeros mencionados anteriormente, el tert-butanol puede ser usado como un aditivo de la gasolina mas no como un combustible en su totalidad (como el caso del n-butanol y el iso-butanol), ya que por poseer una temperatura de fusión muy alta es prácticamente un sólido a temperatura ambiente.[17].



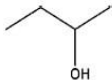





ISÓMEROS DE BUTANOL	ESTRUCTURA MOLECULAR Y CROQUIS	PRINCIPAL APLICACIÓN
1-Butanol	 	Solventes – para pinturas, resinas, colorantes, etc. Plastificantes – mejora los procesos de material plástico Intermediario químico – para ésteres de butil o éteres de butil, etc. Cosméticos – incluyendo maquillaje de ojos, coloretes, etc. Aditivo para gasolina
2-Butanol	 	Solvente Intermediario químico – para butanona, etc. Limpiadores industriales – removedores de pintura Perfumes o para sabores artificiales
iso-Butanol	 	Solvente o aditivo para pintura Aditivo para gasolina Limpiadores industriales – removedores de pintura Ingrediente para tinta
tert-Butanol	 	Solvente Desnaturalizante para etanol Limpiadores industriales – removedores de pintura Aditivo de gasolina para refuerzo de octanaje y oxigenación Intermediario para MTBE, ETBE, TBHP, etc.

Figura 1. 3 – Estructura molecular y principales aplicaciones de los isómeros de butanol [18].

1.2.2. Materia prima

De acuerdo con el artículo “Biobutanol: actualidad y perspectivas” [19], la materia prima del butanol puede obtenerse de cuatro grupos:

Sacarígenos: dentro de este grupo de materia prima se encuentran la azúcares tales como la caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo dulce; los cuales pasan por un proceso de extracción de azúcares fermentables.

Amiláceos: en este grupo están los alimentos que poseen almidones es decir cereales tales como el maíz, sorgo, trigo, boniato, mandioca. Este tipo de insumos pasan, generalmente, por un proceso de trituración y molienda, y una posterior gelatinización.

Lignocelulósicos: dentro de este grupo de materia prima se encuentran la madera, residuos agrícolas, pastos, entre otros. Este tipo de materias, en primer lugar, pasan a un proceso de trituración y molienda, luego por un pre-tratamiento físico-químico, hidrólisis y detoxificación.

Materias primas alternativas: estas pueden ser las algas y el glicerol.

1.2.3. Producción

Existen dos tipos dos procesos para la fabricación del n-butanol el primero mediante procesos petroquímicos y el segundo mediante procesos biomásicos, es decir, por fermentación.

El proceso petroquímico, el cual está constituido a su vez por tres procesos petroquímicos con importancia industrial, como se muestra en la **Figura 1. 4** : (a) La oxo-síntesis, (b) La síntesis de Reppe y (c) La hidrogenación del crotonaldehído [20].

- a) **Oxo síntesis:** Este es el proceso más importante, consiste en la hidroformilación del propeno seguido por la hidrogenación de los aldehídos formados. El monóxido de carbono y el hidrogeno son añadidos al doble enlace C-C en la fase líquida con la presencia de catalizadores como el Co, Rh o Ru. Un aldehído isomérico mezclado de 1-butanol y 2-metil 1-propanol (iso-butanol) es obtenido. A su vez, se realiza una hidrogenación catódica de los aldehídos para producir la formación de los correspondientes alcoholes.

- b) La síntesis de Reppe: En este proceso el propeno, el monóxido de carbono y el agua reaccionan a una presión de $0.5 - 2 \times 10^6$ Pa y una temperatura de 100°C con la presencia de catalizadores (sal de amonio terciaria y carbonilo de hierro polinuclear). 1-butanol y 2-metil 1-propanol son directamente formados en razón de 86:14. EL Reppe síntesis no es tan satisfactorio como la oxo síntesis con el catalizador Co, a pesar de tener una mejor proporción entre n-Butanol e iso-Butanol y tener una reacción más suave. Asimismo, es el proceso tecnológico más caro.
- c) La hidrogenación del crotonaldehído: En 1950, este proceso petroquímico se basó en la condensación aldólica del acetaldehído, seguido por una deshidratación y posterior hidrogenación del crotonaldehído, pero con el descubrimiento de la oxo-síntesis esta fue abandonada. Sin embargo, la condensación aldólica fue modificada a temperatura y presión ambiente con la presencia de catalizadores alcalinos. Además, la deshidratación fue inducida por acidificación con ácido acético o fosfórico y una posterior destilación. Por último, la hidrogenación fue realizada en estado líquido o gaseoso con catalizadores de Cu y cerca de 1000kg de 1-butanol fue obtenido de 1350 kg de acetaldehído.

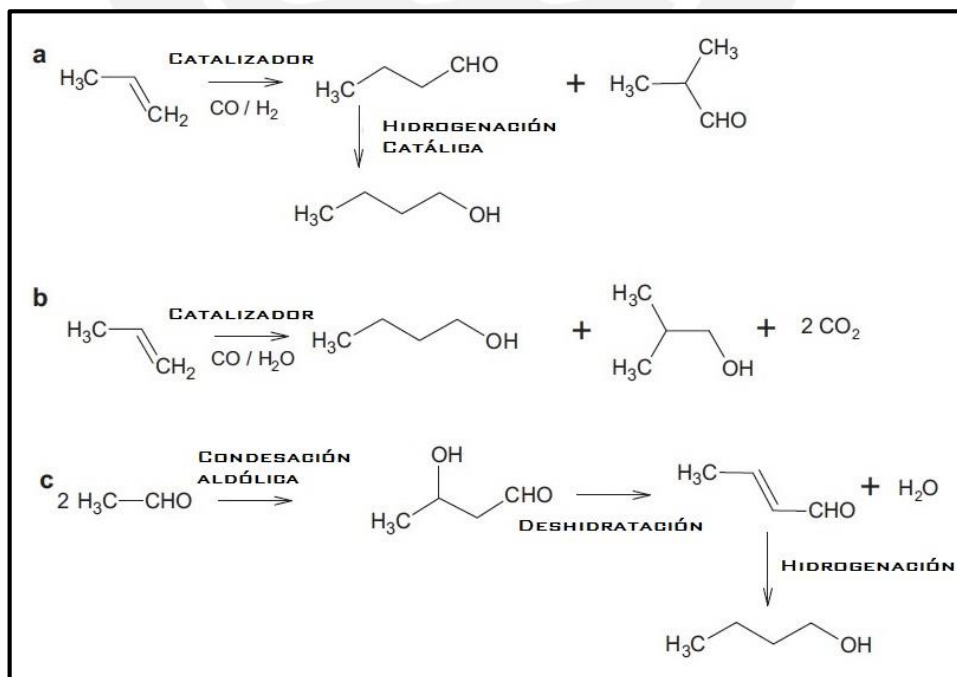


Figura 1. 4 – Proceso Petroquímico para la producción de n-butanol [20].

El Proceso biomásico del n-butanol tiene una larga historia y comienza en 1862 con los reportes de fermentación de Pasteur. El más representativo es la fermentación acetona-butanol-etanol (ABE). No obstante, el declive del proceso de fermentación fue causado por el incremento del sustrato de melaza y el bajo precio del petróleo crudo lo que ocasionó que los procesos petroquímicos sean más baratos y, por lo tanto, más rentables. Sin embargo, recientemente, la fermentación ABE ha ganado nuevamente interés desde el punto de vista de los biocombustibles.

La clostridia realiza la fermentación ABE a partir de la glucosa o almidón de una manera compleja. Durante, la fase de crecimiento acidogénica, ácidos orgánicos como el ácido láctico, acético y butírico, y gases como H_2 y CO_2 son formados. Asimismo, en la fase solventogénica, acetona, n-Butanol y etanol son producidos. Por otro lado, las bacterias clostridia más estudiadas son la *Clostridium Acetobutylicum* y la *Clostridium Beijerinckii*. A continuación, en la **Figura 1. 5**, se muestra un esquema del respectivo proceso de producción a través de la fermentación ABE. [20]

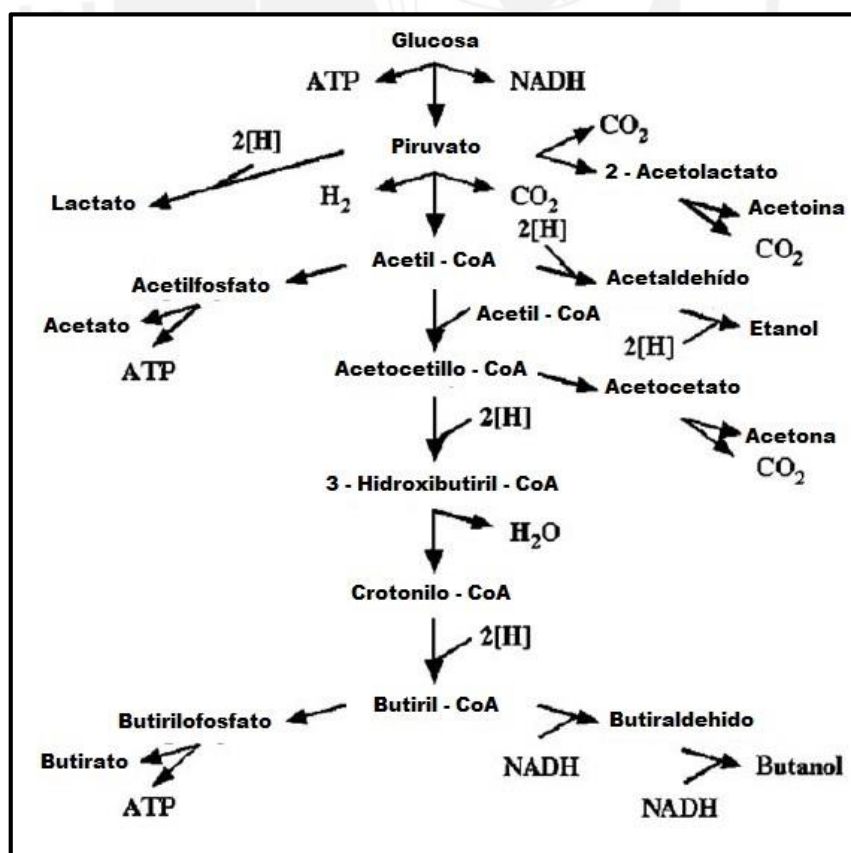


Figura 1. 5 – Proceso de fermentación del butanol empleando la bacteria *Clostridium Acetobutylicum* [18].

1.3. Propiedades de la gasolina y el butanol.

En la **Tabla 1. 1**, se muestra un cuadro comparativo con las principales propiedades del butanol, la gasolina, y a su vez las del etanol para poder conocer la diferencia entre estos dos alcoholes.

De los datos se puede calcular que la relación másica de hidrógeno/carbono es mayor en el caso de los alcoholes (etanol=0,25, n-butanol=0,21 y gasolina=0,16); es decir, los alcoholes poseen mayor composición de hidrogeno en relación a su contenido de carbono y, consecuentemente, generarían una menor emisión de material particulado⁴ durante el proceso de combustión. Asimismo, comparadas con la gasolina, los alcoholes poseen un oxígeno extra en su composición molecular, lo que debería favorecer a la reducción parcial de CO y HC en el proceso de combustión [21].

El butanol posee un contenido de energía (poder calorífico inferior) mayor que la del etanol, por lo que de antemano se esperaría que su desempeño como biocombustible sea mejor que el del etanol, y más parecido al de la gasolina. Aquí es importante destacar que el butanol es más denso del etanol, y de este modo, para un mismo volumen de alcohol, el butanol tendrá un mayor contenido de energía.

El punto de ebullición es una propiedad importante en las sustancias que son usadas como combustibles, ya que, para el proceso de combustión, la gasolina contiene hidrocarburos leves que se evaporan desde 25 °C, por lo que dichos compuestos no necesitarán mucha energía para vaporizar y formar la mezcla aire-combustible. Asimismo, se puede observar en la **Tabla 1. 1**, que el etanol y butanol son sustancias puras con temperaturas de ebullición definidas (78 y 118 °C, respectivamente), cuyos valores son superiores a los correspondientes hidrocarburos livianos de la gasolina. Esta diferencia, aumenta la resistencia a la evaporación de los alcoholes lo que dificultará el funcionamiento del motor en condiciones de partida en frío.

Además, en la **Tabla 1. 1**, se observa que los calores latentes de vaporización de los alcoholes son mayores que el de la gasolina por lo que hay calentarlos más para mantenerlo en estado gaseoso. Esta energía será absorbida del aire admitido, con lo

⁴ 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.

cual este reduciría su temperatura, la densidad de este aumentaría y se lograría una mayor admisión de masa.

Como podemos observar a partir de la **Tabla 1. 1**, el etanol y la gasolina cuentan con un número de octano mucho mayor que el de butanol. De esta forma, la relación de compresión de los motores de encendido por chispa deberá ser limitada para el uso de butanol, debido a la menor capacidad antidetonante de este, ya que si no generaría detonaciones o explosiones antes de lo esperado, lo que ocasionaría un mal funcionamiento y bajo rendimiento.

Tabla 1. 1 – Principales propiedades físico-químicas de los alcoholes y de la gasolina [21]

Propiedades a 325 K Y 100kPa	n-butanol	Etanol	Gasolina
Fórmula molecular	C ₄ H ₉ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₄ -C ₁₂
Composición (C; H; O) en % masa	65; 13,5; 21,5	52; 13; 35	86; 14; 0
Solubilidad en agua a 20°C(ml/100 ml de agua)	7,7	Miscible	<0,1
Poder calorífico inferior(MJ/kg)	33	26,8	42,9
Densidad a 20°C (kg/m ³)	810	790	736
Punto de ebullición (°C)	118	78	25-215
Relación de estequiometría del aire/combustible	11,2	9	14,7
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	716	904	380-500
Valor calorífico estequiométrico (MJ/kg)	2,70	2,68	2,73
Número de octano (RON+MON) / 2	89	100	97
Presión de vapor (mmHg a 20°C)	4	45	360-585
Temperatura de autoignición (°C)	343	420	~300

Otra propiedad importante es que la presión de vapor de la n-butanol (4 mmHg a 20 °C) es aproximadamente 11 veces menor con la del etanol (45 mmHg a 20°C). Se sabe que, cuanto menor es la presión de vapor de un líquido a una temperatura determinada, menor es la volatilidad y mayor es la temperatura de ebullición normal del líquido. [22]

Además de las diferencias mencionadas en los párrafos anteriores, otras ventajas del butanol sobre el etanol son [19]:

- Mayor seguridad debido a la menor volatilidad y tendencia explosiva, y además por tener mayor punto de inflamabilidad.
- Menor capacidad higroscópica, es decir, menor capacidad para absorber agua (ya sea líquida o en forma de vapor) del medio ambiente o su entorno. Se puede mezclar fácilmente con gasolina y diésel en cualquier proporción.
- Es menos corrosivo que el etanol, lo que permitiría una mayor durabilidad del tanque de combustible y los sellos mecánicos.
- Es compatible con la infraestructura de distribución de combustibles derivados del petróleo (tuberías).
- Debido a ser menos higroscópico, corrosivo y ser compatible con las infraestructuras de distribución de la gasolina, el butanol se podría mezclar directamente con la gasolina en las refinerías y ser enviado por las mismas líneas de transporte y distribución petrolera, algo que no es posible con el etanol.

Por lo expuesto anteriormente, observamos que el butanol posee propiedades que lo hacen mejor candidato que el etanol y por ser más compatible con la gasolina se podría usar como nuevo aditivo en esta. Asimismo, el butanol producido a partir de la biomasa es considerado un biocombustible muy atractivo para su uso en motores de encendido por chispa; sin embargo, el desarrollo de su producción requerirá de una evaluación y disponibilidad de materias primas de bajo costo, sin afectar la producción de alimentos y manteniendo un bajo consumo energético en la producción.

1.4. Motor de combustión interna de encendido por chispa

1.4.1. Definición

La definición de motores de combustión interna (MCI) se aplica generalmente a los motores de combustión interna alternativos del tipo comúnmente usados en automóviles, camiones y autobuses. En nuestro caso, nos referiremos solo a los motores de encendido por chispa (MECH), en un motor de este tipo una mezcla aire-combustible se enciende mediante una bujía. Los motores de encendido por chispa tienen ciertas ventajas para aplicaciones en los que se requieren potencias hasta 225 kW, ya que estos son menos pesados y tienen costos relativamente más bajos, es por esto que son adecuados para su uso en automóviles [23].

La **Figura 1. 6** representa un MECH constituido por un pistón el cual hace su recorrido dentro de un cilindro provisto de dos válvulas, una para la entrada de la mezcla y la otra para la salida de esta misma. El calibre vendría ser el diámetro del pistón, la carrera es la distancia que recorre el pistón y el volumen final de compresión o volumen muerto vendría a ser el volumen confinado donde ocurre la combustión. Asimismo, se le dice PMS (punto muerto superior) al punto de máxima compresión o final de la carrera y PMI (punto muerto inferior) es el punto de máximo volumen [23].

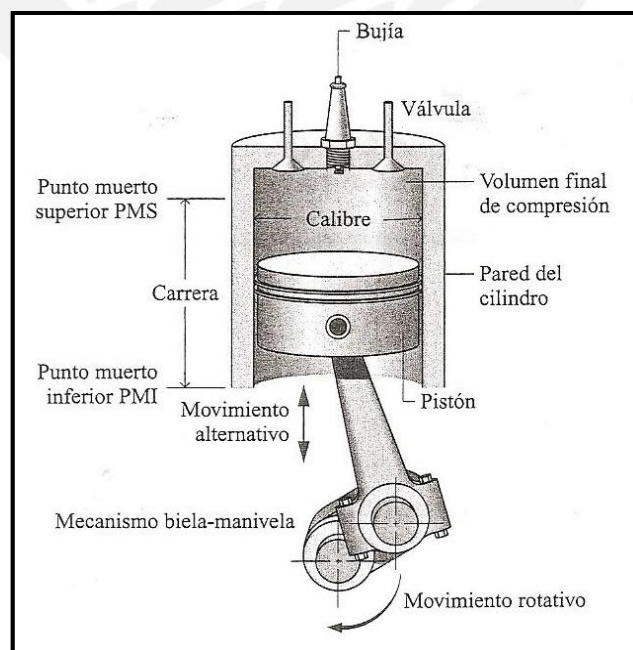


Figura 1. 6 – Nomenclatura para motores alternativos cilindro-pistón [23].

El combustible más usado de un motor de encendido por chispa es la gasolina, sin embargo, pueden usarse también combustibles gaseosos como gas natural vehicular (GNV), gas licuado de petróleo (GLP), biogás y, también, los alcoholes [24].

Los MECH (motores de ciclo Otto) pueden alimentarse de combustible por carburación o inyección. En el primero, el aire pasa a través del estrechamiento del carburador, la velocidad se eleva, y por el efecto Venturi aspira o succiona la gasolina desde la tobera principal la cual es soplada y esparcida por el flujo del aire y, por ende, mezclada. En el segundo, el combustible se suministra a través de una bomba de presión el cual se inyecta y se mezcla con el aire en el conducto de aspiración justo en la toma de la válvula o, también, directo a la cámara de combustión, es decir, a los cilindros [25].

De acuerdo a la realización física del ciclo de trabajo, un motor de encendido por chispa puede ser de 2 o 4 tiempos. La más frecuente adoptada para el tipo de motor Otto es la de 4 tiempos (admisión, compresión, explosión y escape), ver **Figura 1. 7**, es decir que para completar el ciclo termodinámico para esta variante el motor debe dar 2 revoluciones girando un total de 720° [26].

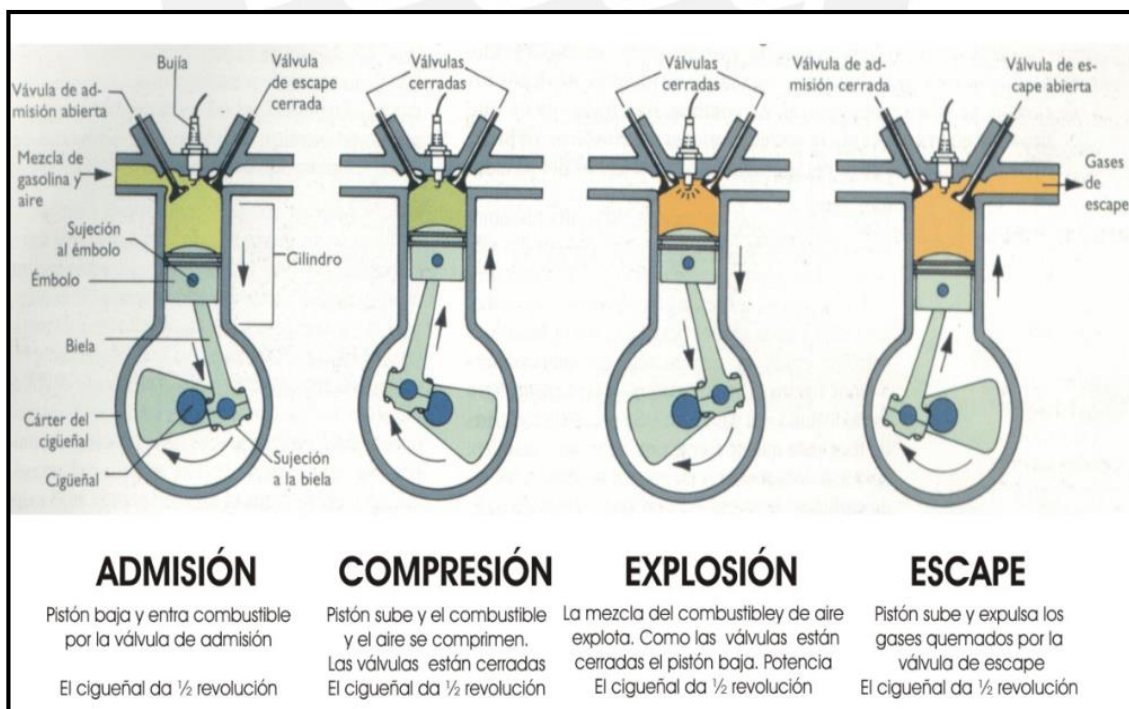


Figura 1. 7 – Fases de un motor de 4 tiempos [27].

En la **Figura 1. 8**, se muestra el ciclo ideal termodinámico para este tipo de motor y, a continuación, se pasará a describirlo [26]:

Admisión 0-1: en esta etapa se abre la válvula de admisión y se admite la mezcla aire-combustible.

Compresión: 1-2: etapa donde ocurre una compresión adiabática del aire cuando el pistón va desde PMI a PMS. Es considerada adiabática reversible, ya que la temperatura y velocidad del fluido no son muy elevadas.

Explosión/expansión (ciclo de potencia o trabajo) 2-4: etapa donde se cierran las dos válvulas, se quema el combustible instantáneamente y la mezcla absorbe calor a volumen constante, estando el pistón en el PMS, este proceso representa la combustión. Además, en esta etapa, se da también el proceso de expansión isentrópica o adiabática reversible en el cual la mezcla de gases se expande debido a la explosión previa y cede trabajo al pistón que vuelve al PMI. Asimismo, es considerada adiabática por las mismas razones que la compresión.

Proceso 4-0: luego, en este proceso, el pistón realiza la carrera de escape, en la que los gases de la combustión son expulsados del cilindro al exterior a través de la válvula de escape.

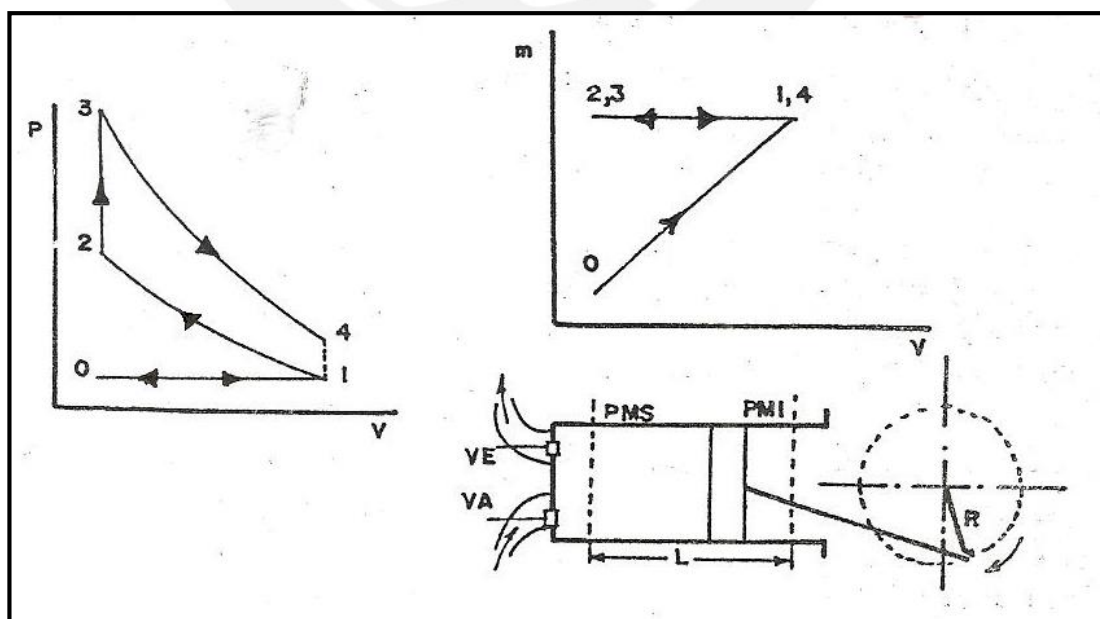


Figura 1. 8 – Motor Ideal de Explosión de 4 tiempos [13].

CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

En la literatura existe una vasta información de investigaciones numéricas y experimentales abordando el uso de alcoholes como el etanol, en cambio esta es más reducida para el butanol (n-butanol e iso-butanol). Las investigaciones sobre alcoholes abordan tanto su uso en forma pura como combustible o como aditivos para aplicaciones vehiculares en motores de encendido por chispa. A continuación, se presenta un resumen de las principales publicaciones experimentales sobre este tema, enfocándonos, principalmente, en aquellas relacionadas al butanol.

2.1 Investigación 1

Dernotte y colegas [28], en esta investigación, cuantifica la influencia de las emisiones de NO_x , CO, HC para diferentes mezclas de gasolina-butanol. De esta manera, evalúa la adición de butanol en un motor de encendido por chispa con puerto de inyección de gasolina (ver **Figura 2. 1**).

Siendo más específicos, esta es una investigación experimental en un motor marca Honda modelo D16Z6 de 4 cilindros, 16 válvulas y con una relación de compresión de 9,6:1. Asimismo, el motor fue conectado a un dinamómetro de corrientes parásitas con sus respectivos controladores. Además, el motor fue puesto en marcha con diferentes mezclas de gasolina-butanol, desde 0% a 80% en volumen de butanol (B0, B20, B40, B60 and B80) a diferentes capacidades de torque, tiempos de chispa y dosados relativos.

Los resultados muestran que la mezcla B40 minimiza significativamente las emisiones de HC. Asimismo, observamos que fue posible operar el motor con el dosado más pobre

para la mezcla B40 comparado con el dosado más pobre de la gasolina. Por último, al aumentar el contenido de butanol esto conlleva a que los niveles de emisiones de HC estén por encima de los de la gasolina pura con un aumento del 18% en el caso de B60 mientras que de un 47% para B80, ver **Figura 2. 1**.

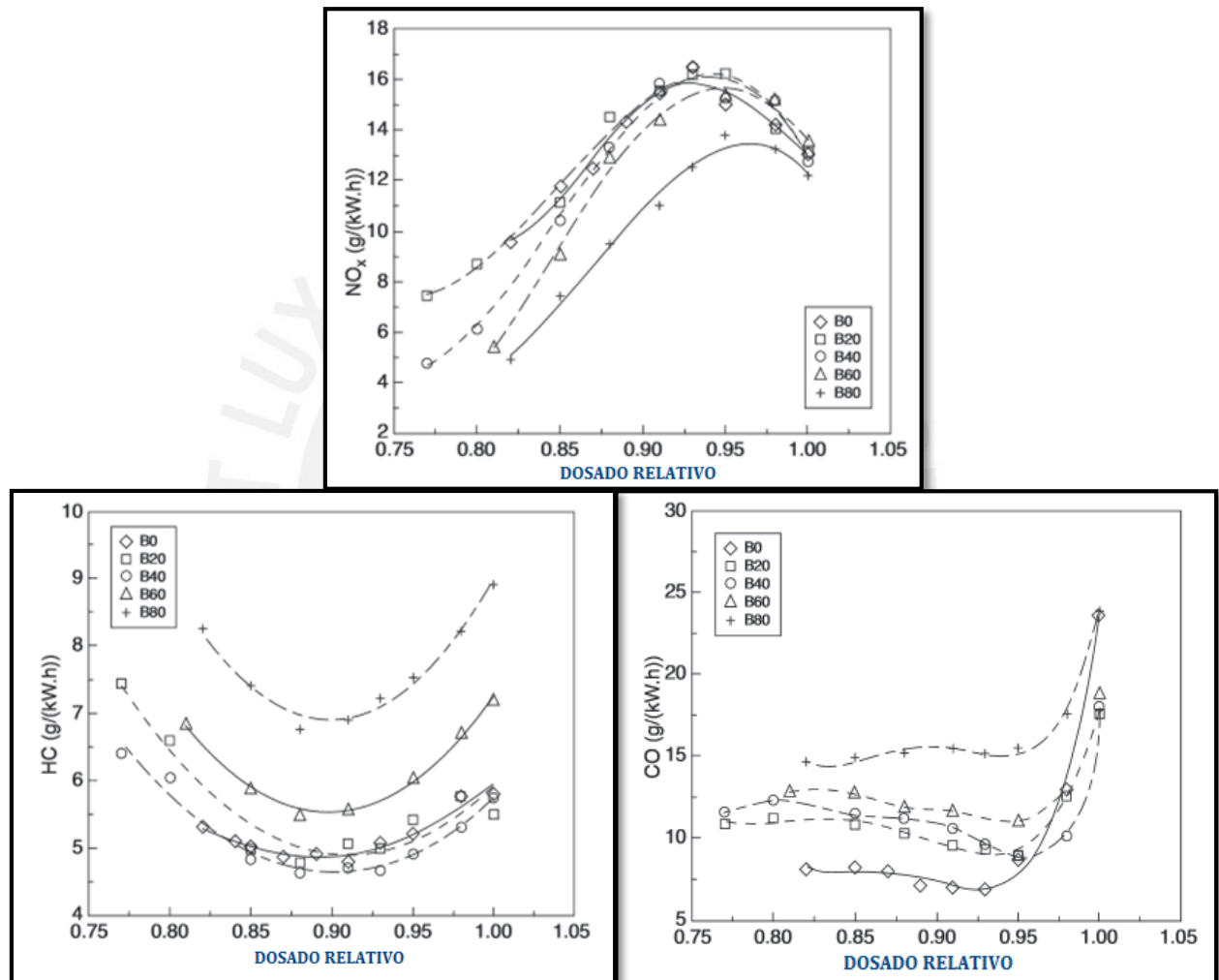


Figura 2. 1 – Emisiones específicas de NO_x, HC y CO versus dosado relativo para diferentes mezclas de gasolina y butanol [28].

Para los niveles de monóxido de carbono (CO) se observó que utilizando mezclas de 20%, 40% y 60% de butanol en la gasolina, estos disminuyeron con respecto a la gasolina pura para la relación estequiométrica del dosado relativo. Sin embargo, para mezclas pobres, el CO por lo general aumenta conforme se aumentó el porcentaje de

butanol en la mezcla, esto sugiere que la completa oxidación del CO es más dificultosa para mezclas gasolina-butanol, ver **Figura 2. 1**.

Se determinó que, para una concentración de butanol menor que el 60% y con una mezcla estequiométrica, no hubo un cambio significativo en las emisiones gaseosas de óxidos nitrosos excepto para la mezcla B80 que ofrece una disminución notable, ver **Figura 2. 1**.

Por último, el consumo específico de combustible (cec) aumenta cuando se incrementa el porcentaje de butanol, con el mayor aumento visible en la mezcla B80 el cual es de un 28% mayor para la mezcla estequiométrica comparada con la de gasolina pura. Asimismo, el relativo bajo incremento en el cec, asociadas con las mezclas de butanol, puede ser ligado a la mayor poder calorífico inferior (PCI) y a la mayor relación aire/combustible para la mezcla estequiométrica que posee el butanol en comparación con el etanol, ver **Tabla 2. 1**.

Tabla 2. 1 – Consumo específico de combustible relativo y cambio en el PCI en función de la adición de butanol a 2000 RPM y 367kPa de presión media indicada [28].

MEZCLA	CEC Relativo			Cambio en el PCI (%)
	$\Phi = 0.83$	$\Phi = 0.91$	$\Phi = 1.0$	
B20	+7.4	+6.4	+1.8	-5.0
B40	+10.8	+11.6	+9.4	-9.8
B60	+18.6	+17.9	+18.1	-14.5
B80	+26.8	+25.2	+27.7	-19.0

2.2 Investigación 2

Elfasakhany [29] realizó una investigación en motor de encendido por chispa monocilíndrico con carburador (ver **Tabla 2. 2**). Empleó mezclas de gasolina con n-butanol en las siguientes proporciones: nB3, nB7 y nB10 y las comparó con la gasolina pura (nB0) a diferentes regímenes de giro del motor desde 2600 rpm hasta 3400 rpm variando la velocidad en 100 rpm y repitiendo cada experimento 3 veces. Asimismo, fueron analizados parámetros como potencia efectiva, torque, eficiencia volumétrica,

temperatura de gases de escape (T_g), cantidad de emisiones de monóxido de carbono (CO), emisiones de dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarburos no quemados (HC).

Tabla 2. 2 – Especificaciones y parámetros del motor [29].

Especificaciones y parámetros del motor	
Tipo de Motor	Motor de encendido por chispa
Modelo	CT 150 (2011)
Diámetro (mm)	65,1
Carrera (mm)	44,4
Cilindrada (L)	0,147
Relación de compresión (-)	7
Potencia (kW)	1,5
Número de cilindros	1
Número de válvulas	2
Tipo de gasolina	Petróleo - Gasolina
Aspiración de gasolina	Aspiración Natural
Tranporte de gasolina	Carburador

Al comparar las emisiones de CO_2 , CO y HC obtenidas con la adición de n-butanol, se determinó que para las mezclas gasolina-butanol existe una mayor reducción en las emisiones de estos gases que cuando se usa gasolina pura. Esta disminución no solo depende de la cantidad de butanol, sino también de la velocidad de giro con la cual trabaja el motor. A la velocidad de 2600 rpm, las emisiones que produce la gasolina pura es bastante alta, alcanzando incrementos de alrededor de 43%, 32% y 26% mayor de CO_2 , CO, HC respectivamente, comparado con las mezcla nB10. Sin embargo, para velocidades mayores a 2900 rpm esta brecha con la gasolina pura decrece significativamente y se observa que no hay una gran diferencia entre las 3 mezclas de butanol para una misma velocidad de giro, ver **Figura 2. 2**.

Por otro lado, cuando se usa la mezcla de nB10, esta es la que da el menor rendimiento del motor. Los siguientes porcentajes muestran una disminución de la nB10 con respecto a la gasolina de 5.6%, 2.5%, 6.6%, 8.3% y 3.5% para la temperatura de escape, torque efectivo, potencia efectiva, presión dentro del cilindro y eficiencia volumétrica, respectivamente.

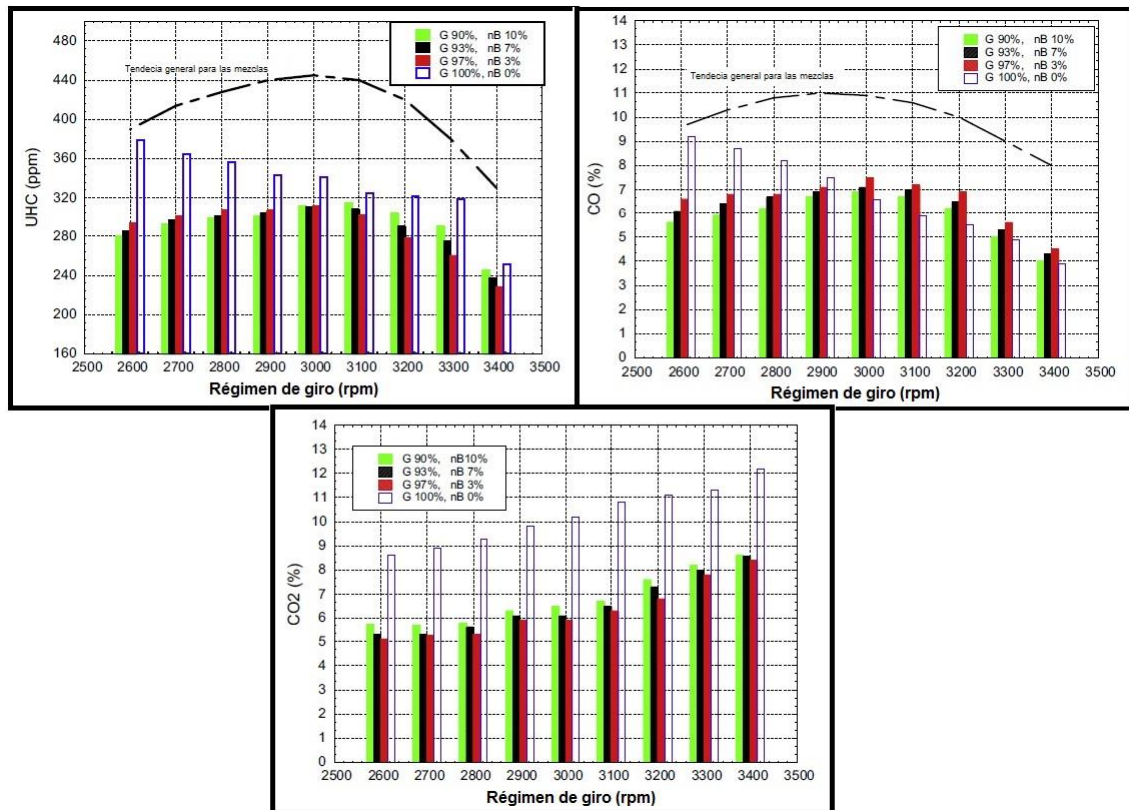


Figura 2.2 – Emisiones de HC, CO₂ y CO versus velocidades del motor [29].

Elfasakhany [29] concluye que se debería adicionar hasta un 10% de butanol a la gasolina comercial, debido a que esta pequeña adición de butanol mejoraría las emisiones como en la reducción de la mitad de emisiones de CO₂ que se produce con la gasolina pura, el cual es el principal causante del efecto invernadero y el calentamiento global y solo habría una pequeña reducción en el rendimiento del motor.

2.3 Investigación 3

Xiaolei Gu y colegas [21] realizaron una investigación que mostró el comportamiento de un motor de encendido por chispa (modelo HH368Q) de tres cilindros con puerto de inyección de gasolina, una relación de compresión de 9.6 y un sistema de control electrónico para regular la relación aire/combustible y el tiempo de chispa, el cual se hizo operar con diferentes tiempos de encendido, porcentajes de EGR y mezclas gasolina-butanol. Los investigadores analizaron 5 mezclas las cuales contienen diversos porcentajes volumétricos de butanol: 0%, 10%, 30%, 40% y 100%.

Sus resultados indican que el consumo específico de combustible fue mayor al usar las mezclas gasolina-butanol, comparadas a la gasolina pura. En cambio, las emisiones de HC, CO y NO_x fueron menores al usar las mezclas gasolina-butanol. Sin embargo, para el butanol puro se incrementaron las emisiones de HC y CO pero disminuyeron la de NO_x.

Por otro lado, un tiempo de chispa adelantado incrementa las emisiones de HC y NO_x mientras que el CO disminuye. Asimismo, el EGR incrementa ligeramente el HC y CO tanto con la mezcla de gasolina pura como con mezclas conteniendo n-butanol, y simultáneamente puede reducir las emisiones y el número de concentración del NO_x.

2.4 Investigación 4

En esta investigación desarrollada por Broustail y coinvestigadores [30], se usó un tipo de butanol diferente al n-butanol, el cual es el iso-butanol. Ellos realizaron un estudio experimental mediante el uso de mezclas de iso-octano-etanol e iso-octano-butanol, en un motor de encendido por chispa carburado, monocilíndrico y lo hicieron trabajar a cargas bajas y a medias cargas. El iso-octano fue usado como combustible referencia de la gasolina y se prepararon mezclas de 25%, 50%, 75% y 100% de alcohol (en volumen).

El consumo específico de combustible aumentó con la adición de alcohol (etanol o butanol) al iso-octano; alrededor de un 30% cuando se usó butanol y en un 60% cuando se usó etanol. Además, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) aumentaron significativamente con la adición de los alcoholes, 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 (CH₄) cuando se le adicionó alcohol a la mezcla.

También se encontró que para el uso de los dos alcoholes al 100%, los niveles de benceno (C₆H₆) estuvieron casi eliminados por completo. Además, se obtuvo una reducción de los niveles de acetileno (C₂H₂) cuando se usó etanol en la mezcla. Para el caso de la cantidad de formaldehído (CH₂O) emitido, se encontró un pequeño aumento cuando se usó la mezcla con etanol, y un gran incremento cuando se utilizó la mezcla con butanol.

Broustail [30] concluye que el uso de butanol como combustible en motores de encendido por chispa para aplicaciones vehiculares parece tener numerosas ventajas sobre el etanol; como lo es un menor consumo específico de combustible y una menor 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.

2.5 Investigación 5

Alasfour [31] realizó una investigación con el objetivo de evaluar el efecto que se da en la mezcla de 30% (en volumen) de iso-butanol con gasolina cuando se precalienta el aire de admisión, de esta manera observar y analizar el comportamiento de NO_x . El experimento se realizó en un motor de encendido por chispa monocilíndrico que funcionó a 1500rpm para un rango de relación aire/combustible de 0.7-1.1 y bajo diferentes temperaturas de aire de admisión del motor.

Se observó que para la mezcla de 30% en volumen de iso-butanol y 70% de gasolina, el máximo nivel de emisiones de NO_x se redujo en 9%, comparado con la gasolina y esto fue más evidente en la mezcla rica. Para todas las relaciones de aire/combustible, el efecto de precalentar el aire por encima de la temperatura ambiente fue el incremento en las emisiones de NO_x . Por ejemplo, el investigador obtuvo un incremento de 10% del NO_x cuando se aumentó la temperatura de 40 a 60 °C para una relación aire/combustible de 0.9.

Finalmente, la investigación concluyó que cuando se precalienta el aire de admisión en mezclas iso-butanol con gasolina (con 30% en volumen de iso-butanol) la eficiencia del motor disminuye, ya que aumenta el ruido del motor y ocurren fallos en el encendido.

2.6 Investigación 6

Irimescu [32] realizó una investigación para comparar el uso del iso-butanol (iB50% y iB100%) con la gasolina, a través de parámetros del motor tales como la potencia y la eficiencia. El experimento se realizó en un dinamómetro de chasis con un carro de pasajeros, un motor del tipo MECH alimentado por un puerto de inyección y con un

módulo electrónico adicional para controlar el incremento del flujo de combustible mediante el aumento del tiempo de inyección. Esto ayudaría a obtener condiciones muy cercanas al real funcionamiento de un motor en aplicaciones automovilísticas.

De la **Figura 2.3** y **Figura 2.4**, se observa que para desarrollar el mismo perfil de potencia efectiva cuando se usa gasolina, el rendimiento efectivo del motor disminuye en un máximo de 6% con el uso de 100% de butanol. Sin embargo, con el uso de la mezcla de 50% de iso-butanol y 50% de gasolina, se mostró el mejor rendimiento efectivo (+6%) cerca de los 5000 rpm. El investigador señala que la principal causa de la disminución de la eficiencia del motor se debe a una combustión incompleta.

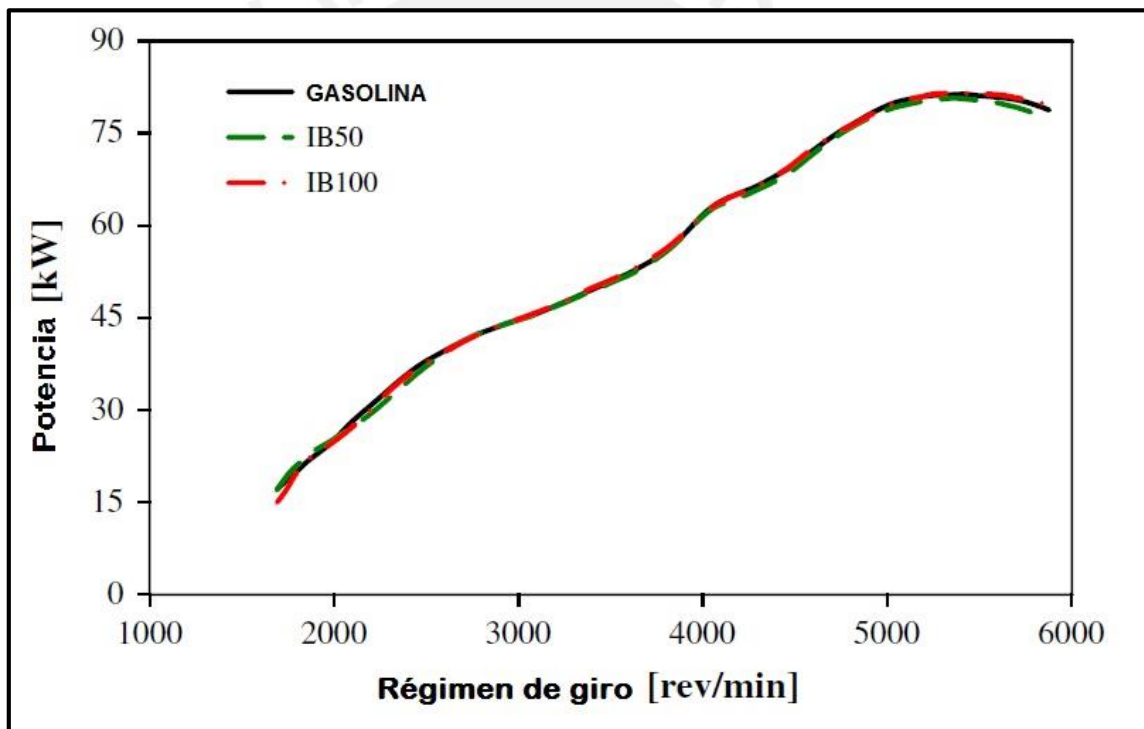


Figura 2.3 – Variación de la potencia efectiva en función del régimen de velocidad y combustible utilizado [32].

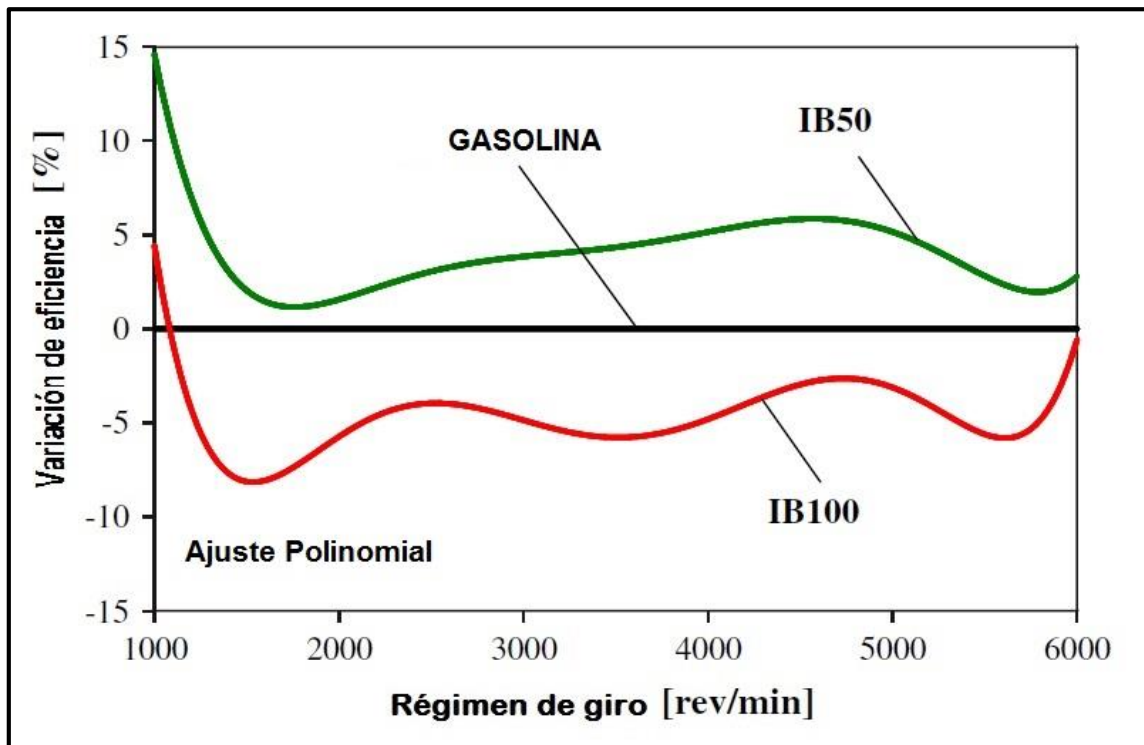


Figura 2. 4 – Variación del rendimiento efectivo en función del régimen de velocidad y combustible utilizado [32].

2.7 Investigación 7

En este trabajo, los investigadores Szwaja y Naber [33] se enfocan en aplicar el butanol como un agente de mezcla aditivo en la gasolina para reducir la parte fósil y de esta manera disminuir las emisiones de CO₂. El motor usado fue un MECH monocilíndrico, en el cual se realizó un cambio en la relación de compresión mediante la modificación del pistón.

Los parámetros de prueba se dieron a una velocidad constante de 900rpm, un torque neta indicado de 330 kPa y 660 kPa de presión media efectiva; se usó una relación aire/combustible por debajo de la estequiométrica, un ángulo de encendido comprendido entre 18°- 4° antes del punto muerto superior, una relación de compresión de 8:1 y de 10:1, y todo esto para mezclas de 0%, 20%, 60% y 100% de n-Butanol en la gasolina.

Mediante la base de la data experimental, se pasó a determinar las características de la combustión mediante la fracción de masa quemada (MFB), la duración de la

combustión, el ratio de MFB y la locación del 50% MFB. Esto ayudó a conocer la fase de la combustión con el óptimo encendido de la chispa para una potencia máxima. Además, del efecto de los golpeteos (alta vibraciones) en la combustión con las mezclas de 20% y 60% con n-Butanol.

La principal conclusión fue que para una condición de carga parcial, la duración de la combustión y el ratio de MFB son comparables con la gasolina para mezclas n-Butanol de 20% y 60%, y puede ser extendido para todo el rango de mezclas de 0% -100%. Para este punto de vista, ellos afirman que n-butanol puede sustituir a la gasolina en su forma pura o mezclada.

2.8 Investigación 8

Regalbuto y colaboradores [34] realizaron un estudio acerca del efecto de 3 de los 4 isómeros de butanol (n-butanol, iso-butanol y sec-butanol), ver **Tabla 2. 3**, en el desempeño de un motor y en las emisiones gaseosas.

Tabla 2. 3 – Propiedades de los isómeros de butanol y del etanol [34].

	n-butanol	sec-butanol	iso-butanol	tert-butanol	etanol
Densidad (kg/m ³)	809,5	806,3	801,8	788,7	789,3
Número de octano de investigación (RON)	96	101	113	105	130
Número de octano del motor (MON)	78	32	94	89	96
Temperatura de fusión (°C)	-89,5	-114,7	-108	25,7	-114,1
Temperatura de vaporización (°C)	117,7	99,5	108	82,4	78
Entalpía de vaporización (kJ/kg)	584	551	566	527	839
Temperatura de autoignición (°C)	343	406,1	415,6	477,8	363
Viscosidad dinámica (mPa-s) a 25°C	2,544	3,096	4,312	-	1,074

Para esto, los tres isómeros fueron mezclados en 30% de butanol y 70% de gasolina y se probaron en un motor de encendido por chispa de un cilindro con puerto de inyección. Para los experimentos, se varió en 3 puntos diferentes la presión de admisión, pero se mantuvo constante la velocidad, la relación aire/combustible y el tiempo de encendido de la chispa.

Regalbuto [34] concluyó que los tres combustibles tienen una idéntica termoquímica en términos de generación de potencia pero difieren en la generación de emisiones. Además, los tres generaron similares torques y exhibieron menores variaciones de niveles de ruido en sus respectivos trazos de presión indicada así como idénticos valores de temperatura de escape. Sin embargo, el 2-butanol generó un poco más de hidrocarburos no quemados que los otros dos, cuando se incrementaba la temperatura de escape. El CO tuvo insignificantes variaciones para los 3 isómeros, en cambio el NO_x fue menor para el iso-butanol.

Por lo anteriormente expuesto, se consta que existen diversos estudios sobre el uso de los diferentes isómeros de butanol en motores de encendido por chispa. De modo general, las emisiones de CO y HC disminuyen y NO_x aumenta ligeramente. El consumo específico también aumenta con el incremento del butanol en la mezcla en comparación a la gasolina pura. No obstante, existen algunos resultados contrarios de ciertos investigadores, principalmente en las emisiones de HC y CO, cuando se usan diferentes formas de suministro del combustible (carburado o inyectado), y a esto se le suma la diferencia entre los motores de prueba que fueron monocilíndricos y multicilíndricos.

En el próximo capítulo, se pasará a describir el procedimiento usado para para realizar la separación del etanol en el gasohol y el protocolo de los ensayos en el motor MECH. Asimismo, se mostrarán y describirán los equipos e instrumentos de medición utilizados y, también, estarán detalladas todas las fórmulas que se usaron para hallar las variables calculadas con sus respectivas incertidumbres.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

3.1. Obtención del butanol y de la gasolina pura.

El butanol se compró a la empresa Química Laboratorios S.A.C. Las características técnicas (MSDS) tanto del gasohol como del n-butanol son presentados en el **Anexo 1.1** y el **Anexo 1.2**, respectivamente.

Por otro lado, las normas de comercialización de biocombustibles del sector de hidrocarburos en el Perú (Ley 28054, DS 021-2007-EM y DS 024-2011-EM) [35, 36 y 37] prohíben la comercialización directa de la gasolina pura. Por este motivo, se optó por destilar el gasohol comercial de 90 octanos proveniente de un determinado punto de venta de combustible. Para esto, se preparó un protocolo de destilación para el gasohol, más adelante se encontrará mejor detallado.

El proceso de destilación del gasohol consistió en la separación total del etanol anhidrido (7,8% vol.) de la gasolina pura. Posteriormente, para comprobar la calidad de la destilación, se realizaron pruebas físico-químicas a los productos separados (gasolina y etanol anhidrido), la cuales son mostradas en el **Anexo 2.1** y **Anexo 2.2**.

Finalmente, debido a políticas de la universidad, se procedió a elaborar un protocolo de seguridad, debidamente avalado, para que se permita la entrada de dicha gasolina pura a las instalaciones del Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú, ver **Anexo 3.0**.

3.2. Protocolo de destilación del Gasohol 90 a escala real.

En la **Figura 3.1**, se muestran los recipientes que se usaron para transportar el gasohol 90 y el agua desionizada, cabe recalcar que se usaron 4 envases de 5 galones para cada sustancia. La gasolina se compró directamente de una gasolinera REPSOL y el agua desionizada a la empresa INDERAL S.A.



Figura 3. 1 – Envases de transporte.

1 – Galonera de gasolina; 2 – Galonera de agua desionizada, 3 – Etiqueta de calidad del agua desionizada.

A continuación, en la **Figura 3.2**, se puede observar los principales instrumentos e insumos que se utilizaron para la realización de esta destilación.



Figura 3. 2 – Instrumentos usados para la destilación del Gasohol 90.

1 – Papel filtro rápido; 2 – Embudo metálico con malla, 3 – Galonera de agua desionizada, 4 – Rastrillo; 5 – Galonera de Gasohol 90 Plus, 6 – Yoduro de sodio.

En la **Figura 3.3**, podemos observar el tanque que se usó para destilar la gasolina. Este es un tanque cilíndrico con una terminación cónica para lograr mejor el corte o decantación con capacidad de 45 galones, posee una válvula globo para poder regular el flujo al momento de filtrar, una manguera transparente para poder observar el cambio de fases y una tapa a presión. Todo el tanque es de hierro fundido, ya que solo se usaría una vez debido a que todo el proceso se realizaría en un Bach.



Figura 3. 3 – Tanque para destilación.

1 – Manguera transparente; 2 – Parte cilíndrica, 3 – Tapa a presión, 4 – Parte cónica;
5 – Válvula globo.

Comenzando con el protocolo de ensayo, en primer lugar, se vertieron los 20 galones de gasohol y, posteriormente, los 20 galones de agua desionizada. Esto se hace en este orden, ya que el agua desionizada tiene mayor densidad por lo tanto tendrá que pasar a través del gasohol y en esta transición el agua atraparé el etanol de la gasolina debido a que este alcohol es altamente higroscópico. Sin embargo, esto no es suficiente por lo que se tuvo que mover la mezcla aproximadamente unos 30 minutos; estos pasos se pueden observar en la **Figura 3.4**. Luego, se colocó la tapa y se dejó reposar unos 2 días, ya que así logrará tener una separación de fases bien definidas.

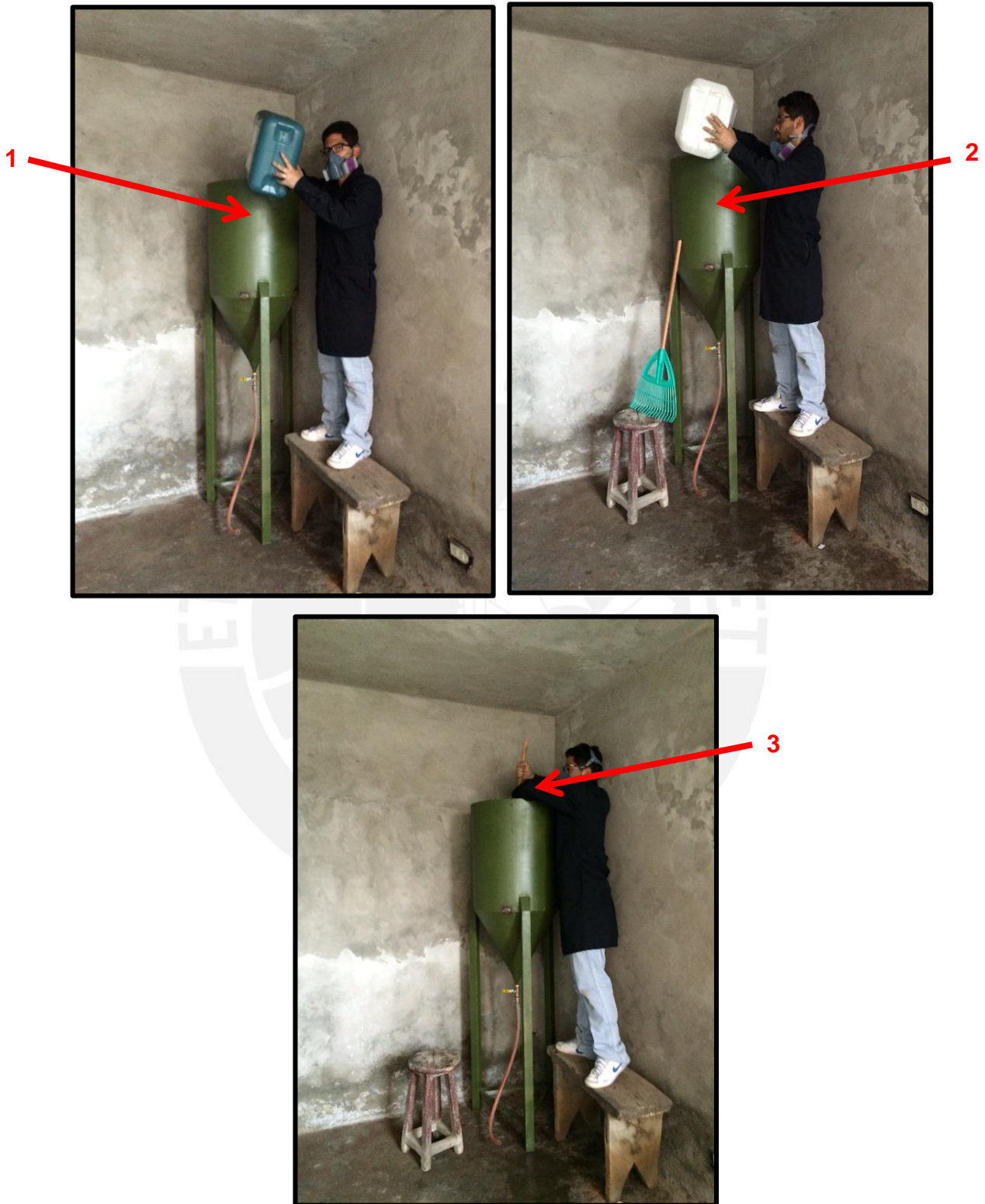


Figura 3. 4 – Secuencia de destilación.

1 – Vertido del Gasohol 90; 2 – Vertido del agua desionizada, 3 – mezclado.

Después de dos días, se prosiguió con la destilación, para esto se colocaron las galoneras blancas, se abrió la válvula globo y se comenzó a verter todo el agua desionizada dentro estas galoneras hasta que a través de la manguera transparente se logró ver el cambio de fase es decir un color rosado característico de la gasolina, cabe resaltar que esta agua desionizada posee un olor a alcohol debido a que esta absorbió todo el etanol de la gasolina; todo esto se logró, ya que por densidades el agua desionizada tiende a irse al fondo del tanque. Luego, en un vaso transparente se comenzó a verter un poco de gasolina y se notaba que esta contenía pequeñas burbujas de agua, por este motivo se comenzó a golpear el tanque a los lados para que las partículas de agua se agrupen y puedan ser expulsadas. Inmediatamente, se vuelve a seguir retirando mínimas muestras de gasolina en un vaso transparente hasta tener una cantidad mínima de agua dentro de la gasolina.

A continuación, dentro de un embudo metálico con malla, se colocó un papel filtro lento alrededor y, luego, se colocó un 1kg de yoduro de sodio para cada, 5 galones de gasolina, aproximadamente, ver **Figura 3.5**. Este yoduro de sodio tiene la función de absorber toda el agua que ha podido quedar en la gasolina. De esta forma, se llenan los 4 recipientes de 5 galones. Posteriormente, se extrajo una muestra para ser llevada al laboratorio donde se realizaron algunas pruebas de calidad, ver **Anexo 2.1** y **Anexo 2.2**. Por último, se dejaron reposar las galoneras, aproximadamente un día, para que la gasolina se asiente para luego ser transportadas a la Pontificia Universidad Católica del Perú.



Figura 3. 5 – Filtrado de la gasolina pura.

3.3. Preparación de la mezclas butanol y gasolina

Para realizar las mezclas de gasolina-butanol, se usaron diferentes instrumentos de medición, ver **Figura 3. 6**. Asimismo, con la ayuda de estos instrumentos, se vertió tanto la gasolina pura como el butanol en recipientes de 5 galones, ver **Figura 3. 7**.

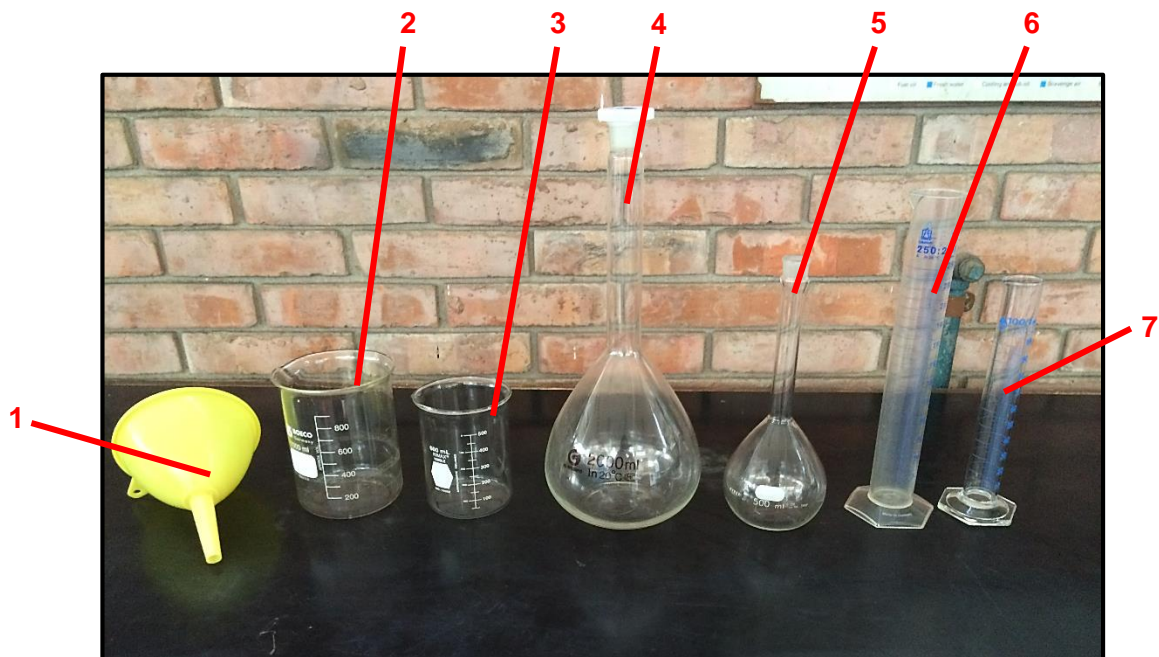


Figura 3. 6 – Instrumentos para preparación de las mezclas gasolina – butanol.

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

Al principio, este procedimiento se realizó teniendo como base 12 litros de gasolina pura; sin embargo, debido a que en los ensayos sobraba demasiado combustible, se optó por disminuirlo a 10 litros. El siguiente paso, luego de haber colocado la gasolina pura, era el de verter cierto volumen de butanol el cual dependía de la mezcla que se deseaba elaborar. La composición de cada una de las mezclas gasolina-butanol es presentada en la **Tabla 3. 1**.

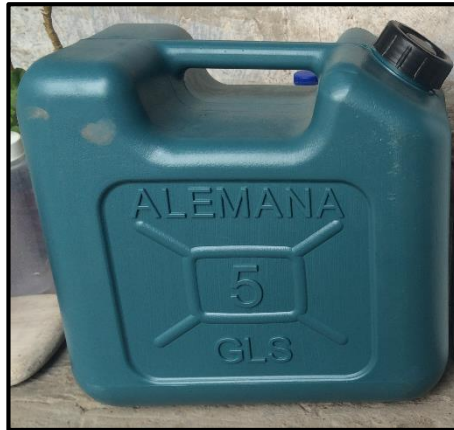


Figura 3. 7 – Recipiente de 5 galones para preparación de las mezclas.

Tabla 3. 1 – Composición de las mezclas gasolina-butanol utilizadas.

Mezcla	B0	B7.8	B10	B12.5	B15	B17.5	B20	Volumen total (l)	Volumen total (gl)
% Butanol	0	7,8	10	12,5	15	17,5	20		
% Gasolina	100	92,2	90	87,5	85	82,5	80		
Volumen de butanol	0,000	1,015	1,111	1,429	1,765	2,121	2,500	9,941	2,626
Volumen de gasolina pura	12,000	12,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	74,000	19,549
Volumen total	12,000	13,015	11,111	11,429	11,765	12,121	12,500	83,941	22,175

A continuación, se describen las composiciones volumétricas de las 8 mezclas obtenidas en la preparación y que posteriormente fueron utilizadas para los ensayos con el motor de prueba:

- **Gasolina pura:** 100% de gasolina.
- **E7,8 (gasohol comercial):** 7,8% de etanol y 92,2% etanol.
- **B7,8:** 7,8% de butanol y 92,2% de gasolina.
- **B10:** 10% de butanol y 90% de gasolina.
- **B12,5:** 12,5% de butanol y 87,5% de gasolina.
- **B15:** 15% de butanol y 85% de gasolina.
- **B17,5:** 17,5% de butanol y 82,5% de gasolina.
- **B20:** 20% de butanol y 80% de gasolina.

Después de tener las mezclas dentro de cada galonera, estas fueron etiquetadas y almacenadas dentro de un refrigerador (ver **Figura 3. 8**) con la finalidad de que no queden expuestas a fuentes de calor del laboratorio y, por ende, evitar pérdidas por evaporación del combustible.



Figura 3. 8 – Refrigerador para almacenamiento de las mezclas.

Finalmente, al momento que se usaron las galoneras que contenían las diferentes mezclas para cada ensayo, estas se retiraron del refrigerador y se montaron en una balanza (ver **Figura 3. 9**).



Figura 3. 9 – Galonera que contiene la mezcla B10 montada en la balanza antes de comenzar el ensayo.

3.4. Metodología de las máquinas, equipos e instrumentos a utilizar

En la **Figura 3. 10**, se muestra el banco de pruebas experimental utilizado durante los ensayos en el Laboratorio de Energía. Este banco de pruebas cuenta con un dinamómetro de marca Zöllner & Co Kiel con un tipo de frenado electromagnético refrigerado por agua, tiene 2 rangos de torque (0 – 150Nm y 0-300Nm) con una precisión de $\pm 1\text{Nm}$ y una velocidad máxima permitida de 10000 rpm.

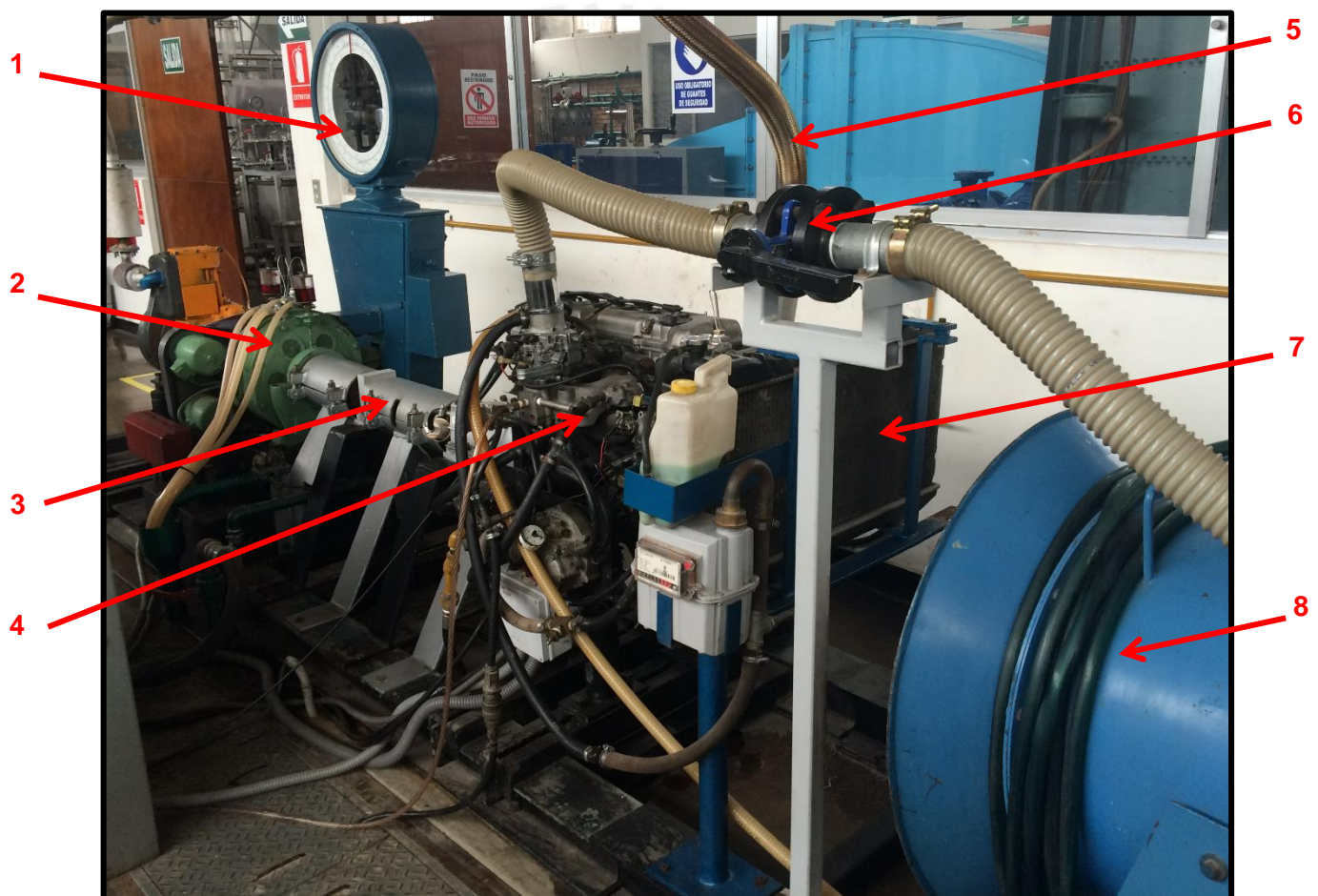


Figura 3. 10 – Banco de pruebas experimental utilizado para los ensayos.

**1 – Indicador analógico del dinamómetro; 2 – Freno del dinamómetro; 3 – Eje cardan;
4 – Motor Nissan GA15DS; 5 – Manguera metálica flexible para evacuación de los gases
de escape; 6 – Válvula para el control del flujo de admisión, 7 – Radiador del motor;
8 – Ventilador externo.**

En la **Tabla 3. 2**, se encuentran las principales características del motor de encendido por chispa que se usó en los ensayos de gasolina-butanol. Este es un motor Nissan, modelo GA15DS carburado de aplicación vehicular (ver **Figura 3. 11**).

A dicho motor, se le implementaron ciertos instrumentos de medición como un sensor de presión del aire en el colector de admisión (12) y 4 sensores de temperatura, el primero en la entrada del agua de refrigeración (3), el segundo en la salida del agua de refrigeración (9), el tercero en la salida de los gases de escape (1) y el último en el colector de admisión (5) para, junto a la presión, determinar la densidad del aire en el múltiple de admisión, es decir justo antes de que el motor realice la mezcla combustible-aire.

Tabla 3. 2 – Características del motor de encendido por chispa.

Marca/ Modelo	Nissan GA15DS
Número de cilindros	4 en línea
Relación de compresión	9,5:1
Orden de encendido	1-3-4-2
Potencia	70 kW @ 6000 rpm
Torque	126 N.m @ 3600 rpm
Cilindrada	1497 cc
Diámetro de cilindro	73,6 mm
Carrera del pistón	88 mm
Tipo de encendido	Distribuidor y bobina
Inyección de combustible	Carburador
Admisión de aire	Válvula mariposa

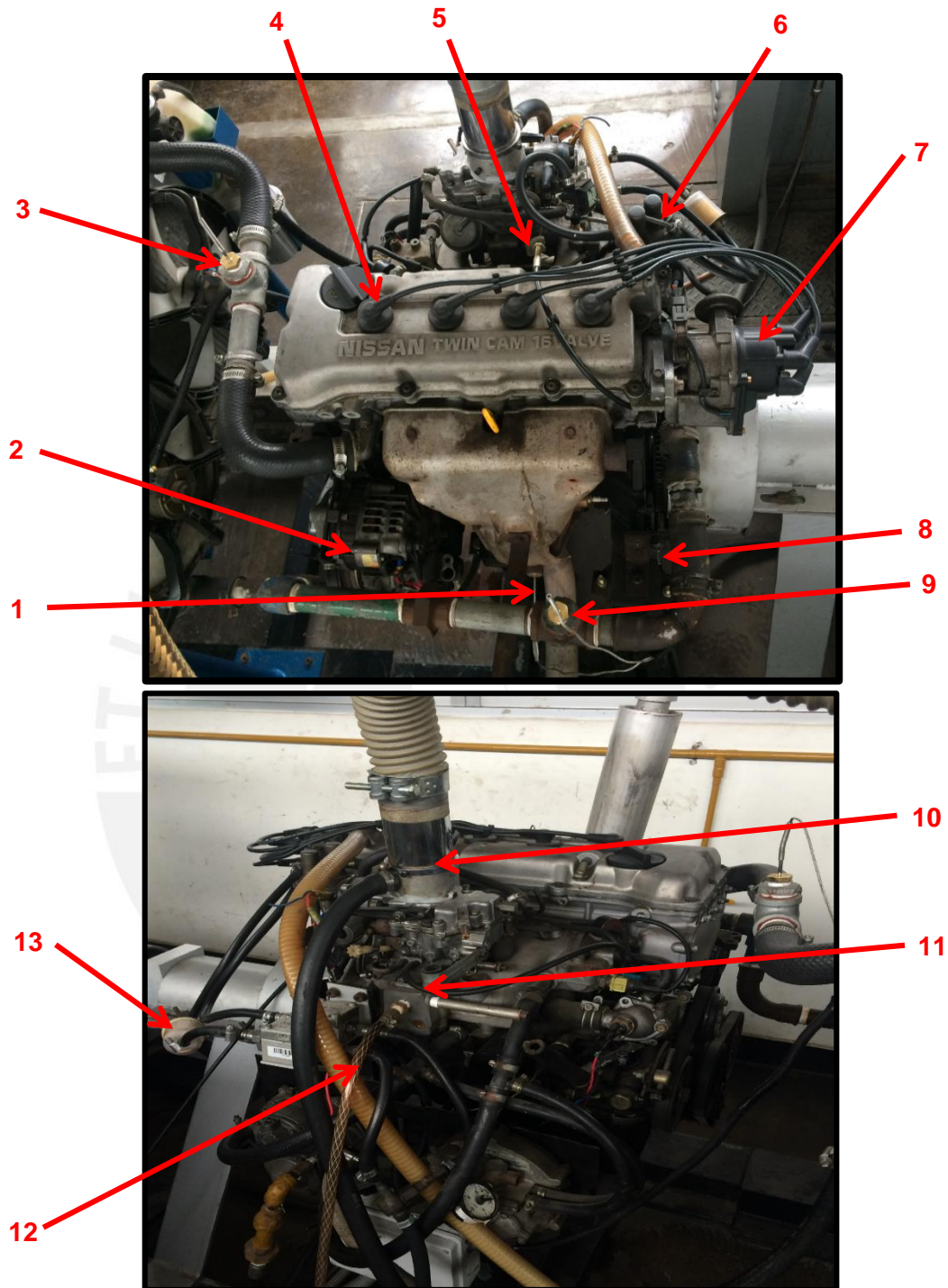


Figura 3. 11 – Motor Nissan GA15 instalado en el Laboratorio de

1 – Termocupla para medir los gases de escape; 2 – Alternador; 3 – Termocupla para medir la temperatura de entrada del refrigerante; 4 – Cables de las bujías; 5 – Sensor PT100 para medir la temperatura de admisión; 6 – Bomba de combustible, 7 – Distribuidor; 8 – Sensor magnético de velocidad; 9 – Termocupla para medir la temperatura de salida del refrigerante; 10 – Entrada de aire al carburador; 11 – Carburador; 12 – Sensor para medir la presión de admisión; 13 – Filtro.

Para la medición de la de las rpm del motor, se utilizó un sensor inductivo (8), el cual se encuentra en la carcasa de la volante, cuya precisión es de ± 1 rpm.

Por otra parte, en la **Figura 3. 12**, se muestra el registrador de datos (1), los sensores y visualizadores (2 a 7) que se usaron para medir ciertos parámetros. Como observamos, el componente (1) es el registrador de datos marca Yokogawa, en el cual van conectados los terminales de los instrumentos identificados del (2) al (7). Además del sensor PT100 que mide la temperatura de admisión y la termocupla tipo k que mide los gases de escape. Asimismo, el número (2), (6) y (7) son transmisores con visualizador, los dos primeros de marca PR y el (7) de marca Monarch. El (2) y (6) muestran las temperaturas de entrada y de salida del refrigerante, respectivamente, medidas por las termocuplas de tipo K, y el 7 muestra las rpm del motor medidas por un sensor magnético. El instrumento (3) es un sensor de presión diferencial marca Dwyer que mide la diferencia de presión del aire provocado por la placa orificio que se encuentra acoplada al tanque amortiguador de pulsaciones, el cual es necesario para hallar el consumo de masa de aire. El instrumento (4) es una fuente de voltaje necesaria para alimentar a los sensores de presión. Por último, el componente (5) es un sensor de presión manométrica marca Yokogawa que mide la presión de admisión.

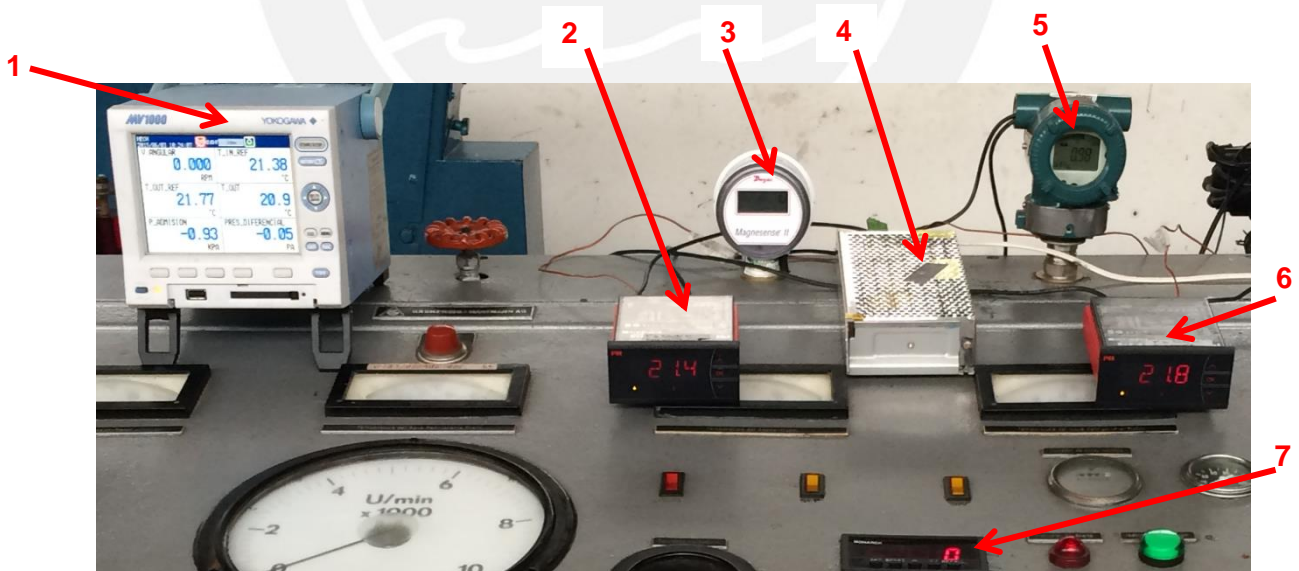


Figura 3. 12 – Conjunto de equipos electrónicos de medición.

1 – Registrador de datos; 2 – Transmisor con visualizador para temperatura de entrada del refrigerante, 3 – Sensor de presión diferencial con visualizador; 4 – Fuente de voltaje; 5 – Sensor de presión manométrica con visualizador; 6 – Transmisor con visualizador para la temperatura de salida del refrigerante, 7 – Transmisor con visualizador para rpm.

Por otra parte, para la medición del consumo de combustible se usó un sistema balanza–cronómetro (ver **Figura 3. 13**). Para esto, se colocaban las mezclas contenidas en los recipientes de 5 galones sobre la balanza electrónica marca Ohaus (precisión ± 5 gramos) y con ayuda del cronómetro se midió un intervalo de tiempo (aproximadamente 60 segundos) en que dicho consumo ocurría. La relación entre la masa y el tiempo nos originaba el consumo másico de combustible.



Figura 3. 13 – Equipos de medición para el consumo de combustible.

1 – Cronómetro; 2 – Balanza electrónica de 50 kg.

En la **Figura 3. 14**, se muestra la placa orificio acoplada al tanque, este conjunto se empleó para poder calcular el consumo de aire mediante la medición de la presión diferencial con el sensor de presión marca Dywer que se conectó en el tambor de la placa orificio mediante una manguera, además se necesitaron de ciertas características específicas de esta placa como el diámetro (50mm) y un coeficiente de pérdida de carga (0,6) y, además, la densidad de aire. También, se observa el higrómetro el cual fue colocado cerca de la toma de aire de la placa orificio para tener datos más precisos del aire de entrada. Con este instrumento, se mide la humedad relativa (precisión $\pm 1\%$) necesaria para hallar el consumo de masa de aire seco y, también, puede medir la temperatura ambiente (precisión $\pm 1^\circ\text{C}$); y más el medidor de presión atmosférica (precisión $\pm 0,1$ hPa), se puede calcular la densidad del aire.



Figura 3. 14 – Conjunto de equipos de medición del aire húmedo y seco admitido al motor.

- 1 – Tanque amortiguador de pulsaciones; 2 – Placa orificio; 3 – Instrumento de medición para la presión atmosférica; 4 – Higrómetro con termómetro.

La medición de las emisiones se llevó a cabo en el techo del Laboratorio de Energía, debido a la disposición en la que se encuentra instalada la tubería de escape del motor. Por esta razón, para poder registrar los datos de las emisiones se contó con la ayuda de una persona adicional que se encontraba en el techo y tuvo que colocar una sonda dentro de la chimenea que se conecta con el tubo de escape del motor. Esta persona aparte de portar su mameluco y botas de seguridad contaba con una mascarilla para evitar respirar los gases que se emanaban, unos protectores auditivos debido a que el ruido se propagaba hasta el techo y un guante térmico, ya que muchas veces la sonda se encontraba a altas temperaturas al momento de retirarla del tubo. Luego, se esperaba un 1 minuto aproximadamente para que el analizador de gases marca AVL ubicado en el primer piso, leyera los datos respectivos de CO, HC, CO₂, O₂ y factor lambda.

A continuación, en la **Figura 3. 15**, se mostrará el conjunto de aparatos y equipos usados para realizar estas mediciones en el escape y en la **Tabla 3. 3** se encuentran las principales características del analizador.



Figura 3. 15 – Sistema de medición de las emisiones.

1 – Escalera Metálica; 2 – Sonda para medir emisiones; 3 – Chimenea que se conecta con el tubo de escape; 4 – Analizador de gases AVL; 5 – Guante Térmico; 6 – Protector auditivo; 7 – Mascarilla.

Tabla 3. 3 – Características del analizador de gases.

Modelo	AVL DIGAS 4000	
Emisiones	Rango	Resolución
CO	0 – 10%	± 0,01%
CO ₂	0 – 20%	± 0,1%
HC	0 – 20000 ppm	± 1 ppm
O ₂	0 – 22%	± 0,01%
λ	0 – 9,999	± 0,001

Por último, la pistola estroboscópica de marca Snap-On, ver **Figura 3. 16**, fue utilizada para medir el ángulo de encendido y lo permitió fijar en 10°, debido a que es el ángulo que comúnmente se utiliza para la gasolina de 90 octanos.



Figura 3. 16 – Sistema de medición para fijar el ángulo de encendido.

1 – Pistola estroboscópica; 2 – Tenaza positiva; 3 – Tenaza negativa.

3.5. Protocolo de ensayo.

3.5.1. Registro de los parámetros medidos en el banco de pruebas del motor.

Anteriormente, se explicó el uso de los diferentes instrumentos y equipos que se utilizaron para medir ciertas variables. En la **Tabla 3. 4**, se presentan todos los parámetros que fueron hallados en cada en ensayo, ya que estos son iguales para cada mezcla.

Tabla 3. 4 – Datos medidos en los ensayos.

N°	Parámetros	Símbolo	Unidades
1	Ángulo de encendido antes del punto muerto superior	A.enc	°APMS
2	Regimen de giro	n	RPM
3	Porcentaje de carga	-	%
4	Torque neto observado	T _{obs}	N.m
5	Masa de combustible	m _{comb}	kg
6	Tiempo de consumo de combustible	t	s
7	Temperatura de entrada del refrigerante	T ^o _{e.ref}	°C
8	Temperatura de salida del refrigerante	T ^o _{s.ref}	°C
9	Temperatura de los gases de escape	T ^o _g	°C
10	Temperatura en el múltiple de admisión	T ^o _{adm}	°C
11	Temperatura ambiente	T ^o _{amb}	°C
12	Presión atmosférica	P _{atm}	kPa
13	Presión manométrica en el múltiple de admisión	P _{adm}	kPa
14	Presión diferencial del aire en la placa orificio	ΔP _{aire}	Pa
15	Humedad relativa	φ	%
16	Factor Lambda	λ	-
17	Hidrocarburos no quemados	HC	ppm
18	Monóxido de carbono	CO	(%Vol.)
19	Dióxido de carbono	CO ₂	(%Vol.)
20	Oxígeno	O ₂	(%Vol.)

3.6. Verificación del banco de pruebas.

En primer lugar, se prendió la bomba de agua que alimenta al freno del dinamómetro; para esto, se cerró la tubería de la alcantarilla girando toda la válvula de compuerta en sentido horario que se encuentra bajo suelo. Asimismo, se abrió la válvula globo que se encuentra debajo del tablero eléctrico, se prendió el variador de velocidad con la flecha que tiene el signo “+”, se esperó que la presión sea igual a 45 psi y se cerró la válvula, **Figura 3. 17**.

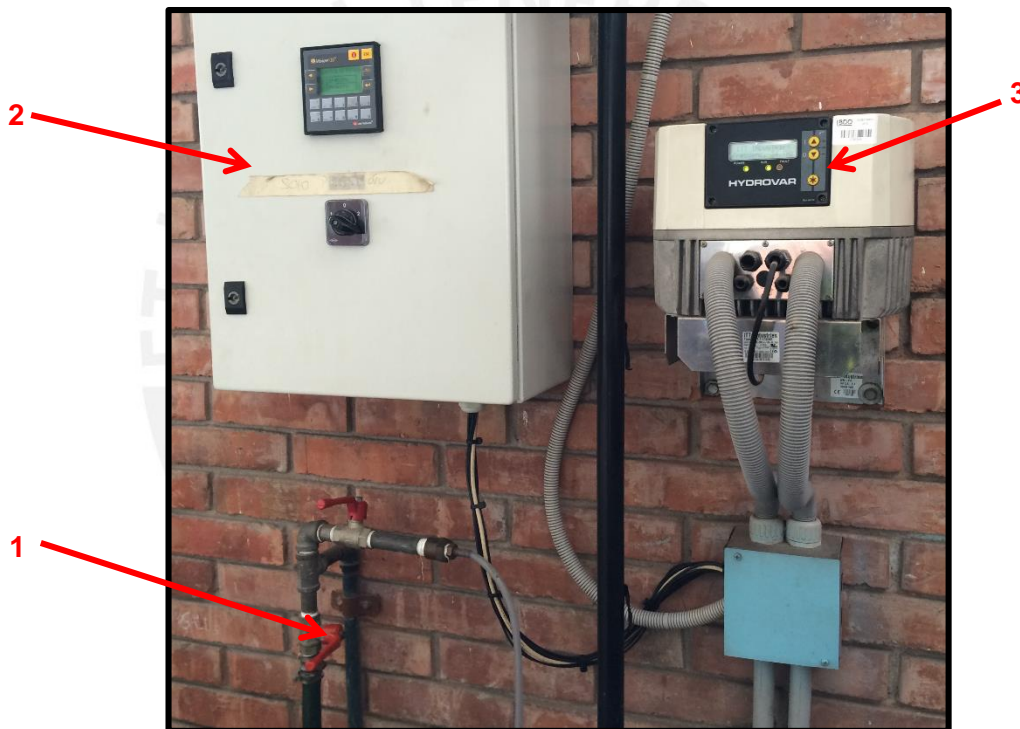


Figura 3. 17 – Control de la bomba de agua del sistema de refrigeración del dinamómetro.

1 – Válvula de globo; 2 – Tablero eléctrico; 3 – Variador de velocidad.

Luego, en la sala donde se encuentra el banco de pruebas, se abrió la válvula globo ubicada al costado del freno del dinamómetro y, a su vez, la válvula de compuerta que se encuentra encima del tablero de control del motor pero solo se le dio media vuelta; con esto, se verificó que haya flujo de agua para refrigerar el dinamómetro. También, se revisó que haya aceite en los depósitos del dinamómetro.

Después, en el motor, se verificó que el tanque de aceite se encontrara lleno, de no haber sido así, se procedería a llenarlo, se verificó que el nivel de refrigerante en el tanque de expansión sea el adecuado y se pasó verificar el ajuste de los pernos del eje cardan que une la volante del motor con el dinamómetro.

Lo siguiente fue subir las 2 llaves eléctricas, una energizó al ventilador externo y la otra al tablero de control del motor. A continuación, se prendió el tablero al girar la llave y se energizó la bomba de combustible girando su respectivo botón. Asimismo, se verificó que la palanca del acelerador y la perilla del freno estén al mínimo y se presionó el botón verde de arranque para que el motor comience a funcionar. El siguiente paso fue activar el freno y el modo de freno. Para una mejor comprensión del control del banco de pruebas, en la **Figura 3. 18** se muestra una vista general del tablero de control y se identifica cada uno de los componentes.

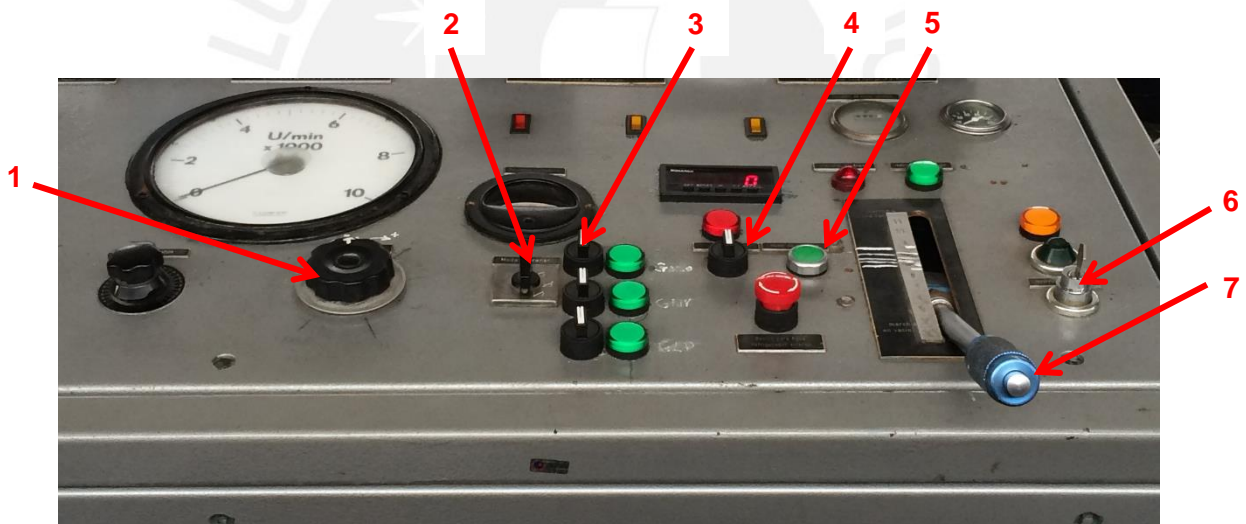


Figura 3. 18 – Tablero de control del motor.

- 1 – Perilla de excitación para aplicar el freno al motor;**
- 2 – Botón del modo de freno;**
- 3 – Botón de encendido de la bomba de combustible;**
- 4 – Botón de encendido del freno;**
- 5 – Botón de arranque del motor;**
- 6 – Llave para energizar el tablero de control;**
- 7 – Acelerador manual del motor.**

Finalmente, cuando el motor se encontraba girando en ralentí, se comprobó el ángulo de encendido con la pistola estroboscópica.

Una vez que se revisaron todos los detalles anteriores, se llevó a 2000 rpm al motor y se esperó a que este calentará, aproximadamente, hasta que la temperatura de entrada del refrigerante sea de 80°C. Al llegar a este punto, se comenzó a realizar los ensayos.

3.6.1. Procedimiento de ensayo a plena carga y carga parcial.

Se comenzaron los ensayos con la gasolina pura, posteriormente, se usó el gasohol (gasolina comercial). Luego, se prosiguió a usar las mezclas gasolina-butanol y se aumentó progresivamente la concentración de butanol (7,8%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%). De esta manera, se pudo reducir el número de veces que se cambió el filtro de gasolina, para evitar la contaminación del sistema de alimentación del carburante.

Para los ensayos a plena carga, se maniobró la palanca del acelerador hasta lograr ponerla en la posición que origina la máxima apertura de la válvula mariposa y, en simultáneo, se manipuló el freno para evitar que el motor se embale y, así, se llegó a la velocidad deseada con la máxima apertura, en este caso de 4500 rpm. Una vez fijada esta posición, obtuvimos el torque máximo para dicha velocidad. Luego, se usó la perilla de excitación, es decir, se fue aplicando el freno paulatinamente hasta obtener las siguientes velocidades requeridas. De esta manera, se hallaron los torques máximos para 3500 rpm y 2500 rpm.

Una vez que se obtuvieron los torques máximos, se calculó y evaluó los torques parciales en condiciones de 75%, 50% y 25% del valor máximo para las 3 velocidades. Los 9 torques parciales hallados con la gasolina pura sirvieron como referencia para las demás mezclas.

Como se mencionó anteriormente, se esperó a que el motor se estabilice en cada punto de medición en el que nos encontrábamos, lo cual debió tomar un tiempo aproximadamente de unos 5 minutos. A continuación, se usó el método gravimétrico para la medición del flujo de la masa de combustible consumida, para esto se usó la **Tabla 3. 5** para anotar los datos necesarios.

Tabla 3. 5 – Parámetros de la medición gravimétrica.

	Medición 1	Medición 2
PORCENTAJE DE CARGA (%)		
TORQUE NETO (N.m)		
PESO INICIAL (kg)		
PESO FINAL (kg)		
TIEMPO (s)		

Durante el intervalo de tiempo en el que duró la medición de la masa de gasolina, aproximadamente de 60 segundos, con ayuda del registrador de datos analógicos se registraron las siguientes variables: temperatura de entrada y salida del refrigerante, presión y temperatura de admisión, temperatura de los gases de escape, variación de presión del aire de admisión en la placa orificio y el régimen de giro. A continuación, en la **Tabla 3. 6**, se muestran los parámetros registrados en este procedimiento.

Tabla 3. 6 – Parámetros grabados mediante el registrador de datos.

	Medición 1	Medición 2
HORA INICIO GRABACION (hh:mm:ss)		
HORA FINAL GRABACIÓN (hh:mm:ss)		
RÉGIMEN DE GIRO (rpm)		
PRESIÓN DIFERENCIAL EN LA PLACA ORIFICIO (Pa)		
PRESIÓN DE ADMISIÓN (kPa)		
TEMPERATURA DE ADMISIÓN (°C)		
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL REFRIGERANTE (°C)		
TEMPERATURA DE SALIDA DEL REFRIGERANTE (°C)		
TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE (°C)		

Continuando con el protocolo, e inmediatamente después de haber presionado el botón de grabar del registrador de datos, se anotaron los valores que nos proporcionó el higrómetro, es decir, tanto el valor de la humedad relativa como el de la temperatura ambiente, ver **Tabla 3. 7**.

Tabla 3. 7 – Parámetros ambientales

	Medición 1	Medición 2
TEMPERATURA AMBIENTE (°C)		
HUMEDAD RELATIVA (%)		

En paralelo a las anteriores actividades, y para obtener una correcta medición de los gases de escape de CO, CO₂, HC, O₂ y el factor lambda, ver **Tabla 3. 8**, se introdujo la sonda de gases a unos 30 cm dentro de la chimenea que conecta al tubo de escape del motor, y se esperó alrededor de 1 minuto para que el analizador de gases se estabilice y, de esta forma, se registraron los datos de la pantalla del equipo.

Una vez completada la matriz para determinado un combustible, se realizó el cambio de recipiente para ensayar otro combustible.

Tabla 3. 8 – Parámetros relacionados a las emisiones

	Medición 1	Medición 2
FACTOR LAMBDA		
CO (% vol.)		
CO ₂ (% vol.)		
HC(ppm)		
O ₂ (% vol.)		

Tener en cuenta que al haber transcurrido, aproximadamente, unos 30 segundos después de que se detuvo la toma de datos del registrador digital, se volvió a grabar por segunda vez los datos del mismo punto de funcionamiento. Además, se volvieron a realizar todos los procedimientos anteriores para la medición de las mismas variables, ya que se optó por tener dos medidas para todos los parámetros en el mismo punto.

Por consiguiente, para cada punto de la matriz se hicieron 2 mediciones, la matriz contiene 12 puntos, y fueron ensayados 8 combustibles diferentes, por lo que se obtuvo un total de 192 mediciones, considerando además que fueron 18 variables registradas por medición, ya que el porcentaje de carga y el ángulo de encendido eran variables constantes, lo que resultó un total de 3456 datos registrados; lo cual permitió verificar la repetitividad de los resultados obtenidos.

3.7. Expresiones para el cálculo.

3.7.1. Fórmulas para el cálculo de parámetros

A continuación, se mostraran las expresiones que se utilizaron para calcular todos los parámetros requeridos:

Potencia efectiva observada

La potencia efectiva depende tanto del torque neto como del régimen de giro del motor, está dada por la siguiente expresión:

$$P_{e.obs} = T_{obs} * 2\pi * \frac{n}{60000} \quad (1)$$

donde:

$P_{e.obs}$ = potencia efectiva observada [kW].

T_{obs} = torque neto observado [N.m].

n = régimen de giro [rpm].

Potencia efectiva corregida según la norma NTP 383.066.

Es la potencia efectiva observada que se corrige con a las condiciones atmosféricas, para mayor información revisar la Norma Técnica Peruana NTP 383.066 1989 [38]. A continuación, se mostraran una serie de expresiones para poder calcularla:

$$P_{e.co} = P_{e.obs} * k \quad (2)$$

donde:

$P_{e.co}$ = potencia efectiva corregida [kW].

$P_{e.obs}$ = potencia efectiva observada [kW].

k = factor de corrección

- **Factor de corrección**

El factor de corrección, para un motor de encendido por chispa de aspiración natural como para los sobrealimentados, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k = \left(\frac{99}{P_{a.s}}\right)^{1,2} * \left(\frac{273 + T^{\circ}_{amb}}{298}\right)^{0,6} \quad (3)$$

donde:

k = factor de corrección.

$P_{a.s}$ = presión de aire seco [kPa].

T°_{amb} = temperatura ambiente [C°].

- **Presión del aire seco**

La presión de aire seco es la presión barométrica menos la presión de vapor de agua y se calcula por la ecuación siguiente:

$$P_{a.s} = P_{atm} - P_V \quad (4)$$

donde:

$P_{a.s}$ = presión de aire seco [kPa].

P_{atm} = presión atmosférica [kPa].

P_V = presión parcial de vapor de aire [kPa].

- **Humedad relativa**

Es el cociente de la presión parcial del vapor en la mezcla, entre la presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla, en nuestro caso, a la temperatura ambiente:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_S} \quad (5)$$

donde:

φ = humedad relativa

P_V = presión parcial de vapor del aire [kPa].

P_S = presión de saturación de vapor del aire [kPa].

Torque neto corregido según la norma NTP 383.066.

Se corrige de la misma forma que la potencia efectiva corregida [38], mediante el factor “k”, ver la expresión siguiente:

$$T_{co} = T * k \quad (6)$$

donde:

T_{co} = torque neto corregido [N.m].

T_{obs} = torque neto observado [N.m].

k = factor de corrección.

Consumo másico de combustible

Para el cálculo de este parámetro, se utilizó la forma gravimétrica mediante la resta de una masa inicial y otra final de combustible en un periodo de tiempo determinado:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m_f - m_i}{t} * 3600 \quad (7)$$

donde:

\dot{m}_{comb} = consumo másico de combustible [kg/h].

m_f = masa final [kg].

m_i = masa inicial [kg].

t = intervalo de tiempo de consumo másico de combustible [s].

Consumo específico de combustible corregido.

Este es un parámetro que nos indica el combustible consumido por unidad de tiempo referido a la potencia efectiva corregida. Para nuestro caso, utilizamos los valores de la **Tabla 1.1** para hallar el poder calorífico inferior de la gasolina y del butanol, así como para obtener sus respectivas densidades, ver la siguiente expresión:

$$cec = \frac{\dot{m}_{comb}}{P_{e.co}} * 1000 = \frac{\dot{m}_{gasolina} + \left(\frac{PCI_{butanol}}{PCI_{gasolina}}\right) * \dot{m}_{butanol}}{P_{e.co}} * 1000 \quad (8)$$

Para hallar las masas de gasolina pura y butanol:

$$\frac{\dot{m}_{butanol}}{\dot{m}_{gasolina}} = \frac{\rho_{butanol}}{\rho_{gasolina}} * \frac{\dot{V}_{butanol}}{\dot{V}_{gasolina}} \quad (9)$$

$$\dot{V}_{comb} = \dot{V}_{gasolina} + \dot{V}_{butanol} \quad (10)$$

Ecuación (10) entre $\dot{V}_{gasolina}$:

$$\frac{\dot{V}_{comb}}{\dot{V}_{gasolina}} = \frac{\dot{V}_{gasolina}}{\dot{V}_{gasolina}} + \frac{\dot{V}_{butanol}}{\dot{V}_{gasolina}} \rightarrow \frac{\dot{V}_{butanol}}{\dot{V}_{gasolina}} = \frac{\dot{V}_{comb}}{\dot{V}_{gasolina}} - 1 \quad (11)$$

La inversa del porcentaje de gasolina en la mezcla:

$$\frac{\dot{V}_{comb}}{\dot{V}_{gasolina}} \quad (12)$$

donde:

c_{ec} = consumo específico de combustible corregido [g/kW.h].

\dot{m}_{comb} = consumo másico de combustible [kg/h].

$\dot{m}_{gasolina}$ = consumo másico de gasolina [kg/h].

$\dot{m}_{butanol}$ = consumo másico de butanol [kg/h].

$PCI_{gasolina}$ = poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg].

$PCI_{butanol}$ = poder calorífico inferior del butanol [kJ/kg].

$P_{e.co}$ = potencia efectiva corregida [kW].

\dot{V}_{comb} = consumo volumétrico de combustible [m³/h].

$\dot{V}_{gasolina}$ = consumo volumétrico de gasolina [m³/h].

$\dot{V}_{butanol}$ = consumo volumétrico de butanol [m³/h].

$\rho_{gasolina}$ = densidad de la gasolina [kg/m³].

$\rho_{butanol}$ = densidad del butanol [kg/m³].

Presión media efectiva

Es la presión que durante una carrera produce un trabajo igual al trabajo efectivo respecto a la cilindrada del motor, ver la siguiente expresión:

$$p_{me} = \frac{W_e}{V_T} = \frac{P_{e.co}}{i * \frac{n}{60} * \frac{V_T}{10^6} * 100} \quad (13)$$

donde:

p_{me} = presión media efectiva [bar].

W_e = trabajo efectivo [kJ].

V_T = cilindra del motor [1497 cm³].

$P_{e.co}$ = potencia efectiva corregida [kW].

n = régimen de giro [rpm].

i = número de ciclos por vuelta [motor de 4 tiempos, $i = 0.5$ ciclos/revoluciones].

Flujo másico de aire húmedo

Este parámetro representa la masa admitida de aire húmedo por unidad de tiempo, para llegar a la siguiente expresión se tiene que usar, a su vez, expresiones parales:

$$\dot{m}_{a.h} = V_{aire} * \left(\frac{\pi * D_p^2}{4} \right) * \rho_{aire} * 3600 \quad (14)$$

donde:

$\dot{m}_{a.h}$ = consumo masico de aire húmedo [kg/h].

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

D_p = diametro de la placa orificio [0,05 m].

ρ_{aire} = densidad del aire [kg/m³].

- **Densidad del aire**

$$\rho_{aire} = \frac{P_{atm}}{R * (T_{amb} + 273)} \quad (15)$$

donde:

ρ_{aire} = densidad del aire [kg/m³].

P_{atm} = presión atmosférica [kPa].

T_{amb} = temperatura ambiente [C°].

R = constante del aire [0.287 kJ/kg.].

- **Velocidad del aire**

$$v_{aire} = C_d * \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{aire}}{\rho_{aire}}} \quad (16)$$

donde:

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

C_d = coeficiente de descarga de la placa orificio [0.6].

ΔP_{aire} = Presión diferencial del aire de admisión en la placa orificio [Pa].

ρ_{aire} = densidad del aire a las condiciones de laboratorio [kg/m³].

Flujo másico de aire seco

Este parámetro representa la masa admitida de aire seco por unidad de tiempo, ver siguiente expresión:

$$\dot{m}_{a.s} = \frac{\dot{m}_{a.h}}{1 + X} \quad (17)$$

donde:

$\dot{m}_{a.s}$ = consumo másico de aire seco [kg/h].

$\dot{m}_{a.h}$ = consumo másico de aire húmedo [kg/h].

X = humedad específica.

- **Humedad absoluta o humedad específica**

Se define como el cociente entre la masa de vapor y la masa de gas seco:

$$X = \frac{0.622 * P_V}{P_{atm} - P_V} \quad (18)$$

donde:

X = humedad específica.

P_V = presión parcial de vapor del aire [kPa].

P_{atm} = presión atmosférica [kPa].

Relación aire seco/combustible

$$R_{a.s/comb} = \frac{\dot{m}_{a.s}}{\dot{m}_{comb}} \quad (19)$$

donde:

$R_{a.s/comb}$ = relación de flujo másico aire seco entre combustible.

$\dot{m}_{a.s}$ = consumo másico de aire seco [kg/h].

\dot{m}_{comb} = consumo másico de combustible [kg/h].

Eficiencia volumétrica

Indica la eficiencia en el llenado del cilindro, depende del flujo másico real de aire seco admitido y el flujo de masa de aire a unas condiciones de referencia (temperatura y presión de admisión en el colector de admisión). Se usó la siguiente:

$$\eta_V = \frac{\dot{m}_{a.s}}{\dot{m}_{aire.ref}} * 100 \quad (20)$$

donde:

η_V = Rendimiento volumétrico [%].

$\dot{m}_{a.s}$ = consumo másico de aire seco [kg/h].

$\dot{m}_{aire.ref}$ = consumo másico de aire de referencia [kg/h].

- **Densidad de aire de referencia**

$$\rho_{aire.ref} = \frac{P_{atm} + P_{adm}}{R * (T_{adm} + 273)} \quad (21)$$

donde:

$\rho_{aire.ref}$ = densidad del aire de referencia [kg/m³].

P_{adm} = presión manométrica en el múltiple admisión [kPa].

P_{atm} = presión atmosférica [kPa].

T_{adm} = temperatura en el múltiple de admisión [C°].

R = constante del aire (0.287 kJ/kg).

- **Consumo másico de aire de referencia**

El consumo másico de referencia por unidad de tiempo es el que está asociado al volumen total desplazado por el motor en unas condiciones de referencia (temperatura y presión de admisión en el colector de admisión). Ver la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{aire.ref} = \rho_{aire.ref} * V_T * n * i * 3600 \quad (22)$$

donde:

$\dot{m}_{aire.ref}$ = consumo másico del aire de referencia [kg/h].

$\rho_{aire.ref}$ = densidad del aire de referencia [kg/m³].

V_T = cilindra del motor (1497 cm³).

n = régimen de giro [rps].

i = número de ciclos por revolución (motor de 4 tiempos, $i = 0,5$).

Eficiencia efectiva

La eficiencia efectiva es la relación de la potencia efectiva corregida entre la energía suministrada por el combustible. Tener en cuenta que para hallar los flujos másicos de la gasolina como del butanol se usaron las mis expresiones que en el consumo específico de combustible (ver ecuaciones del 9 al 12):

$$\eta_e = \frac{P_{e.co}}{\dot{m}_{gasolina} * PCI_{gasolina} + \dot{m}_{butanol} * PCI_{butanol}} * 100 \quad (23)$$

donde:

η_e = rendimiento efectivo [%].

$P_{e.co}$ = potencia efectiva corregida [kW].

\dot{m}_{comb} = consumo másico de combustible [kg/h].

$\dot{m}_{gasolina}$ = consumo másico de gasolina [kg/h].

$\dot{m}_{butanol}$ = consumo másico de butanol [kg/h].

$PCI_{gasolina}$ = poder calorífico inferior de la gasolina [kJ/kg].

$PCI_{butanol}$ = poder calorífico inferior del butanol [kJ/kg].

3.7.2. Fórmulas estadísticas para la correcta presentación de los parámetros y el cálculo de los errores de medición (incertidumbres).

A continuación, se mostraran diferentes fórmulas estadísticas usadas para hallar las incertidumbres de las mediciones y de los parámetros calculados tanto para las medidas directas como las indirectas.

Medidas directas

Para las medidas directas, es decir, para las que no dependen de otros valores se utilizan las siguientes expresiones:

- **Incertidumbre lectura o precisión**

Lo estimaremos, para un equipo de medición digital, como la resolución especificada por el fabricante. En cambio, para un instrumento analógico, se calculará como la mitad de la menor división de la escala como se muestra en la siguiente expresión [39]:

$$\sigma_L = \frac{div_{me}}{2} \quad (24)$$

Donde:

σ_L = incertidumbre de precisión (misma unidad del dato asociado).

div_{me} = división menor de la escala del instrumento (misma unidad del dato asociado).

- **Incertidumbre aleatoria**

Es la distancia del valor real a la que estará más probablemente un nuevo dato. El factor “t” de student es un nivel de confianza, en nuestro caso, de 95% y solo se aplicó si tenemos un total de muestras menor a 10 [39]:

$$\sigma_A = t_{N-1} * \frac{\sigma_{N-1}}{\sqrt{N}} \quad (25)$$

donde:

σ_A = incertidumbre aleatoria (misma unidad del dato asociado).

t_{N-1} = factor de corrección "t" de student.

σ_{N-1} = desviación estándar de una muestra (misma unidad del dato asociado).

N = número de muestras.

- **Incertidumbre estándar o error cuadrático medio**

Se adopta como estimación del error de la media, al esperar que al tomar más medidas la media de estas sea más precisa, ver la siguiente expresión [39]:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{N-1}}{\sqrt{N}} \quad (26)$$

donde:

σ_x = incertidumbre estándar (misma unidad del dato asociado).

σ_{N-1} = desviación estándar de una muestra (misma unidad del dato asociado).

N = número de muestras.

- **Desviación estándar de una muestra**

En el laboratorio solo extraemos muestras, por lo que no usamos la desviación estándar de una población. La desviación estándar de una medición es la incertidumbre debido a las fluctuaciones y está definida como medida del grado de dispersión de los datos con respecto a la media aritmética [39]:

$$\sigma_{N-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (27)$$

donde:

σ_{N-1} = desviación estándar de una muestra (misma unidad del dato asociado).

x_i = dato i (misma unidad del dato asociado).

\bar{x} = media (misma unidad del dato asociado).

N = número de muestras.

- **Incertidumbre total**

Para calcular la incertidumbre total en una medición, se sumara en la incertidumbre de precisión y la aleatoria en cuadratura, es decir [39]:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_A^2} \quad (28)$$

donde:

σ_T = incertidumbre total (misma unidad del dato asociado).

σ_L = incertidumbre de lectura (misma unidad del dato asociado).

σ_A = incertidumbre aleatoria (misma unidad del dato asociado).

Medidas indirectas

Para las medidas indirectas, es decir, para las que dependen de otras variables debido a fórmulas matemáticas, se utilizan las siguientes expresiones [39]:

Si el valor de y depende de N variables x_1, x_2, \dots, x_N , con incertidumbres $\sigma_{T_1}, \sigma_{T_2}, \dots, \sigma_{T_N}$, de la forma

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (29)$$

Entonces, la incertidumbre en y se determina por:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{T_{x_1}}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{T_{x_2}}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_N}\right)^2 \sigma_{T_{x_N}}^2} \quad (30)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{T_{x_i}}^2}$$

donde:

σ_y = incertidumbre general (misma unidad del dato asociado).

$\sigma_{T_{x_1}}, \sigma_{T_{x_2}}, \dots, \sigma_{T_{x_N}}$ = incertidumbre total de cada variable involucrada.

$\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial y}{\partial x_N}$ = derivada parcial de "y" respecto a las variables x_1, x_2 o x_N .

N = número de variables involucradas.

Herramientas estadísticas adicionales

- **Media ponderada**

Se usa generalmente para 3 casos, el primer caso es cuando se tienen varias medidas de un mismo parámetro y cada medición tiene su propia incertidumbre; el segundo caso es cuando se usan diferentes instrumentos y/o métodos de medida; y, por último, para errores aleatorios. Para estos tres casos se usarán las siguientes expresiones [39]:

$$\bar{Y} = \frac{\frac{X_1}{(\sigma_{T_{X_1}})^2} + \frac{X_2}{(\sigma_{T_{X_2}})^2}}{\frac{1}{(\sigma_{T_{X_1}})^2} + \frac{1}{(\sigma_{T_{X_2}})^2}} \quad (31)$$

$$\sigma_{\bar{Y}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{(\sigma_{T_{X_1}})^2} + \frac{1}{(\sigma_{T_{X_2}})^2}}} \quad (32)$$

donde:

\bar{Y} = media ponderada de las medidas (misma unidad del dato asociado).

$\sigma_{\bar{Y}}$ = media ponderada de las incertidumbres (misma unidad del dato asociado).

$\sigma_{T_{X_1}}, \sigma_{T_{X_2}}$ = incertidumbre total de cada medida.

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se pasará a analizar los gráficos de las variables medidas y calculadas más significativas. Cabe resaltar que todas las tablas que contienen los valores de las variables medidas y calculadas para cada combustible, se encuentran en el **Anexo 4.0** Además, debido a las restricciones de espacio, no se pudieron colocar todos los gráficos en este capítulo. Por esta razón, los gráficos relacionados al régimen de giro de 3440 rpm, se colocaron en el **Anexo 5.0** También, un punto importante para el entendimiento del análisis de todos los gráficos es que cuando se refiera a un determinado porcentaje de carga (25%,50%,75% o 100%) se hace alusión directa a la presión media efectiva.

Por otra parte, también, cabe mencionar que para las gráficas de los resultados de los parámetros descritos más adelante, se han utilizado líneas para unir los valores de la gasolina pura, el gasohol y el B7,8 debido a que nos facilitan el poder encontrar mejores tendencias entre estos mismos y con respecto a los otros combustibles.

En la **Figura 4. 1**, se observa la potencia efectiva corregida versus el régimen de giro al 100% de carga. Se nota que tanto para el gasohol, como para la mezcla de B10 y la B17,5, la potencia aumenta conforme aumenta el rpm. El mayor aumento de la potencia entre las velocidades de 3440 y 4460 rpm se da para la mezcla B10 y es de 1.7%. Sin embargo, este efecto es contrario para casi todos los demás combustibles, ya que se nota una ligera disminución de la potencia al aumentar el valor de la velocidad de 3440 rpm a 4420 rpm. Esto se observa con mayor claridad para la mezcla B15, ya que posee la mayor disminución de potencia de un 4,3% para este rango de velocidad.

Si comparamos las potencias obtenidas a plena carga de la gasolina pura, el gasohol y la mezcla B7,8 , observamos que la primera supera tanto al gasohol como al B7,8 hasta

llegar a 3440 RPM. Luego, la potencia obtenida con la gasolina disminuye y se vuelve muy parecida a la de la B7,8, y ambas desarrollan menor potencia que el gasohol.

Por otro lado, al realizar una comparación solo entre las mezclas de gasolina-butanol, notamos que una mayor potencia fue generada para puntos de media (3440 rpm) y alta velocidad (4420rpm) en la mezcla B10; en cambio, para la mezcla B20 se obtuvo menor potencia a lo largo de la curva.

La mayor potencia generada fue de 22,7 kW para la mezcla B10 a 4420 rpm y la menor potencia generada fue de 19,56 kW para la mezcla de B7,8 a 2460 rpm. No obstante, la diferencia de potencia más significativa entre dos combustibles se dio entre el B10 y el B15, la cual fue de aproximadamente 5,9% a 4420 rpm, siendo superior la mezcla B10.

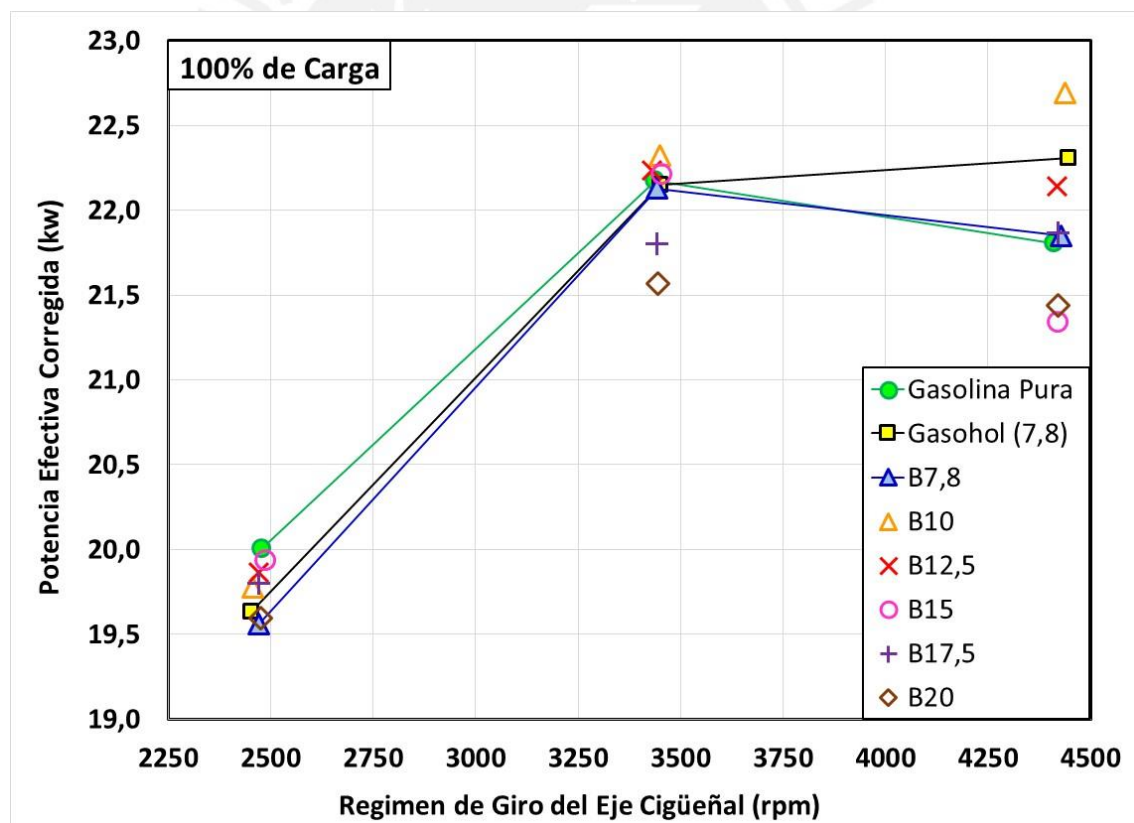


Figura 4. 1 – Potencia Efectiva Corregida versus rpm a 100% de Carga para diferentes mezclas.

En las Figuras 4. 2, 4. 3 y A.5. 1, podemos observar los gráficos de consumo másico de combustible versus la presión media efectiva. Evidentemente, los consumos aumentan a mayor presión media efectiva, ya que mayor será el requerimiento de combustible. Este efecto ocurre de igual manera cuando se incrementa la velocidad del motor.

Observamos que, en los 3 gráficos, la gasolina pura tiene un menor consumo de combustible que el gasohol y el B7,8 para casi todos los puntos de carga. Este resultado era de esperarse debido al mayor poder calorífico de la gasolina pura. Asimismo, hay que resaltar que los valores de consumo de combustible en las cargas parciales (2 y 3 bar) para cada velocidad es muy parecida entre la gasolina pura y las mezclas E7,8 y B7,8. Por otra parte, a 2460 rpm (Figura 4. 3), se observa que para una carga de 5 bar, aproximadamente, existe un significativo aumento del consumo del combustible con B7,8, en comparación al consumo con gasolina pura. Este aumento corresponde a 11.7%.

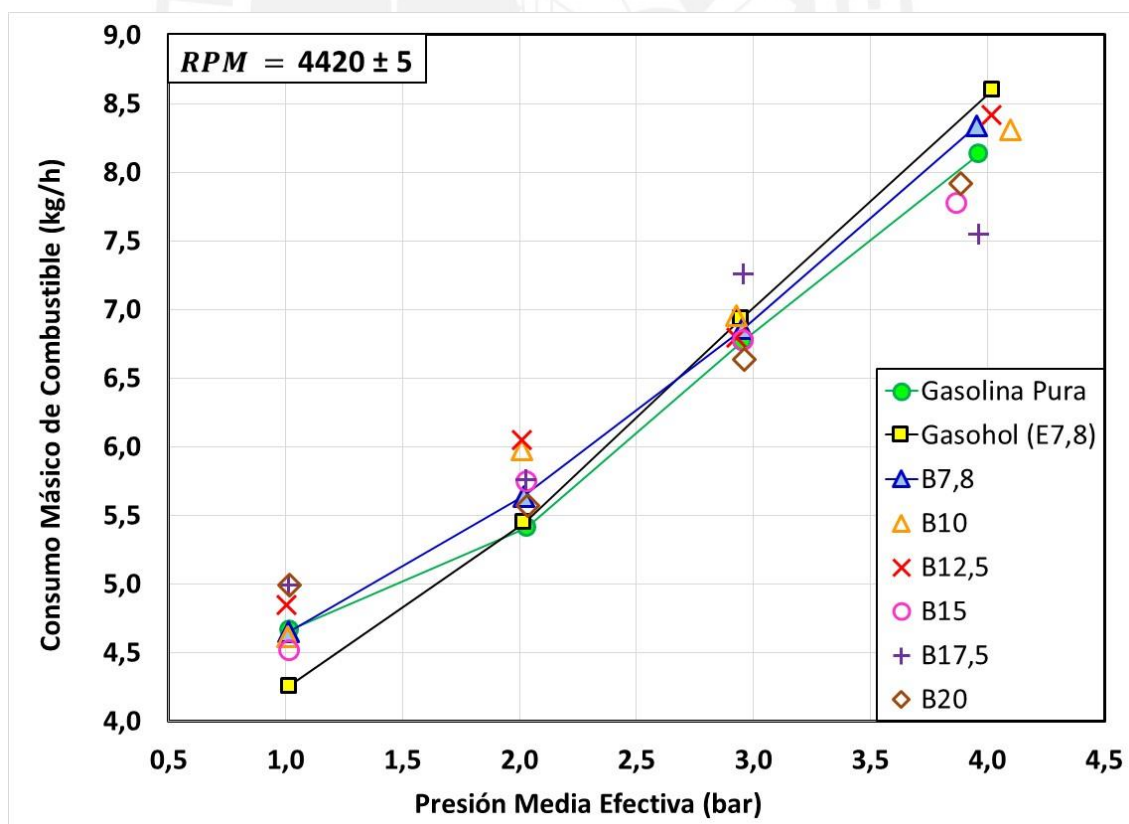


Figura 4. 2 – Consumo Másico de Combustible versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

Otro aspecto importante es que, en la **Figura 4. 2**, el B20 (a pesar del menor poder calorífico inferior entre las mezclas) es el único que posee menor consumo de combustible que la B7,8 para cada carga, salvo en el punto de 1 bar (25% de carga), en la que posee el mayor consumo de todas las mezclas. En el mismo gráfico, se observa que el B12,5 posee una tendencia de mayor consumo a las demás mezclas de gasolina-butanol, excepto a 3 bar.

En la **Figura 4. 3**, que hace referencia al régimen de 2460 rpm, la mezcla B7,8 es la que posee mayor consumo, excepto a 25% de carga (en la que el B10, B12,5 y B20 elevan su consumo) y a plena carga (en la que las mezclas B12.5 y B15 vuelven a superarlo).

Finalmente, cabe resaltar que el mayor consumo es de 8,59 kg/h y se obtuvo para el gasohol, a 4420 rpm y 100% de carga (4 bar, aproximadamente). En cambio, el menor valor, 2,41 kg/h, se dio en la mezcla B15 a 2460 rpm y 25% de carga (1,5 bar, aproximadamente).

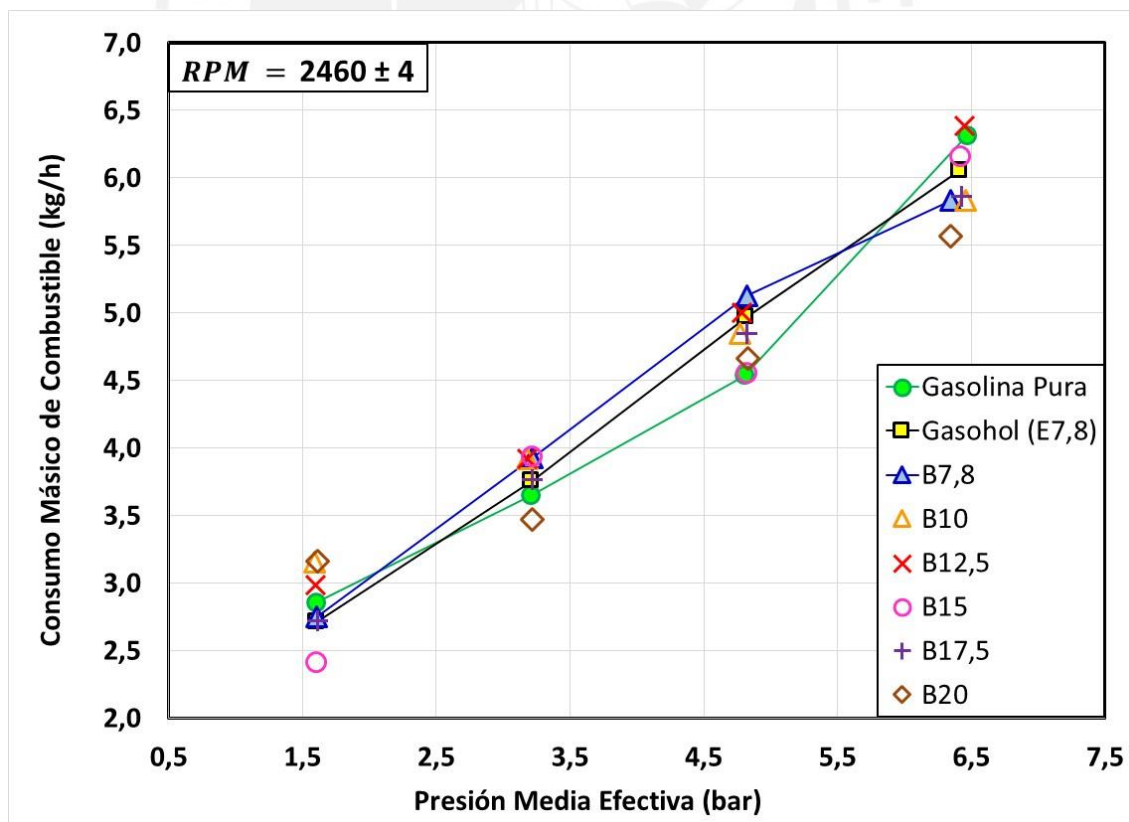


Figura 4. 3 – Consumo Másico de Combustible versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

En la Figuras 4. 4, 4. 5 y A.5. 2, se han representado el consumo específico de combustible corregido versus presión media efectiva. Aquí observamos que al disminuir el nivel de carga, se obtiene un consumo específico mucho mayor. Esto se debe principalmente a que el consumo de combustible no varía en gran medida con respecto a la reducción de carga, en cambio, en la potencia generada, si hay una disminución significativa cuando se reduce la carga, por ejemplo, cuando para una misma mezcla se pasa de 100% a un 75% de carga y, a su vez, debemos resaltar que la potencia generada se encuentra en el denominador de la formula afectando aún más al resultado. En otras palabras, a mayor carga se aprovecha mejor el consumo de combustible por generación de potencia, lo mismo ocurre al elevar la velocidad, es decir el motor se vuelve más eficiente.

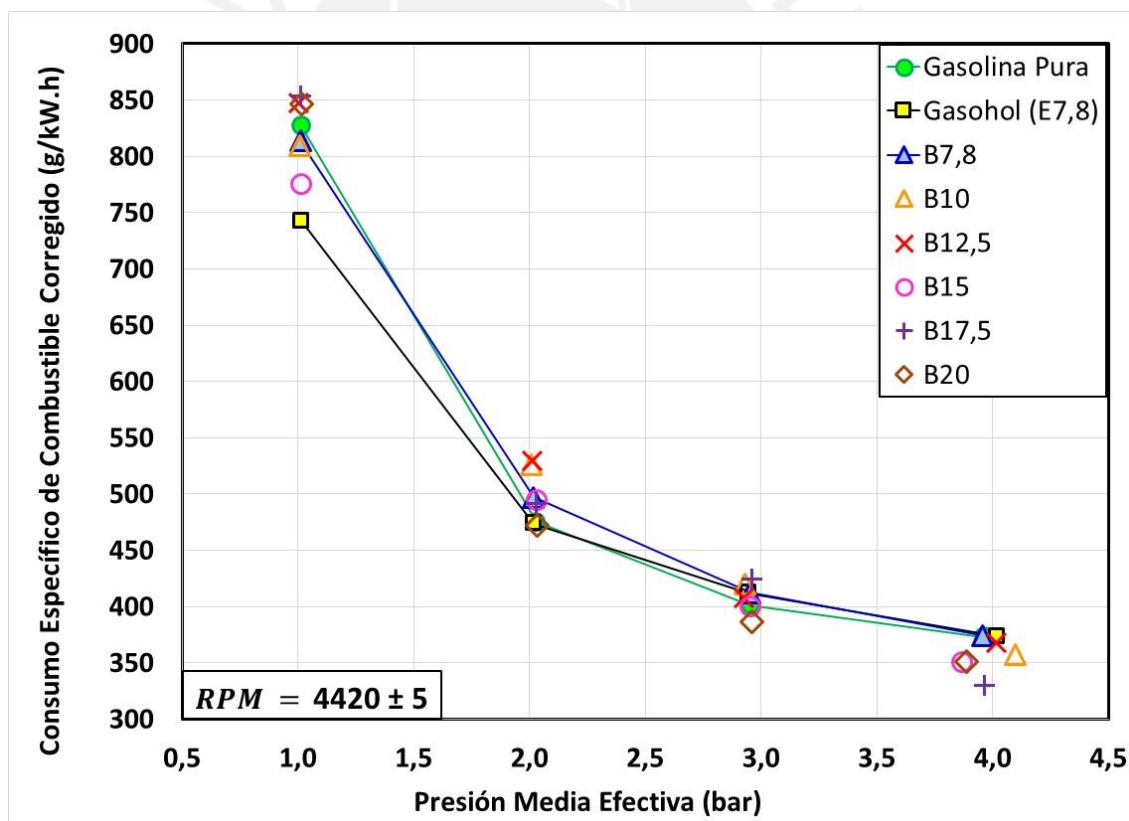


Figura 4. 4 – Consumo Específico de Combustible Corregido versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

No obstante, en la Figura 4. 4 (4420 rpm), para las mezclas B12,5, B17,5 y B20, los valores de consumo específico tienden a ser mayores que la B7,8 para una carga de 1bar; sin embargo, para cargas mayores a esta, los consumos se vuelven menores.

Algo muy similar ocurre en la **Figura 4. 5** (2260 rpm) con las mezclas B10, B12,5 y 20 para 1.5 bar. Además, cabe resaltar que la mezcla B15, tiene una tendencia menor que la de B7,8 para todas la velocidades, también la B20 excepto para 1.5 bar.

Al comparar la gasolina pura, el gasohol y la mezcla B7,8 para las 3 diferentes velocidades, estas poseen consumos específicos de gasolina muy próximos a partir del 50% de carga para arriba. A su vez, se puede observar que, independientemente del régimen de giro, el gasohol posee un menor consumo específico que la mezcla B7,8 para la mayoría de puntos de carga.

El mayor consumo específico de combustible (846,2 g/kW.h) se obtuvo a una velocidad de 4420 rpm con la mezcla B17,5 a una presión media efectiva de 1 bar (**Figura 4. 4**). En cambio, el menor consumo (269,8 g/kW.h) se dio a una velocidad de 2460 rpm a una pme de 6,5 bar para la mezcla B20 (**Figura 4. 5**).

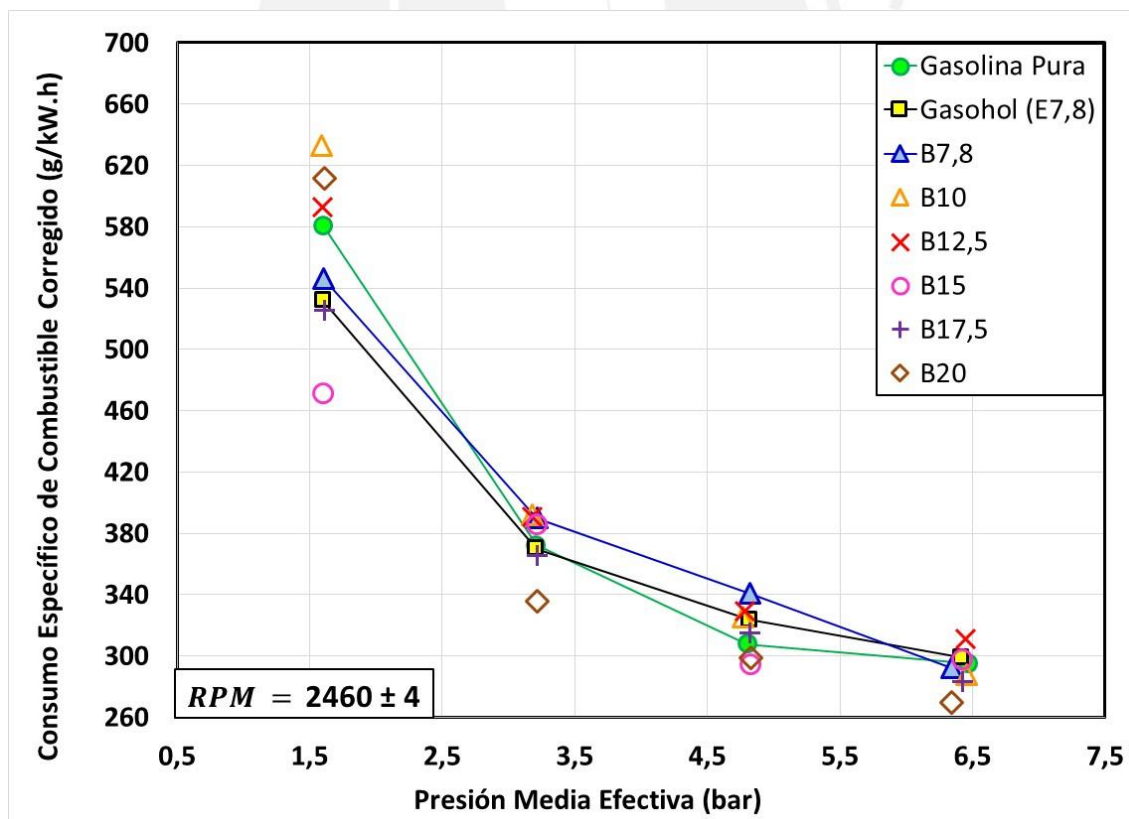


Figura 4. 5 – Consumo Específico de Combustible Corregido versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

En las Figuras 4. 6, 4. 7 y A.5.3 para las velocidades de 4420, 3440 y 2460 rpm, se muestra el rendimiento efectivo versus la presión media efectiva. El punto de máximo rendimiento efectivo se debe a que este coincide con el punto mínimo de consumo específico de combustible, en donde se requiere menor combustible por cada unidad de energía generada. Asimismo, al aumentar la carga el rendimiento aumenta porque se genera mayor potencia con un aumento de masa de combustible relativamente bajo, en otras palabras se transforma mejor la energía química del combustible en energía mecánica.

Si nos enfocamos solo en la gasolina pura, gasohol y la mezcla B7,8, observamos que tienen comportamientos muy similares, ya que sus valores son muy próximos y solo varían considerablemente para la velocidad de 4420 y a cargas parciales (1 y 2 bar), con una variación máxima del 15,1% entre el gasohol y la gasolina pura a 2 bar de carga. Asimismo, el B7,8 presenta un rendimiento promedio entre la gasolina y el gasohol, siendo el gasohol el más alto para todo el rango de velocidades.

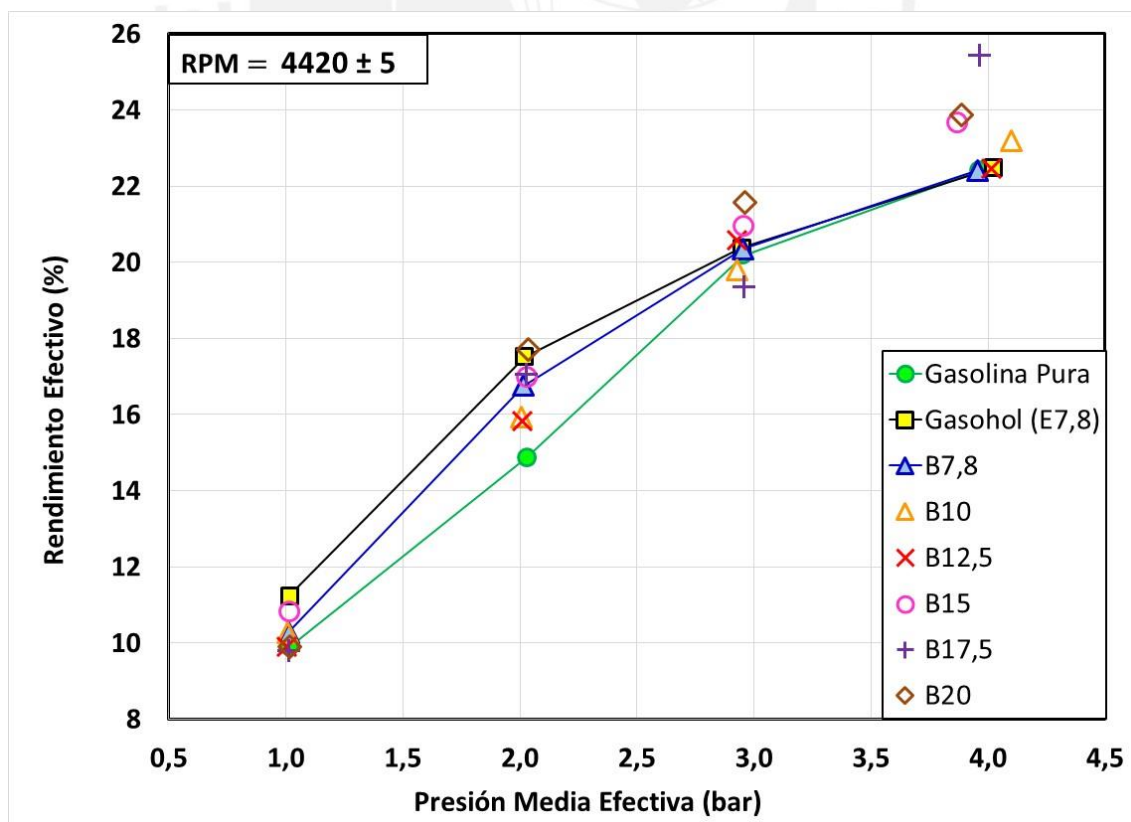


Figura 4. 6 – Rendimiento Efectivo versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

Ahora, comparando los resultados obtenidos con las mezclas gasolina-butanol, en la **Figura 4. 6**, observamos que para 4420 rpm solo las mezclas mayores al 12.5% de butanol poseen un mayor rendimiento efectivo que la B7,8 a lo largo de toda la curva, excepto la mezcla B17,5 a 2 bar. En cambio, en 2460 rpm (**Figura 4. 7**), hay una clara tendencia en la que el rendimiento efectivo para la mayoría de los puntos de carga en las mezclas B15, B17,5 y B20 son mayores que la B7,8 excepto la mezcla B20 a 1.5 bar.

En la matriz de experimentos desarrollada, el máximo rendimiento efectivo fue de 30,5%, con B20 a 2460 rpm y a una presión media efectiva de 6.5 bar (**Figura 4. 6**). El menor rendimiento fue 9,8% y se dio también con la mezcla B20 pero a 4420 rpm y pme de 1 bar.

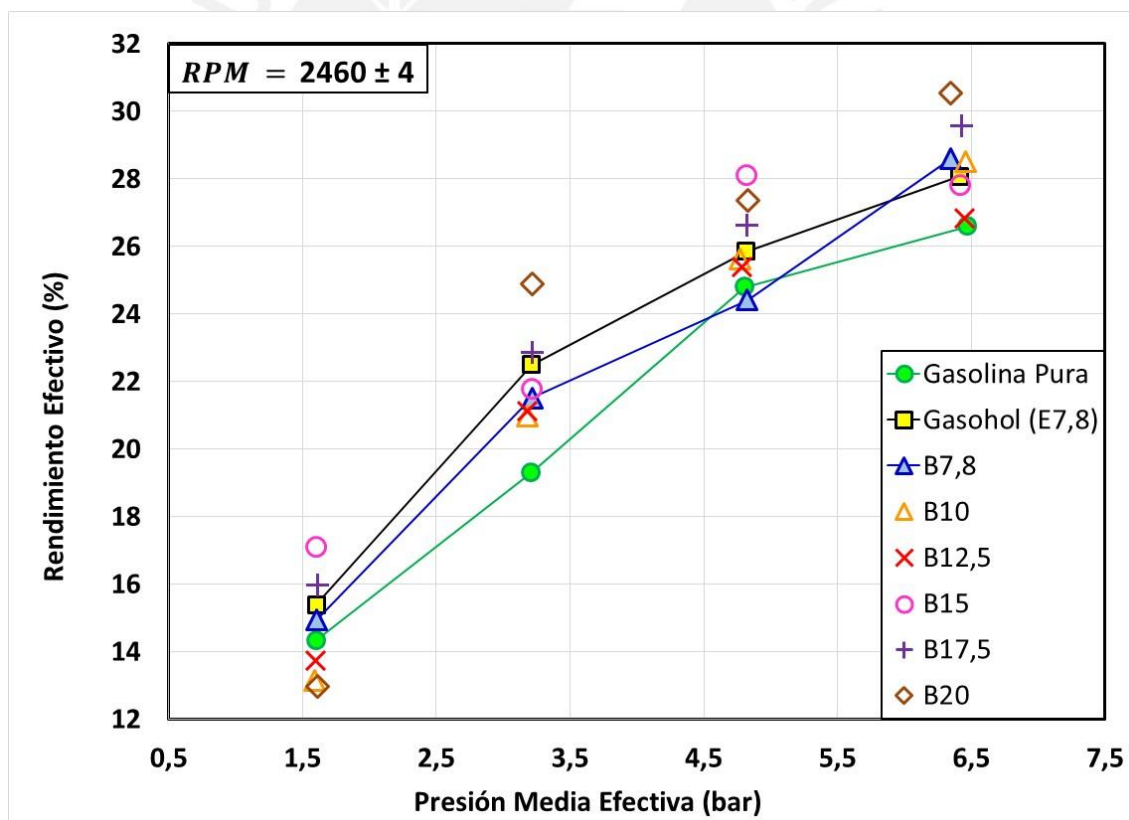


Figura 4. 7 – Rendimiento Efectivo versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

En la **Figuras 4. 8 y 4. 9**, se muestran los gráficos del consumo másico de aire seco versus la presión media efectiva del motor para las velocidades de 4420 y 2460 rpm, respectivamente. En dichos gráficos, se observa una tendencia lineal, ya que el

consumo de aire seco aumenta respecto al progresivo aumento de la carga aplicada al motor. Además, a mayor régimen de giro aumenta el consumo de aire seco.

Asimismo, se observa, que para cargas parciales (25%, 50% y 75%), independiente de la velocidad, los valores del consumo de aire seco para todas las mezclas son muy parecidos. Sin embargo, a plena carga, existe una dispersión de los valores entre las mezclas, siendo los valores más bajos el caso de gasolina pura y las mezclas B17,5 y B20; en cambio, el que necesita una mayor cantidad de aire para realizar la combustión es el gasohol. Esta dispersión podría estar asociada a la dificultad de operar el motor a velocidades altas, ya que mantener la velocidad estable era mucho más complicado y esto originaba mayor variabilidad de la rpm.

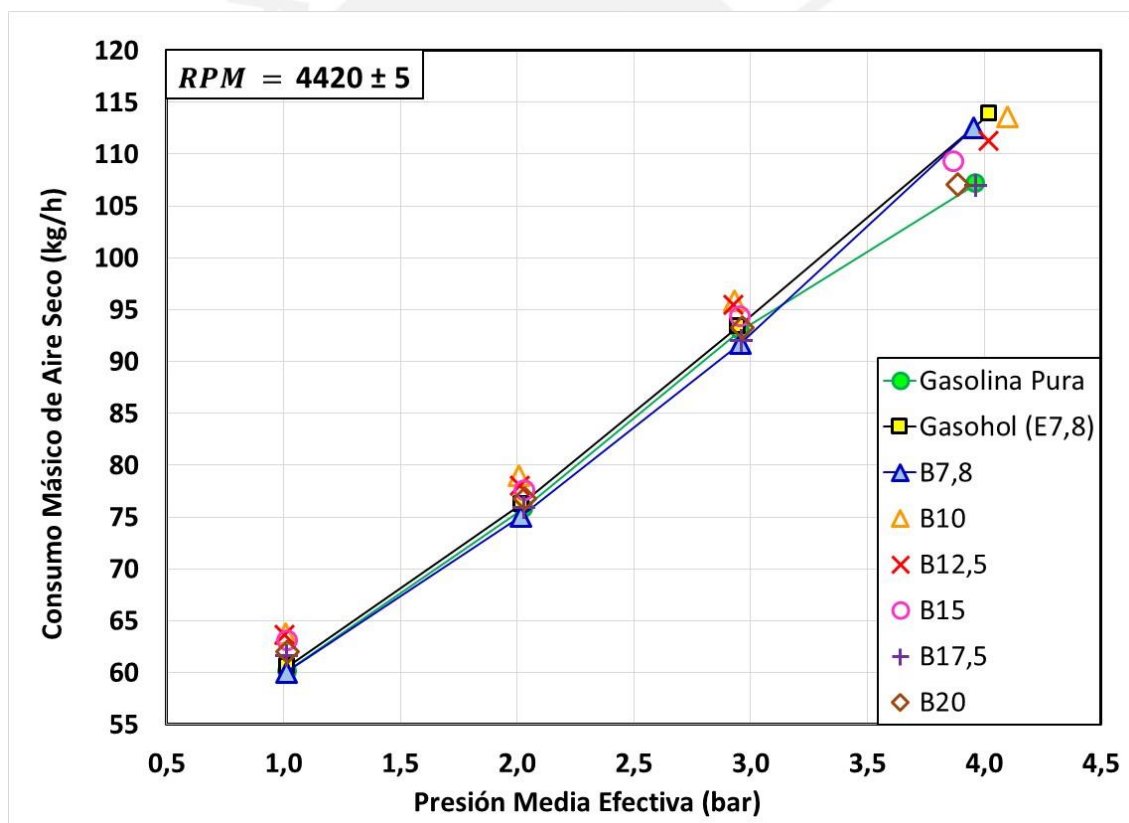


Figura 4. 8 – Consumo Másico de Aire Seco versus PME a 4420 RPM con diferentes mezclas.

Por otro lado, al aumentar el porcentaje de butanol a la mezcla desde B10 para adelante, para una misma velocidad en un mismo punto de carga el consumo de aire seco disminuye. Este efecto puede ser atribuido a que los alcoholes poseen un mayor

consumo de combustible por lo tanto admitirían mayor masa de combustible originando un espacio menor para el aire.

Por otra parte, en la condición de plena carga, al mayor consumo de aire seco asociado al uso de los alcoholes (butanol y etanol) se puede explicar por medio del calor latente de vaporización, debido a que el butanol posee un mayor calor latente de vaporización que la gasolina (pero menor que el etanol), por lo que necesitaría energía extra para evaporarse la cual sería extraída del aire admitido. Esto conllevaría a una disminución de la temperatura del aire, por ende, a un aumento de su densidad, es decir, aumentaría la masa de aire a los cilindros.

A 6.5 bar y 4420 rpm (Figura 4. 8), la máxima diferencia entre los consumos de aire seco se obtuvo entre la gasolina pura y la mezcla B10, lo que resultó igual a 6.5 kg/h y representa un aumento del 5,7%. Finalmente, en esta condición de funcionamiento, el gasohol y las mezclas B7,8, B10 y B12,5 tuvieron las tendencias más parecidas.

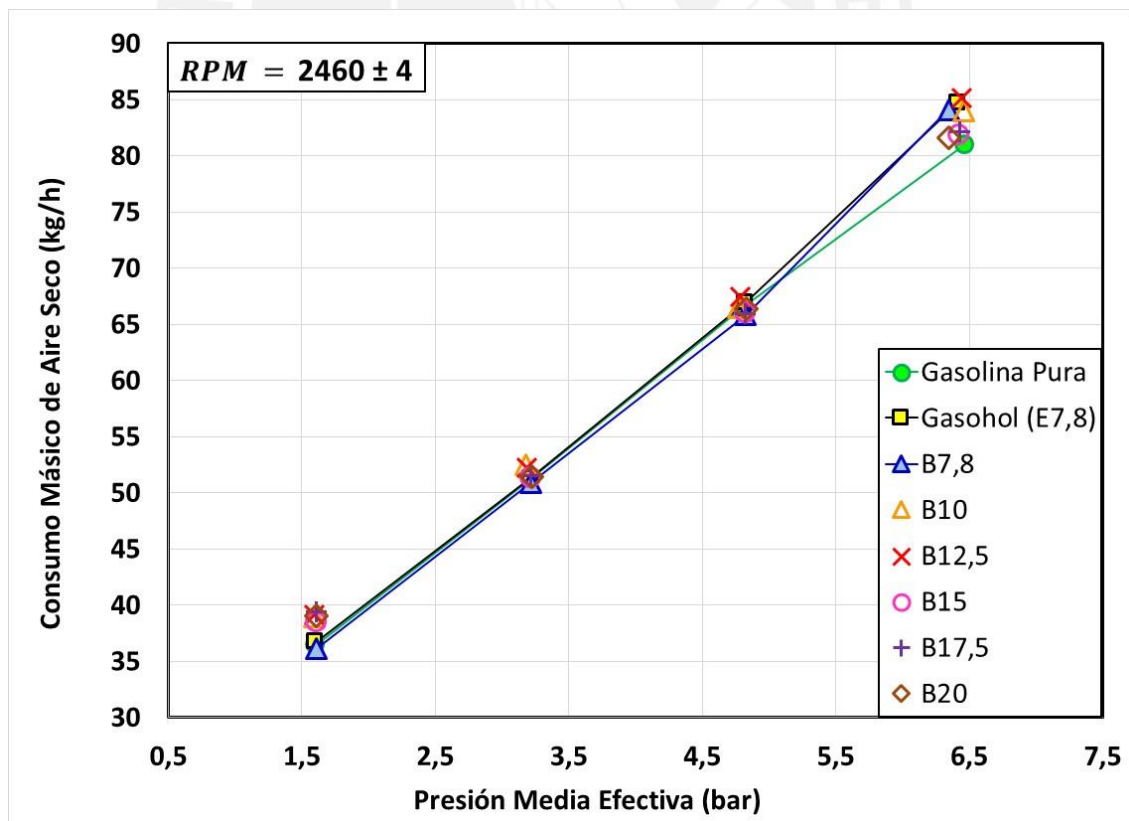


Figura 4. 9 – Consumo Másico de Aire Seco versus PME a 2460 rpm con diferentes

El rendimiento volumétrico depende del consumo másico de aire seco, parámetro analizado anteriormente, ya que al consumir mayor aire seco (real) hay un mejor llenado de los cilindros y esta se aproxima más a la masa de aire de referencia con lo cual se obtendría un mayor rendimiento volumétrico. Además, podemos ver que las curvas de estos dos parámetros (consumo másico de aire seco y rendimiento volumétrico) son muy parecidas, ya que como mencionamos el rendimiento volumétrico está íntimamente ligado al consumo de aire seco como también al de la masa de aire de referencia y esta a su vez a las condiciones termodinámicas en el múltiple de admisión (presión y temperatura) las cuales se alteran ligeramente, de la cilindrada (la cual es constante) y de la rpm que sería casi constante a lo largo de un mismo ensayo de velocidad.

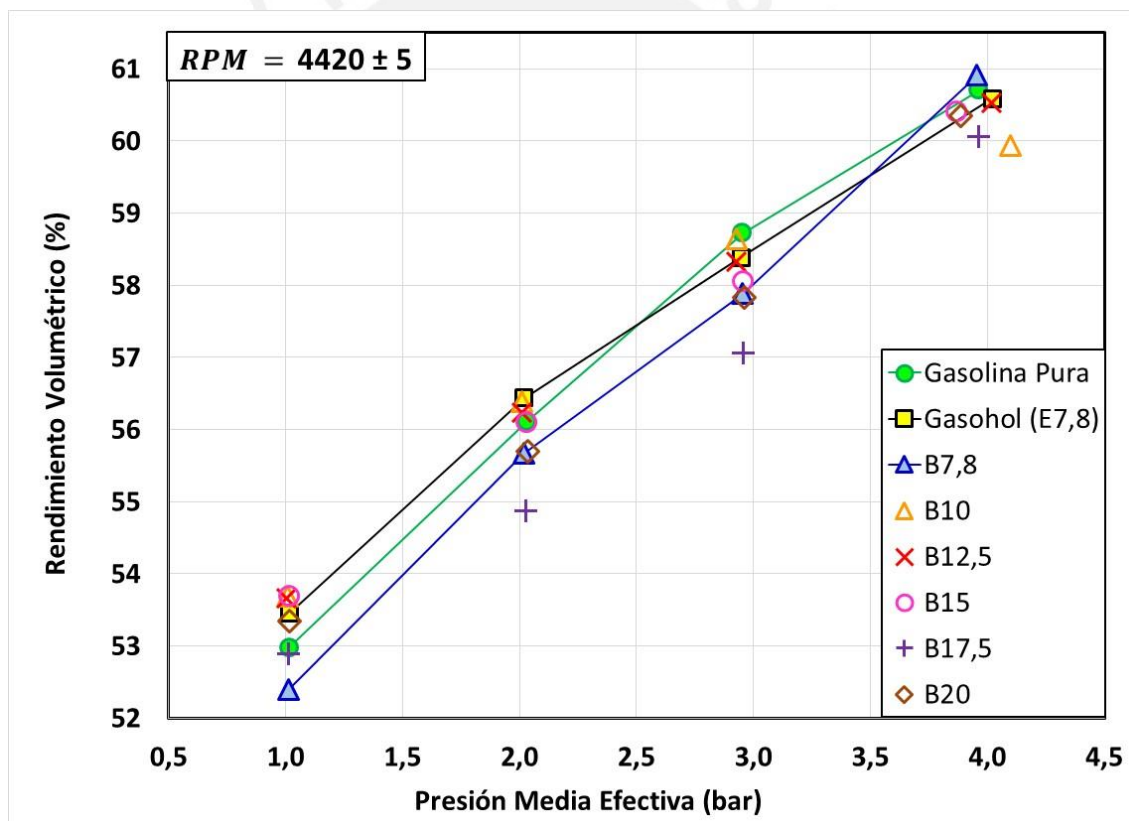


Figura 4. 10 – Rendimiento Volumétrico versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

A plena carga, el rendimiento volumétrico debería estar en valores cercanos a 80% para que sea un indicador de un buen funcionamiento del motor. A mayores velocidades el rendimiento cae debido a la restricción del aire provocado por la válvula mariposa del carburador. Asimismo, a 100% de carga, observamos los mayores rendimientos

volumétricos; en cambio, a cargas parciales, el rendimiento volumétrico es menor debido, de igual manera, a la restricción del aire por medio de la válvula mariposa localizada en el carburador y accionada por el acelerador.

Para las velocidades de 4420 y 3440 rpm (**Figuras 4. 10 y A.5.5**), el rendimiento volumétrico de la mezcla de B7,8 tiende a ser menor que el gasohol, con un máximo de diferencia del 2% , este se da a 1 un bar y a 4420 rpm . Sin embargo, para la velocidad de 2460 rpm (**Figura 4. 11**), la B7,8 es ligeramente superior a la de gasohol, a lo largo de todas las cargas . Además, se observa que la gasolina tiene una eficiencia volumétrica mayor que estos dos combustibles para las 3 velocidades y a cargas parciales, ya que al 100% esta disminuye. Según los estudios de Ashraf Elfakhany [24], esto se debe a que el n-butanol comparado con la gasolina posee una presión de vaporización mucho menor, esta propiedad está ligada a la habilidad del combustible a vaporizarse, entonces una mayor presión de vaporización disminuye la vaporización del combustible, por lo que generaría una ligera reducción del rendimiento volumétrico de la mezclas gasolina-butanol a cargas parciales. Sin embargo la eficiencia volumétrica perdida por la presión de vaporización sería compensada por el mayor calor latente de vaporización de los alcoholes, tal compensación se ejercería a plena carga.

Por otro lado, comparando los rendimientos volumétricos de las mezclas de butanol, se nota que la mezcla B7,8 tiende a ser superior a las demás para las 3 velocidades a 100% de carga. En cambio, hay una clara tendencia que para la velocidad de 4420 rpm, a cargas parciales, las mezclas B10, B12,5, B15 y B20 son superiores a la B7,8; la B12,5 es la que origina un mayor rendimiento. No obstante, ocurre algo similar a la velocidad de 2460 rpm, salvo que la mezcla B17,5 desplaza a la B15 y la B10 se vuelve la más eficiente en la capacidad de llenado de aire.

El mayor rendimiento volumétrico fue 74.5% y se da con E7,8 a 2460 rpm y a una pme de 6,5 bar. La menor es de 52.4% y se da con B7,8 a 4420 rpm y pme de 1 bar.

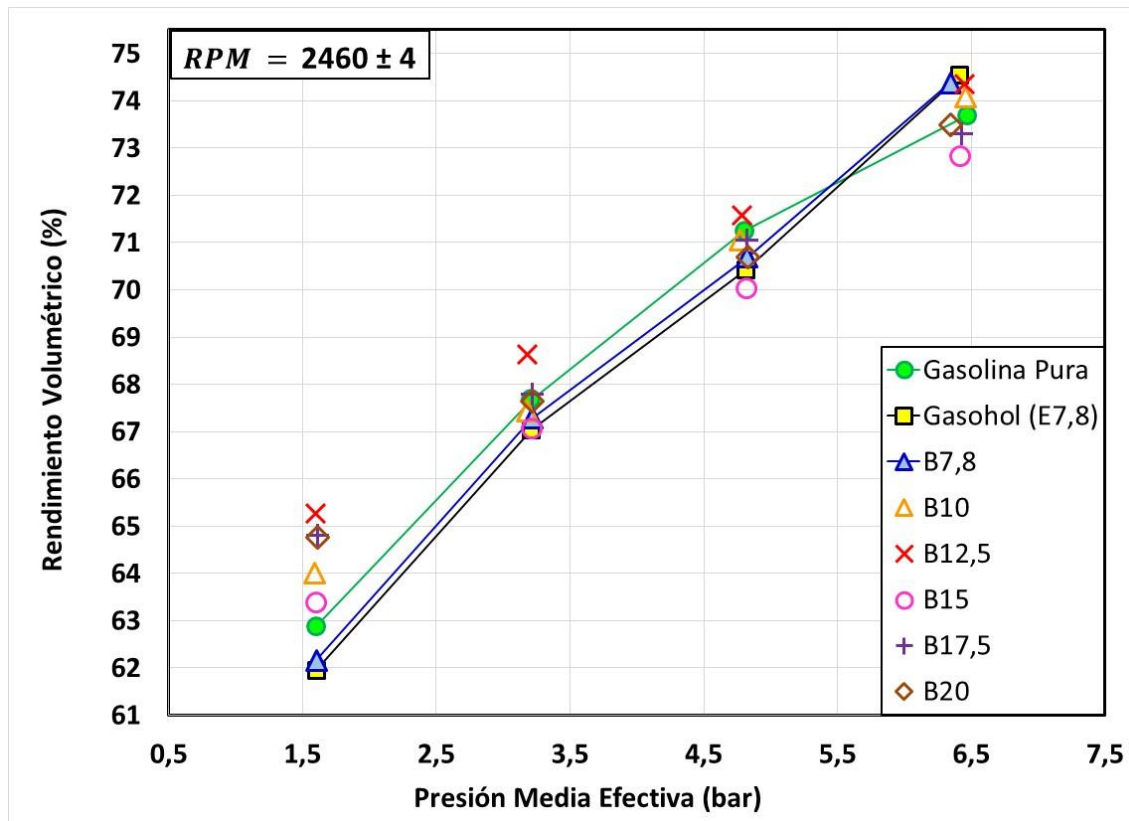


Figura 4. 11 – Rendimiento Volumétrico versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

En las Figuras 4. 12, 4. 13 y A.5.6, se observa la temperatura de los gases de escape versus la presión media efectiva. Claramente, hay una tendencia creciente, es decir, al aumentar la carga, la temperatura también incrementa, lo mismo sucede al aumentar la velocidad. Asimismo, podemos notar que para los 3 gráficos la curva de gasolina es la que posee menor temperatura de los gases de escape. La tendencia anterior difiere de lo hallado por el investigador Elfasakhany [29], en su caso, él usó un motor monocilíndrico carburado y halló que al aumentar el porcentaje de butanol progresivamente de 3% a 7%, a 10% la temperatura que se generaba iba descendiendo, por ende, en la gasolina pura se obtenía la mayor temperatura. Esto se explica, ya que en sus ensayos con las mezclas de butanol se generaron un menor rendimiento del motor que con la gasolina pura, además él atribuye a que como combustible el butanol posee un mayor calor latente y un menor poder calorífico lo que se transforma en una pérdida de torque y potencia, que consecuentemente generará menores temperaturas de escape.

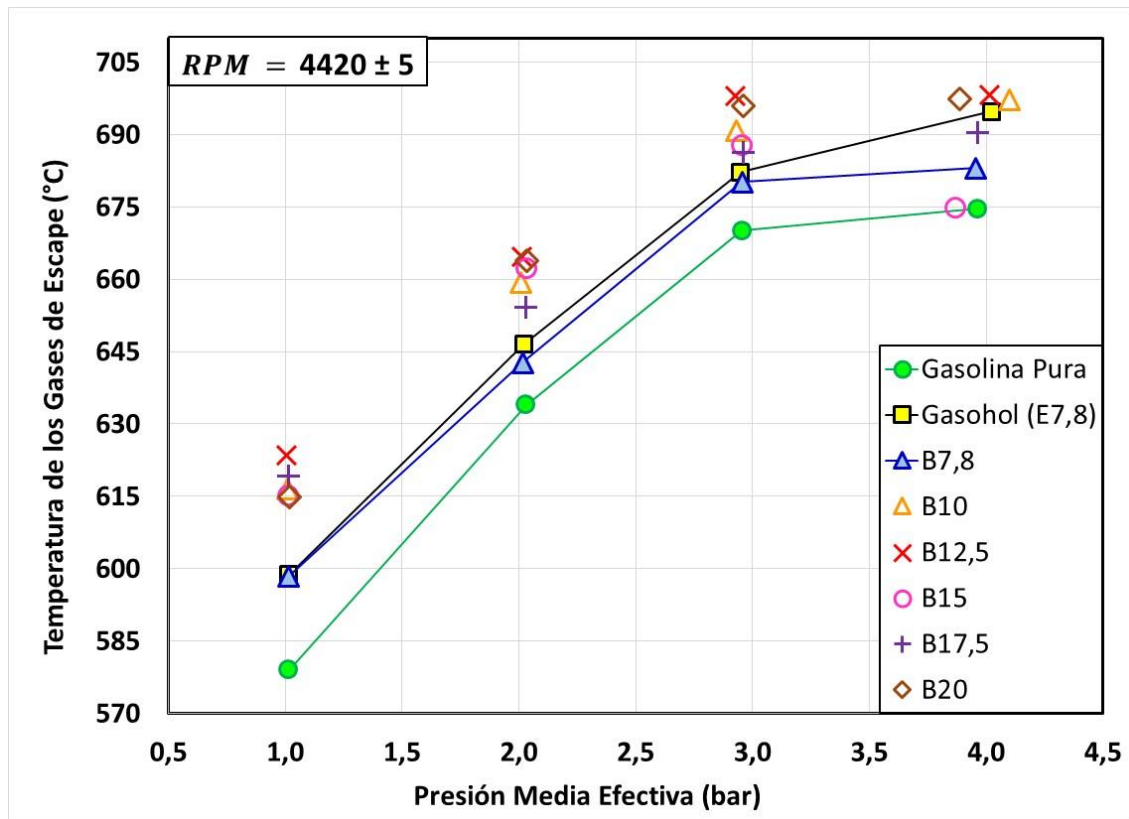


Figura 4. 12 – Temperatura de los Gases de Escape versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

Al comparar la gasolina, gasohol y B7,8 para la tres velocidades, es decir, en las tres gráficas, existe una tendencia bien marcada. Las temperaturas que genera el gasohol son un poco mayor a las del B7,8, y por encima la de la gasolina. La mayor diferencia entre estos combustibles se da entre el gasohol y la gasolina pura, la cual es de 3,9% para una velocidad de 3440 rpm y a 1 bar (figura A.5.6).

Adicionalmente, al comparar la mezclas de gasolina-butanol, se puede apreciar que la curva del B7,8 para las 3 velocidades, queda rezagada al último lugar, por tener las temperaturas más bajas; y con el aumento progresivo del butanol estas mezclas tienden a generar mayor temperatura en los gases de escape. Este efecto puede estar asociado, a que las mezclas mayores a B7.8 para un mismo punto de carga poseían un mayor consumo másico de combustible y; por lo tanto, deben generar una mayor cantidad de gases de escape.

Por otro lado, la máxima temperatura de los gases de escape fue de 698°C para la mezcla B12,5 a una velocidad de 4420 rpm y pme de 4 bar (Figura 4. 12). La mínima

temperatura fue de 484.5°C la cual fue generada por la gasolina pura a 2460 rpm y una pme de 1.5 bar (Figura 4. 13).

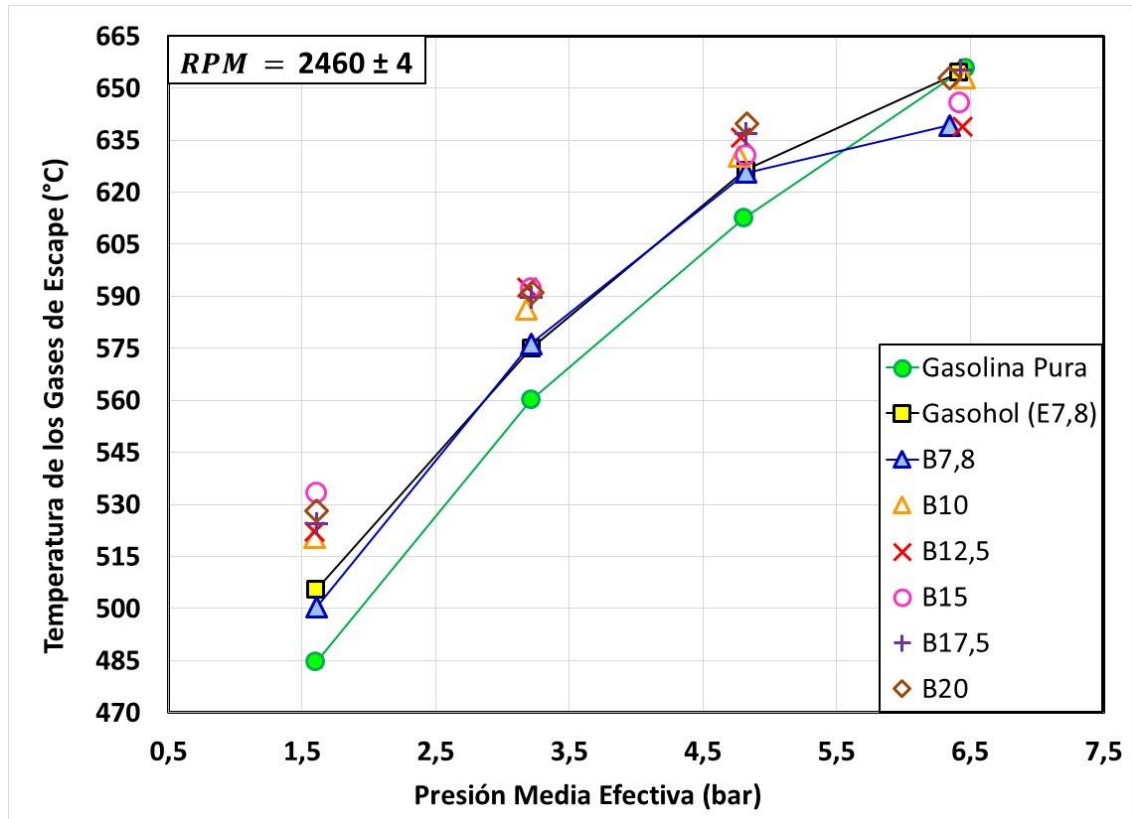


Figura 4. 13 – Temperatura de los Gases de Escape versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

Los gráficos del factor lambda medido (λ) versus presión media efectiva, son mostrados en las Figuras 4. 14, 4. 15 y A.7.7. Asimismo, para todos los niveles de carga a la velocidad de 4420 rpm, existe una tendencia del motor a trabajar con una mezcla aire combustible rica ($\lambda < 1$). Solo a intermedia y a baja velocidad (3340 y 2460 rpm), para cargas altas (75% y 100%) y para algunos combustibles (B7,8, B12,5 y b17,5), se obtuvieron mezclas pobres, es decir, con defecto de gasolina o exceso de aire. Además, para las tres velocidades y para todas las mezclas, se nota una evidente tendencia a que el parámetro de lambda medido aumenta conforme se incrementa la carga, de igual manera sucede con el incremento del porcentaje de butanol en la mezcla.

Por otro lado, observamos que el lambda para la gasolina, el gasohol y el B7,8, se comportan de la misma manera para las tres velocidades; no obstante, la curva del gasohol está por encima a la de B7,8 y B7,8, a su vez, supera a la de la gasolina pura. También, se observa en cargas altas (75% y 100%) y a la velocidad de 4420 rpm (Figura 4. 14) el factor lambda de se mantiene prácticamente constante para cada uno de estos combustibles.

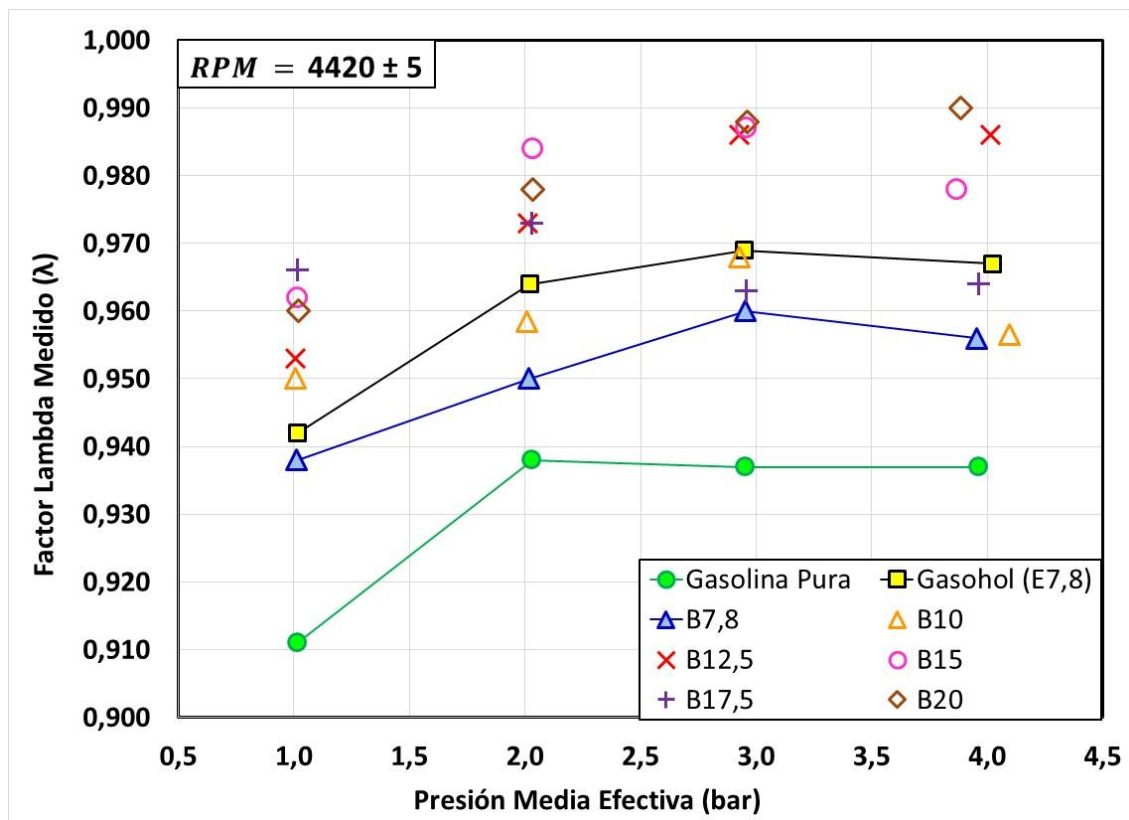


Figura 4. 14 – Factor Lambda Medido versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

En las mezclas gasolina-butanol, hay una marcada tendencia en que la mezcla B7.8 tenga el menor lambda a lo a lo largo de todos los puntos de carga y para todas la velocidades. Asimismo, la mezcla B10 tiene un comportamiento muy similar a la B7.8. En la Figura 4. 14, es decir, a 4420 rpm la mezcla B20 es la que presenta mayores valores de λ en la mayoría de los puntos y tiene una máxima diferencia con B7,8 de 3,4% ;y se observa que B12,5 se comporta de manera muy similar a la B20.

Por otra parte, en la **Figura 4. 15**, todas las mezclas de butanol tienen un mismo comportamiento, pero la mezcla B12,5 posee el mayor lambda con respecto al aumento de la carga. Cabe resaltar que en esta gráfica, para una carga de 100%, todas las mezclas con butanol excepto la B15 poseen $\lambda > 1$. Esto quiere decir que se están originando mezclas pobres, ya que se estaría suministrando mayor cantidad de aire que la estequiométrica. Este punto sería el adecuado para lograr consumos y emisiones mínimas.

Finalmente, este parámetro se puede relacionar con los figuras anteriores de consumo másico de combustible (**Figuras 4. 4 y 4.5**) y de consumo de aire seco (**Figuras 4. 8 y 4.9**), ya que el lambda medido no viene a ser otra cosa que la relación entre masa real de aire seco y combustible, y dividido entre el valor estequiométrico de mezcla.

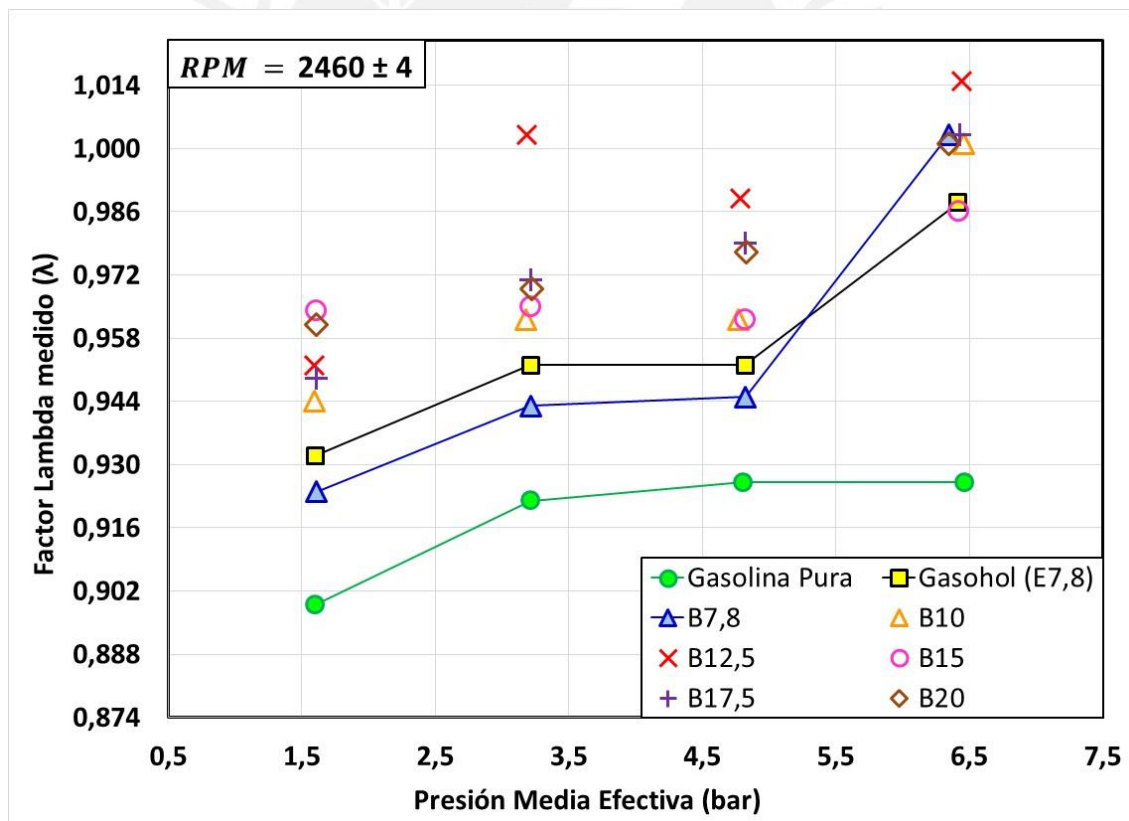


Figura 4. 15 – Factor Lambda Medido versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas

A continuación, en las Figuras 4. 16 y 4.17, se presentan los resultados de las emisiones de hidrocarburos no quemados versus presión media efectiva. En principio, se tiene que recalcar que los resultados obtenidos difieren de los resultados que se incluyeron en la parte del estado del arte, ya que para el investigador Dernothe [28], quien usó un motor con puerto de inyección de 4 cilindros, para la mezcla B20 la única que podemos comparar posee mayores emisiones que la gasolina pura al igual que la mezcla B20 ensayada en esta investigación; sin embargo, en su trabajo la tendencia de HC con gasolina pura y B20 muestra una disminución conforme se aumenta la carga, mientras que en la Figura 4. 16 se observan dos tendencias: las emisiones de HC con las mezclas disminuyen hasta 2 bar de pme y luego aumentan con la cargas hasta 4 bar, pero esto no ocurre para las velocidades de 3440 y 2420 (Figuras A.5.8 y 4. 17, respectivamente), ya que se asemejan a la tendencia de Dernothe. Por otra parte, en la investigación de Elfasakhany [29], con un motor carburado monocilíndrico, las emisiones de HC durante la operación a plena carga disminuyeron con el uso de mezclas butanol-gasolina (desde B0 a B10).

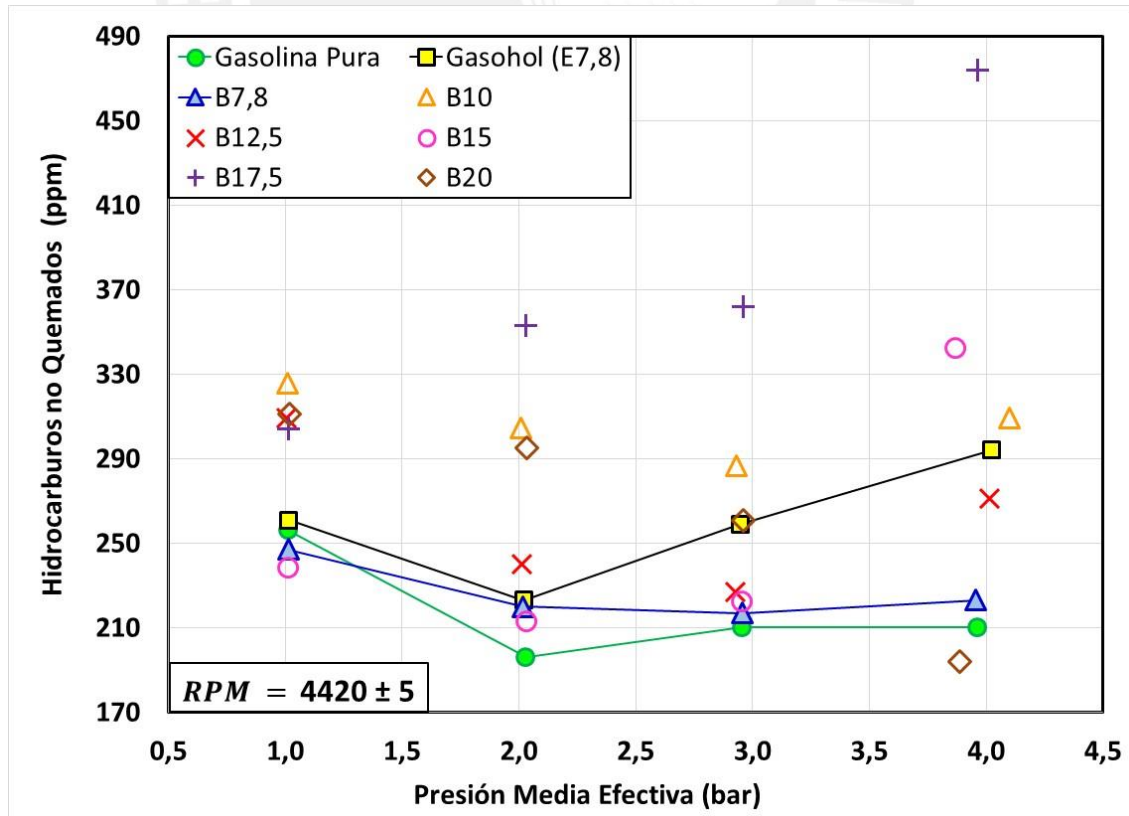


Figura 4. 16 – Hidrocarburos no Quemados versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

Al comparar la gasolina pura, gasohol y B7,8, notamos que, en la **Figura 4. 16**, existe una tendencia que entre 1 y 2 bares bajan las emisiones de HC pero luego estas vuelven a elevarse. Sin embargo, esto no ocurre a menor velocidad (**Figura 4. 17**), ya que notamos que las emisiones de HC disminuyen al aumentar la carga. A 4420 rpm, la gasolina pura tiende a producir menos emisiones de HC y la mezcla B7,8 queda en un término medio entre el gasohol y la gasolina pura, pero a 3340 rpm el gasohol y la B7.8 tienen comportamientos muy similares. La máxima diferencia que se da entre el gasohol y la mezcla B7,8 es de un 24% para 4420 y una carga de 4 bar (**Figura 4. 16**). En cambio, para 2240 rpm (**Figura 4. 17**), la gasolina pura genera mayores emisiones que el gasohol y el B7,8, siendo este último el que produce menos emisiones. La diferencia más significativa entre B7,8% con respecto a la gasolina pura se da a 2240 rpm y es de -18.8% a 25% de carga y de -18.1% a plena carga (100%), donde el gasohol queda en un término medio entre estos porcentajes.

Analizando las mezclas de gasolina-butanol constatamos que, para 4420 rpm, la mezcla B7,8 es el que produce menos hidrocarburos no quemados y el que le sigue los pasos es la B15, pero solo a cargas parciales (25, 50 y 75% de carga). Para 3340 rpm, se logra ver que tanto B12,5 como B15 generan menos emisiones que la B7,8 para cargas parciales, a su vez, se logra apreciar que el valor de emisiones de las mezclas B17,5 y B20 se elevan significativamente con respecto a B7,8, entre un +16.5 % y +29.3%. Luego, a 2460 rpm (**Figura 4. 17**), la mezcla B10 se comparte casi idénticamente que la B7, 8, ya que poseen valores muy cercanos y estas mezclas son las que generaron emisiones más bajas. La siguiente mezcla que no eleva demasiado sus emisiones comparada a estas dos es la B17,5, ya que en las demás mezclas de butanol, si se observa un aumento promedio considerable de aproximadamente un +36%.

Finalmente, la máxima emisión de hidrocarburos no quemados fue de 474 ppm para la mezcla B17,5 a una velocidad de 4420 rpm y una pme de 4 bar. Por el contrario, la mínima emisión que se generó fue dado por 2 mezclas, la B10 y B12,5 a 3440 rpm y a un 50% de carga, ya que generaron 183 ppm de HC.

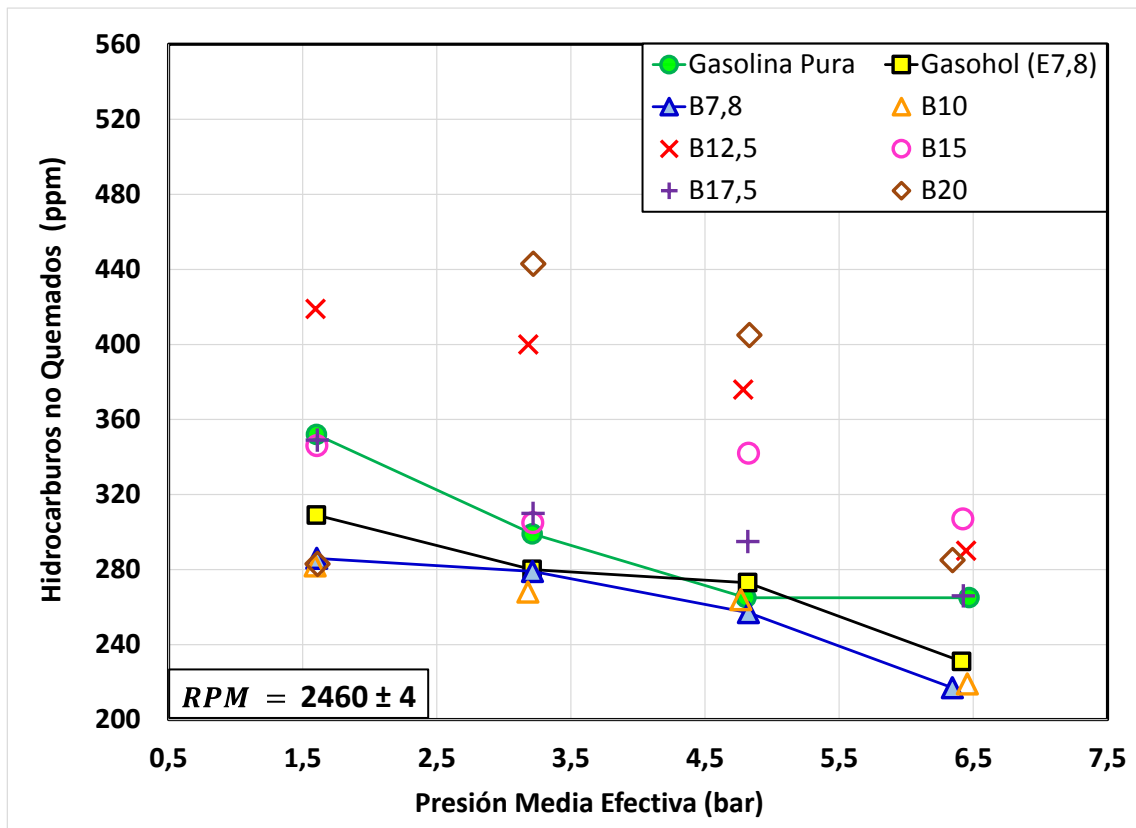


Figura 4. 17 – Hidrocarburos no Quemados versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

Para todas las gráficas de monóxido de carbono versus presión media efectiva, **Figuras 4. 18, 4. 19 y A.5.8**, observamos que al aumentar la carga disminuyen las emisiones de CO, siendo la gasolina pura el combustible que genera las mayores emisiones. Las emisiones de CO aumentan cuando la combustión es incompleta y en estas pruebas coincide con los mayores consumos específicos de combustible (**Figuras 4. 4, 4. 5 y A.5.2**) y con los menores rendimientos efectivos (**Figuras 4. 6, 4. 7 y A.5.3**). Otro efecto que influye en la generación de CO, es que este se encuentra asociado al lambda, ya que podemos observar que a 2460 rpm (**Figura 4. 15**) y a plena carga obtuvimos un $\lambda > 1$ (mezcla pobre), es decir, con exceso de aire, lo cual favorecerá a que se forme la menor cantidad posible de CO. A su vez, según la literatura, la tendencia a que disminuyan las emisiones de CO al aumentar el porcentaje de butanol, se ve respaldada por los resultados de otros investigadores [28 y 29].

Nuevamente, al comparar los 3 combustibles, gasolina pura, gasohol y el B7,8, existe una tendencia muy clara en la cual se puede verificar que para las 3 velocidades, la

mezcla que genera mayores emisiones es la gasolina pura, seguida por la mezcla B7,8 y , por último, el gasohol. La máxima diferencia entre el gasohol y la mezcla B7,8 es de 31% para una velocidad de 3440 rpm y 5 bar (Figura A.5.8).

Al comparar las mezclas gasolina-butanol, las emisiones de CO disminuyen con el aumento del contenido de butanol en la mezcla, por consiguiente, la B7,8 es la mezcla que produce menores emisiones. Asimismo, hay una clara tendencia de las mezclas B10 y B12.5, a seguir el patrón de la mezcla B7,8 para las velocidades de 4420, 3440 y 2460 rpm. Esto significa que un mayor porcentaje de n-butanol en la mezcla, mejora la combustión del combustible y conlleva a la generación de menores emisiones de CO.

Este efecto de los alcoholes ha sido explicado por diversos autores ([21, 28, 29,32] quienes afirman que las menores emisiones de CO se deben, entre otros factores, al mayor aporte de oxígeno de los alcoholes los cuales favorecen al proceso de combustión. Sin embargo, para la mayoría de autores el comportamiento de las emisiones de HC y CO siguen siendo, en algunos casos, divergentes en sus tendencias.

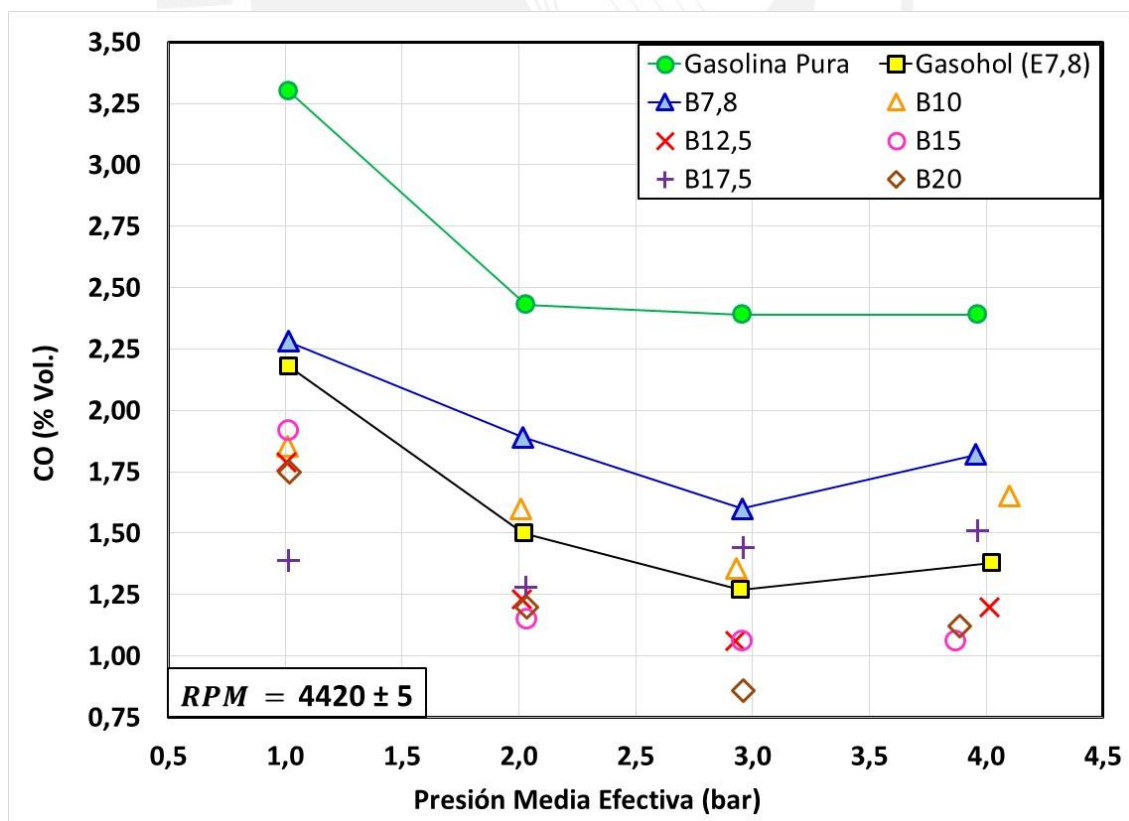


Figura 4. 18 – Monóxido de Carbono versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

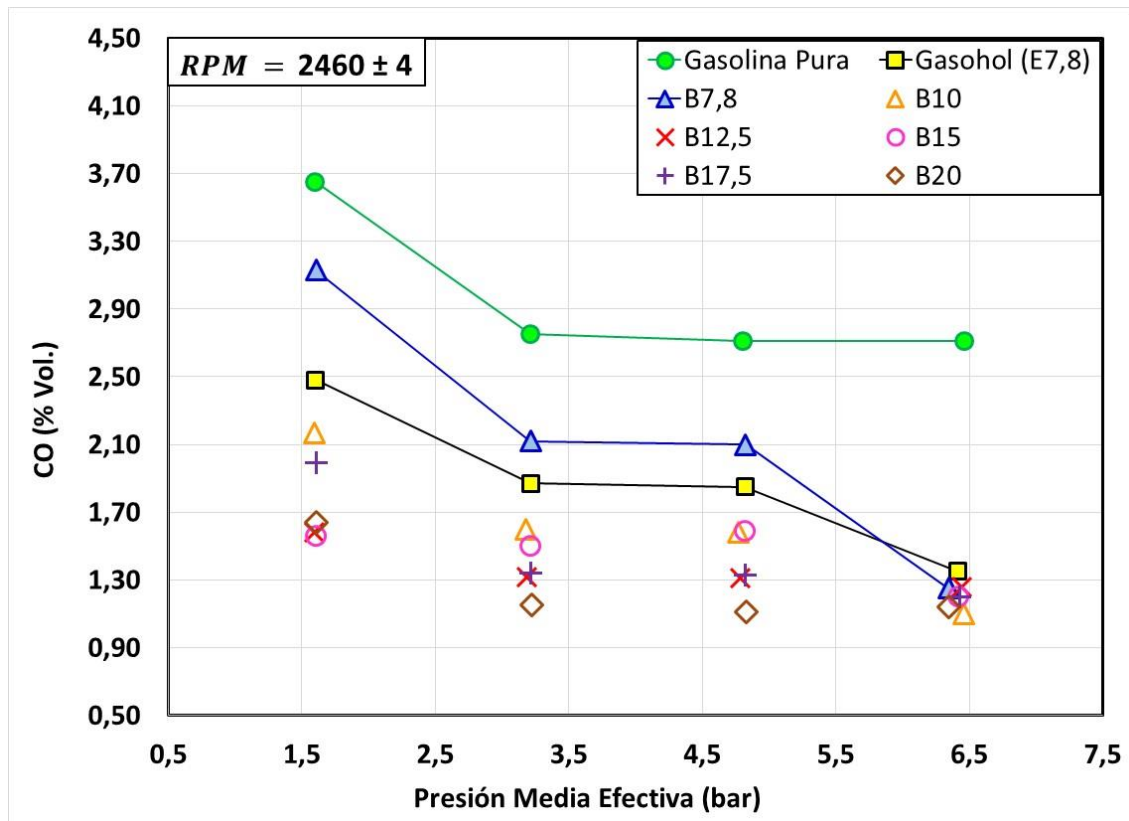


Figura 4. 19 – Monóxido de Carbono versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

Las Figuras 4. 20 y 4. 21, muestran las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) versus la presión media efectiva, en 4420 y 2460 rpm. En estos gráficos, hay una tendencia de aumentar el CO_2 según se incrementa la carga, en la mayoría de las mezclas y para las 3 velocidades. Sin embargo, hay excepciones como la de para 2460 rpm, ya que aquí tienden a aumentar hasta 4.5 bar y luego disminuye al llegar a 6.5 bar.

Para los tres combustibles básicos en nuestro ensayo, es decir, para la gasolina pura, el gasohol y la mezcla B7,8, notamos que el gasohol produce mayor emisiones de dióxido de carbono que los otros dos combustibles para las 3 velocidades ensayadas, en casi todos los puntos de carga, excepto a 2240 rpm y a una carga del 1,5 bar, en donde, solo en ese punto, es superada por la mezcla B7,8. El B7,8 se ubica en una posición intermedia entre los 3 combustibles mencionados a lo largo de toda la curva y para la 3 velocidades; y el combustible que posee las emisiones más bajas es la gasolina pura. La diferencias entre el gasohol y la mezcla B7,8 oscilan entre +0,7% y +8,5% para el gasohol. Por los resultados obtenidos en este trabajo y para los hallazgos de otras investigaciones citadas en la revisión de la literatura, al aumentar el CO las emisiones

de CO₂ deberían disminuir y esto es, efectivamente, lo que ocurre. Además, como podemos ver en las Figuras 4. 14 y 4. 15, el factor lambda trabaja la mayor parte en la zona de mezcla rica ($\lambda < 1$), por lo que el aire usado en la combustión es deficiente lo que originaría necesariamente una combustión incompleta, sin embargo esta el factor lambda aumenta conforme se incrementa la carga y esto potenciaría el aumento del CO₂, ya que se estaría acercando a la mezcla estequiométrica.

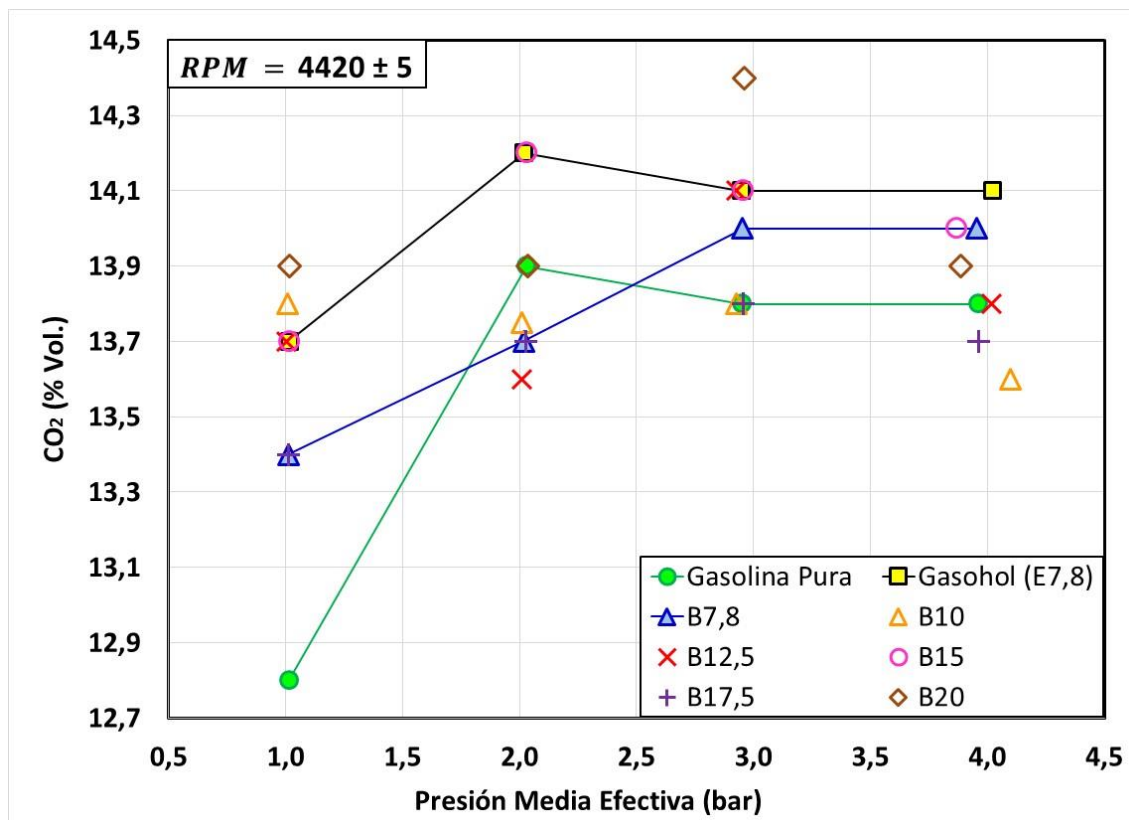


Figura 4. 20 – Dióxido de Carbono versus PME a 4420 rpm con diferentes mezclas.

Por otro lado, para las mezclas gasolina- butanol, a la velocidad de 4420 rpm, (Figura 4. 20), se nota que las mezcla B15 y B20 producen mayores emisiones de CO₂ que la B7,8; a su vez la mezcla B17,5 es menor que B7,8 y estas dos tendencias se mantienen a lo largo de todos los puntos de carga. En la Figura 4. 21, a partir de 50% de carga (3.5 bar) en adelante todas mezclas de butanol excepto la B12,5 tienen mayores emisiones que la mezcla B7,8.

Finalmente, las mayores emisiones fueron producidas por 3 diferentes mezclas a la vez, B20 a 3 bar de carga y 4420 rpm, B15 a 2,5 bar de carga y B17,5 a 3.5 bar, y esta dos últimas a la velocidad de 3440 rpm, las cuales tuvieron un valor igual a 14.4 %vol. Por otra parte, la menor emisión fue de 12,4% vol. para la gasolina pura a 2460 rpm y una pme de 1.5 bar..

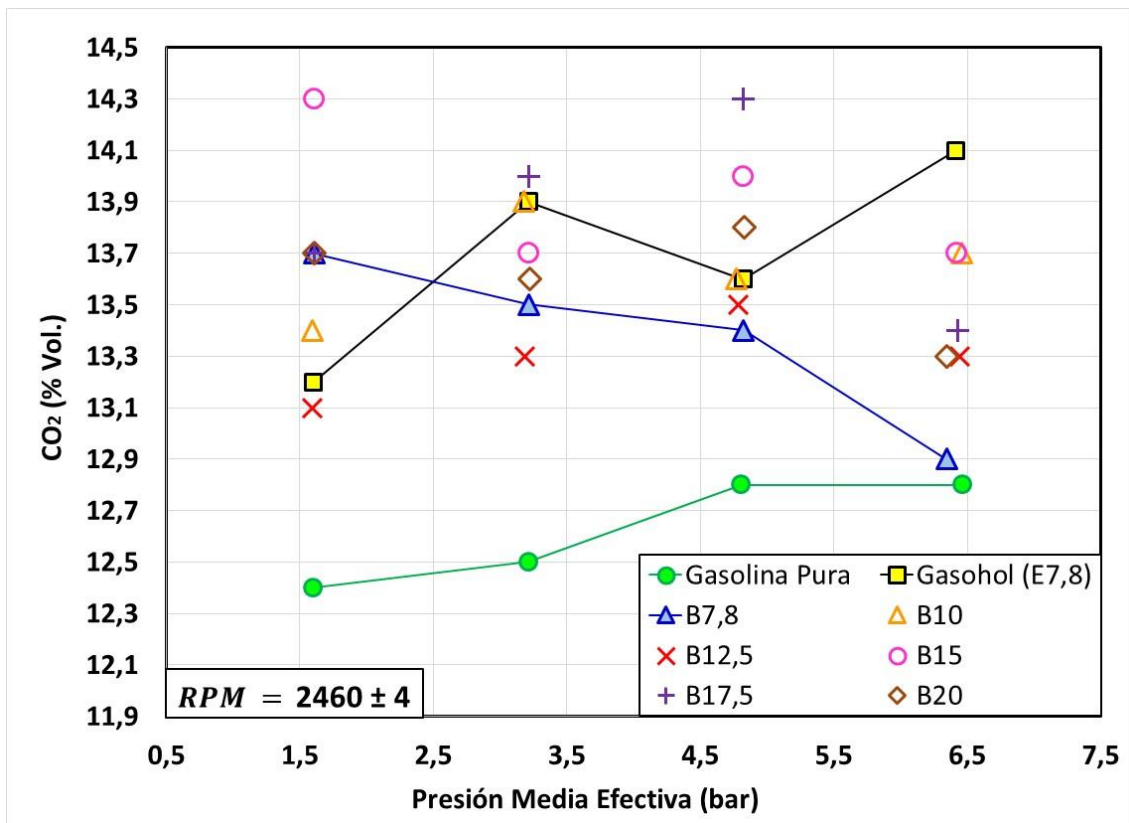


Figura 4. 21 – Dióxido de Carbono versus PME a 2460 rpm con diferentes mezclas.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Las condiciones ambientales tales como la temperatura ambiente y humedad relativa fueron variables debido a que los ensayos se realizaron a lo largo de 2 semanas.
- Notar que el analizador de gases marca AVL ha sido calibrado para gasolina, no para mezclas gasolina-butanol, por lo tanto puede conllevar a ciertos erros de medición. Por este motivo, sería recomendable realizarle una nueva calibración, de esta manera se verificaría el buen funcionamiento de sus sensores y, así, se podrían validar los datos de emisiones gaseosas. Sin embargo, las tendencias aquí encontradas son coherentes con los hallazgos de la literatura.
- Los ensayos fueron realizados en un motor de tecnología antigua, en el cual se suministra el combustible a través del carburador. Por lo tanto, sería conveniente realizar nuevamente los ensayos en motor con una tecnología más reciente como es el caso de la inyección electrónica.
- Se necesita controlar mejor tanto las mediciones de las rpm como las de consumo másico de combustible, ya que durante los ensayos realizados estas tuvieron una mayor variabilidad.
- Se debería dar facilidad para realizar ensayos físico-químicos a los combustibles, de esta manera poder corroborar sus propiedades y, por lo tanto, obtener cálculos más precisos y reales.
- El Laboratorio de Energía debería tener un modo de transportar los diferentes tipos de combustible, ya que debido a limitaciones de la legislación nacional se dificulta la obtención y traslado de estos.
- De modo general, en el Perú, se debería evaluar fuentes de producción de butanol y la viabilidad de su producción a escala industrial, para esto se debería realizar algún tipo de estudio.

CONCLUSIONES

- Mediante los ensayos técnicos realizados a la gasolina pura proveniente de la destilación del gasohol 90 para determinar la calidad de esta gasolina, se puede concluir que la separación del etanol del combustible fue exitosa, ya que no se encontró rastro alguno de contenido de etanol, por lo tanto se logró cumplir con uno de los objetivos específicos.
- Acerca del consumo específico de combustible (cec), que es un parámetro que depende tanto del consumo másico de combustible como de la potencia efectiva, la B15 y la B20 fueron las mezclas gasolina-butanol que tuvieron la mejor relación entre estas dos variables relacionadas, ya que a pesar que estuvieron un poco por debajo del promedio en cuanto a generación de potencia, si obtuvieron uno de los consumos de combustible más bajo. Esto generó que se obtuvieran unos consumos específicos de combustible muy parecidos al de la gasolina pura, para la mezcla B15 se generó en promedio una disminución de -1% y para la mezcla B20 un aumento promedio del +1% de variación, estas dos mezclas con respecto a la gasolina.
- En cuanto al rendimiento efectivo, tanto la mezcla B15 como la B20 superaron a las demás mezclas gasolina-butanol, incluso a la gasolina pura. Además, generaron un aumento promedio de +7% y +5%, respectivamente, con respecto a la gasolina pura. Por lo tanto, el combustible B15 y B20 transforman mejor la energía química en energía mecánica.
- Acerca de los gráficos de emisiones gaseosas de hidrocarburos no quemados para las mezclas gasolina-butanol, podemos concluir que hay una cierta tendencia a que aumenten los HC cuando se incrementa el porcentaje del contenido de butanol en el combustible (tendencia relacionada con el mayor calor latente del butanol, de acuerdo a diversos autores). Asimismo, la mezcla B7,8 para las velocidades de 4420 y 3440 rpm fueron la más similares a la gasolina con un aumento en promedio de +3%. En cambio, para la velocidad de 2460 rpm en la mezcla B7,8, se apreció menores emisiones que la gasolina pura en un promedio - 8%.

- De las gráficas de CO_2 , se concluye que la tendencia con respecto al aumento de butanol en la mezcla, se tiene el mismo efecto que para las emisiones de HC, es decir, las emisiones gaseosas de CO_2 aumentan conforme se incrementa el porcentaje de butanol en la mezcla. De acuerdo con esto, la mezcla butanol que generó menores emisiones de CO_2 fue la B7,8 con un aumento promedio de +3% con respecto a la gasolina pura.
- Respecto a las emisiones de CO ocurre todo lo contrario, ya que estas tienden a disminuir con el aumento del porcentaje de butanol. Esto se debe en parte, a la deficiencia o exceso de aire en el proceso de combustión, es decir de la relación aire-combustible. Además, Esto sería correcto, ya que durante el proceso de combustión el carbono libre intentará formar en mayor cantidad CO o CO_2 . Por lo tanto, las menores emisiones de CO se deben a los mayores aumentos de CO_2 o viceversa. En cuanto a la menor reducción de CO con respecto a la gasolina, está la originó la mezcla B20 con una disminución promedio de -56%.
- De modo general, un compromiso entre rendimiento y emisiones podría ser el uso de las mezclas B7,8 y B15. ya que en cuanto al consumo específico de combustible se encuentran en el promedio, siendo ligeramente mayor la B7,8. Además, a pesar de no estar entre las primeras en desarrollar la máxima potencia efectiva, la mezcla B15 es la segunda en tener mayor rendimiento efectivo seguido en cuarto lugar por B7,8. Por otra parte, en cuanto a la generación de las emisiones gaseosas tanto de HC como de CO_2 , la mezcla B7,8 posee una de las más bajas, pero una de más emisiones más altas de CO, en cambio la B15 conserva un valor promedio entre las demás mezclas.
- Por no existir una guía sobre el uso de butanol en el combustible, nos basaremos en el Worldwide Fuel Charter [40] que establece que los motores de encendido por chispa pueden utilizar hasta 10% de etanol en la gasolina sin tener que realizar ninguna modificación al sistema de inyección del motor. Esto nos servirá como premisa para concluir que el uso de B7,8 podría ser un valor recomendado. Sin embargo, muchos estudios resaltan que el butanol se puede mezclar en mayor porcentaje con la gasolina, por lo que el B15 sería otra opción si queremos ser más atrevidos y proporcionar un mejor rendimiento.

- Finalmente, al comparar el gasohol (E7,8) con la mezcla B7,8 , se observó que el B7,8 posee menores emisiones de HC y CO₂ (-6% y -2%, respectivamente) , pero mayores emisiones de CO (un promedio de +19%) para las 3 velocidades y cargas evaluadas. En cambio, en términos de rendimiento efectivo, se observó que el gasohol generaba un ligero aumento en casi todo el rango evaluado (un promedio de +3%), es decir para la mayoría de cargas y velocidades. En cambio, en cuestiones de consumo específico de combustible no se pudo determinar una tendencia clara, ya que en algunos puntos de funcionamiento era mayor para el gasohol y en otros para la mezcla B7,8. Con esto, se puede concluir que la mezcla B7,8 sería un combustible menos contaminante sin alterar significativamente el desempeño del motor.



BIBLIOGRAFÍA**[1] FUNDACION LABORAL INTERNACIONAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

2014 *Hacia una economía más verde y más justa en el Perú: propuestas sindicales.* Consulta: 5 de enero de 2015.

<http://www.sustainlabour.org/documentos/Economia-Verde-Peru_01oct14.pdf>

[2] SOCIEDAD PERUANA DE HIDROCARBUROS

2014 *Libro Blanco de los Hidrocarburos.* Primera edición. Consulta: 5 de enero de 2015.

<<http://www.sphidrocarburos.com/documentos/LBH/Parte%2002.pdf>>

[3] GESTION

2013 “Perú aumentó en un 22% la importación de combustibles”. Gestión. Lima, 17 de noviembre de 2013. Consulta: 5 de enero de 2015.

<<http://gestion.pe/economia/importacion-petroleo-crecio-22-este-ano-pese-que-peru-pais-superavit-capacidad-refineria-2081237>>

[4] LA REPUBLICA

2013 “Perú gastó más de S/. 50 mil mlls. en importar petróleo”. La República. Lima, 1 de mayo de 2013. Consulta 5 de enero 2015.

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

[5] GESTION

2014 “Producción de petróleo del Perú subiría hasta 70,000 barriles diarios al cierre del 2014”. Gestión. Lima, 17 de julio del 2014. Consulta: 6 de enero 2015.

<<http://gestion.pe/economia/produccion-petroleo-peru-subiria-hasta-70000-barriles-diarios-al-cierre-2014-2103277>>

[6] COELLO, Javier

2007 “Biocombustibles en el Perú: Más allá del tema energético”. *Palestra: Portal de Asuntos Públicos de la PUCP*. Lima. Consulta: 6 de enero de 2015.

<<http://www.solucionespracticas.org.pe/biocombustibles-en-el-peru-mas-alla-del-tema-energetico>>

[7] MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

2005 *Decreto Supremo N° 013-2005-EM*. Lima, 31 de marzo de 2005. Consulta: 8 de enero de 2015.

<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/Legislacion/Biocombustibles/Decreto%20Supremo%20No%20013-2005-EM.pdf>>

[8] FERNANDEZ, Alex

2007 “Butanol, ¿el combustible del futuro?”. *Eroski Consumer*. Consulta: 8 de enero de 2015.

<http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2007/09/16/166957.php>

[9] UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

2009 “Producción Microbiológica de Butanol”. *Biotecnología*. Cuernavaca, volumen 13, numero 3. Consulta: 9 de enero de 2015.

<http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Butanol.pdf>

[10] MACHADO, Cristina María.

s/f Los microorganismos como recursos genéticos para la producción de biocombustibles: Estado de desarrollo y líneas de investigación. Consulta: 9 de enero 2015.

<http://www.iica.int/esp/programas/Innovacion/Documents/Resumen_Machado_Embrapa.pdf>

[11] TIPIAN, Giancarlo

2015 *Detección Análisis experimental del uso de mezclas etanol-gasolina en motores de encendido por chispa.* Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Consulta: 15 de enero de 2015.

<<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6163>>

[12] MATOS SALINAS, Pablo José

2002 *Detección de adulteraciones de combustibles de uso en el parque automotor peruano.* Tesis de licenciatura en Ingeniería con mención en Ingeniería Química. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería. Consulta: 15 de enero de 2015.

<http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/ingenie/matos_sp/contenido.htm>

[13] POSTIGO, Juan y Juan Francisco CRUZ

2010 *Termodinámica aplicada.* Segunda edición. Lima: W.H Editores.

[14] RIVAS MEZA, Víctor y Blanca SANTIN ICHIKAWA

2006 *Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial.* Tesis de licenciatura con mención en Ingeniería Química Petrolera. México D.F: Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Departamento de Ingeniería. Consulta: 20 de enero de 2015.

<<http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/8241/1/RIVAS%20MEZA.pdf>>

[15] CERUTTI, Alberto Ángel

2001 *Refinación del petróleo. Tomo I.* Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo. Consulta: 27 de agosto de 2015.

<<http://www.fcai.uncu.edu.ar/upload/LIBRO%20TOMO%201.pdf>>

[16] VALVERDE, María Elena y Víctor OLALDE PORTUGAL

2009 “Rutas, procesos y microorganismos implicados en la producción de biocombustibles”. *Id@s CONCYTEG*. Volumen 4, número 54. Consulta 12 de febrero de 2015

<http://concyteg.gob.mx/ideasConcyteg/Archivos/54052009_RUTAS_PROD_BIOCOMBUSTIBLE.pdf>

[17] MACHADO, C.

2010 “Technical characteristics and current status of butanol production and use as biofuel”. Ponencia presentada en el V Seminario Latinoamericano y del Caribe de Biocombustibles. Santiago. Consulta 13 de febrero de 2015

<http://www.olade.org/biocombustibles/Documents/Ponencias%20Chile/Sesion%205_C%20Machado_Enbrapa_Brasil.pdf>

[18] CHAU, Jin, Liu HAIFENG, Yao MINGFA, Lee CHIA-FON y Ji JING

2012 “Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Tianjin, volumen 15, pp. 4080-4106.

[19] LAREO, Claudia

2012 “Biobutanol: actualidad y perspectivas”. Ponencia presentada en el V Encuentro Regional Encuentro Regional XXVI Congreso Interamericano de Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Montevideo. Consulta el 14 de febrero 2015.

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

[20] UYTTEBROEK, Maarten, Wouter VAN HECKE y Karolien VANBROEKHOVEN

2012 “Sustainability metrics of 1-butanol”. *Catalysis Today*. Amberes, volumen 239, pp. 7-10.

[21] **GU, Xiaolei, Zuohua HUANG, Jian CAI, Jing GONG, Xuesong WU y Chia-fon LEE**

2012 "Emission characteristics of a spark ignition engine fueled with gasoline-n-butanol blends". *Fuel*. Illinois, volumen 93, pp. 611-617.

[22] **ATSUMI, Shota, Anthony F. CANN, Michael R. CONNOR, Claire R. SHEN, Kevin M. SMITH, Mark P. BRYNILDSEN, Katherine J.Y. CHOU, Taizo HANAI, James C. LIAO**

2007 "Metabolic engineering of Escherichia coli for 1-butanol production". *Metabolic Engineering*. Los Angeles, volumen 10, pp.305-311.

[23] **SHAPIRO, Howard N. y Michael J. MORAN**

2004 *Fundamentos de Termodinámica Aplicada*. Segunda edición. Barcelona: Editorial Reverté, S.A

[24] **MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS**

s/f *Preguntas Frecuentes en Relación al Gas Natural en el Perú*. Consulta 8 de enero de 2015.

<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/gasnatural.pdf> >

[25] **SABOGAL, David**

2014 *Inyección carburada y eléctrica* [diapositivas]. Consulta: 16 de febrero.

<<https://prezi.com/szn-lzbunslc/inyeccion-carburada-y-electrica/>>

[26] **KUANG, Lilibeth**

2013 Motores de gasolina de encendido por chispa, descripción del funcionamiento de los cuatro tiempos de carreras. Investigación. Panamá. Consulta: el 15 de enero de 2015

< <http://es.slideshare.net/ILiIK/motor-de-encendido-por-chispa> >

[27] **MECANICA Y MOTORES**

s/f El ciclo Otto. Consulta: 21 de febrero de 2015.

<<http://www.mecanicaymotores.com/el-ciclo-otto.html> >

- [28] **DERNOTTE, Jeremie, Christine MOUNAIM-ROUSSELLE, F. Halter y P. Seers.**
2010 "Evaluation of Butanol-Gasoline Blends in a Port Fuel-injection, Spark-Ignition Engine". *Oil & Gas Science and Technology*. Orleans, volumen 65, pp 345-351.
- [29] **ELFASAKHANY, Ashraf**
2014 "Experimental study on emissions and performance of an internal combustion engine fueled with gasoline and gasoline/n-butanol blend". *Energy Conversion and Management*. La Mecca, volumen 88, pp. 277-283.
- [30] **BROUSTAIL, Gilles y otros**
2012 "Comparisson of regulated and non-regulated pollutants with iso-octane/butanol and iso-octane/ethanol blend in a port-fuel injection Spark-Ignition engine". *Fuel*. Orleans, volumen 94, pp. 251-261.
- [31] **ALASFOUR, Fuad Nesf**
1997 " NO_x EMISSION FROM A SPARK EGNITION ENGINE USING 30% ISO-BUTANOL-GASOLINE BLEND: PART 1- PREHEATING INLET AIR". *Applied Thermal Engineering*. Ciudad de Kuwait, volumen 18, número 5 pp. 245-256.
- [32] **IRIMESCU, Adrian**
2012 "Performance and fuel conversion efficiency of a spark ignition engine fueled with iso-butanol". *Applied Energy*. Timisoara, volumen 96, pp. 477-483.
- [33] **Szwaja, Joe y Jeffrey D. NABER**
2010 "Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine". *Fuel*. Michigan, volumen 89, pp. 1573-1582.
- [34] **REGALBUTO, Carol y otros**
2012 "Experimental Investigation of Butanol Isomer Combustion in Spark Ignition Engines". *SAE International*. Illinois.

[35] CONGRESO DE LA REPUBLICA

- 2003** *Ley N° 28054. Ley de promoción del mercado de biocombustibles.* Lima, 08 de agosto de 2003. Consulta: 8 de enero de 2015.

<<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgh/legislacion/l28054.pdf>>

[36] MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

- 2007** *Decreto Supremo N° 021-2007-EM.* Lima, 20 de abril de 2007. Consulta: 9 de enero de 2015.

<<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Hidrocarburos/Legislacion/Biocombustibles/Decreto%20Supremo%20No%20021-2007-EM.pdf>>

[37] MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

- 2011** *Decreto Supremo N° 024-2011-EM.* Lima, 13 de mayo de 2011. Consulta: 9 de enero de 2015.

<http://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-z631964u28znz0z0sz-Decreto_Supremo_No_024-2011-EM.pdf>

[38] INDECOPI

- 2012** *NTP 383.066. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.* Potencia neta, torque neto y consumo específico neto de combustible. Lima, 12 de setiembre.

[39] CASTILLO Edith y Adalberto Maestanza

- 2012** “Introducción a la Teoría de Incertidumbres”. Material del laboratorio de Física 1. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú.

[40] WORLDWIDE FUEL CHARTER COMMITTEE

- 2009** *ETHANOL GUIDELINES.* Marzo. Consulta: el 02 de Noviembre de 2015

<<http://oica.net/wp-content/uploads/ethanol-guideline-final-26mar09.pdf>>