

Capítulo 1

Estudio Comparativo del Desempeño de un Motor de Combustión Interna alimentado con diferentes Biocombustibles

La mayoría de los motores de combustión interna alternativos (MCI) obtienen su energía de la combustión de combustibles derivados del petróleo en mezcla con aire, lo cual convierte la energía química del combustible en energía mecánica. Sin embargo, el consumo de estos combustibles presenta dos problemas graves. El primero de ellos, es su limitada disponibilidad en un futuro cercano. El segundo, se encuentra asociado con el consumo masivo de combustibles fósiles, lo cual impacta de forma negativa todo tipo de vida en la tierra.

En las últimas décadas, la investigación y el desarrollo de actividades relacionadas con el transporte han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de tecnologías eficientes y limpias, sin dejar de lado la seguridad. Para ello, se han desarrollado vehículos eléctricos, vehículos eléctricos híbridos y de pilas de combustible como posibles sustitutos de los vehículos convencionales, sin embargo, existen enormes áreas de oportunidad en estos modelos. Por otro lado, el uso de combustibles alternativos (biocombustibles) en los motores actuales, representa una alternativa para reducir el uso de combustibles fósiles. En este trabajo, se realiza un estudio comparativo entre los combustibles tradicionales derivados del petróleo de uso común en MCI y algunos combustibles alternativos que tienen posibilidades de sustituirlos, o complementarlos, en un futuro.

1.1. Propiedades y Características de los Combustibles usados en MCIA

Los combustibles son sustancias que reaccionan con el oxígeno del aire de forma fuertemente exotérmica. Dicho proceso, denominado combustión, permite transformar la energía asociada a la estructura molecular de los reactantes en energía térmica que se aporta a los productos. En los MCIA el proceso de combustión no es continuo, como en un motor de flujo continuo o como una turbina de gas, sino que es intermitente. Por lo tanto, los combustibles deben cumplir una serie de requisitos para satisfacer adecuadamente estas y otras exigencias:

- En motores de encendido provocado (MEP), el combustible debe evaporarse fácilmente y formar una mezcla homogénea con el aire previo a su inyección dentro del cilindro (combustión de premezcla).
- En motores de encendido por compresión (MEC), el combustible debe permitir una buena pulverización para facilitar la rápida combustión por difusión.
- El combustible, independientemente de la temperatura ambiente, debe facilitar un arranque rápido y seguro del motor; evaporación en MEP y viscosidad adecuada en MEC.
- Para asegurar una combustión completa con las menores emisiones posibles, los combustibles deben poseer características adecuadas.
- El combustible debe contribuir a evitar el desgaste y la corrosión de las partes internas del motor.

Los MCIA permiten el uso de casi todo tipo de combustibles: líquidos, sólidos o gaseosos; siempre y cuando cumplan las características mencionadas anteriormente. Por consiguiente, para su correcta aplicación en MCIA, se requiere de un buen conocimiento de sus propiedades físico-químicas. Las características físicas de un combustible, son aquellas que pueden afectar su capacidad para formar una mezcla gaseosa aire-combustible, apropiada para el tipo de motor en el que se vaya a utilizar; además de influir en su almacenamiento, transporte y criterios de venta. Las características químicas, por su parte, afectan su capacidad y comportamiento durante la combustión y seguridad durante su almacenamiento.

A continuación, se hace una pequeña descripción de las principales características, además de una comparación entre los combustibles utilizados en

este trabajo. El estudio se basa en una comparativa de las propiedades de los combustibles alternativos considerados, respecto a la gasolina y al diesel de uso convencional.

Estado: Los combustibles pueden clasificarse según su origen (fósil y no fósil), grado de preparación (natural o elaborado) o estado de agregación (sólido, líquido y gaseoso). El estado del combustible influye en su almacenamiento y distribución y, por lo tanto, directamente en su costo. Los combustibles gaseosos se mezclan más fácilmente con el aire y además no se necesita vaporizarlos previamente a la mezcla.

Masa molecular: Es la suma de los pesos atómicos de los átomos que forman una molécula. Su conocimiento permite calcular la relación estequiométrica *aire/combustible* de la mezcla que tendrá lugar en la reacción de combustión.

Poder calorífico: El poder calorífico del combustible, se define como la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de combustión se enfrían a temperatura ambiente. Se denomina poder calorífico inferior, PCI, cuando el agua sale como vapor en los productos de la combustión y poder calorífico superior, PCS, cuando el agua en los gases de combustión se condensa por completo, de manera que también se recupera el calor de vaporización. La diferencia entre estos dos poderes caloríficos es igual al producto de la cantidad de agua y la entalpía de vaporización del agua a temperatura ambiente. La eficiencia de los MCIA normalmente se basan en el PCI, pues regularmente el agua sale en forma de vapor en los gases de escape, ya que resultaría impráctico tratar de recuperar el calor de vaporización. También se puede definir al poder calorífico como la diferencia de entalpías estándar de formación de los productos menos la de los reactivos (*a T= 25°C*). En las Figuras 1.1 y 1.2 se compara el poder calorífico inferior de diferentes combustibles.

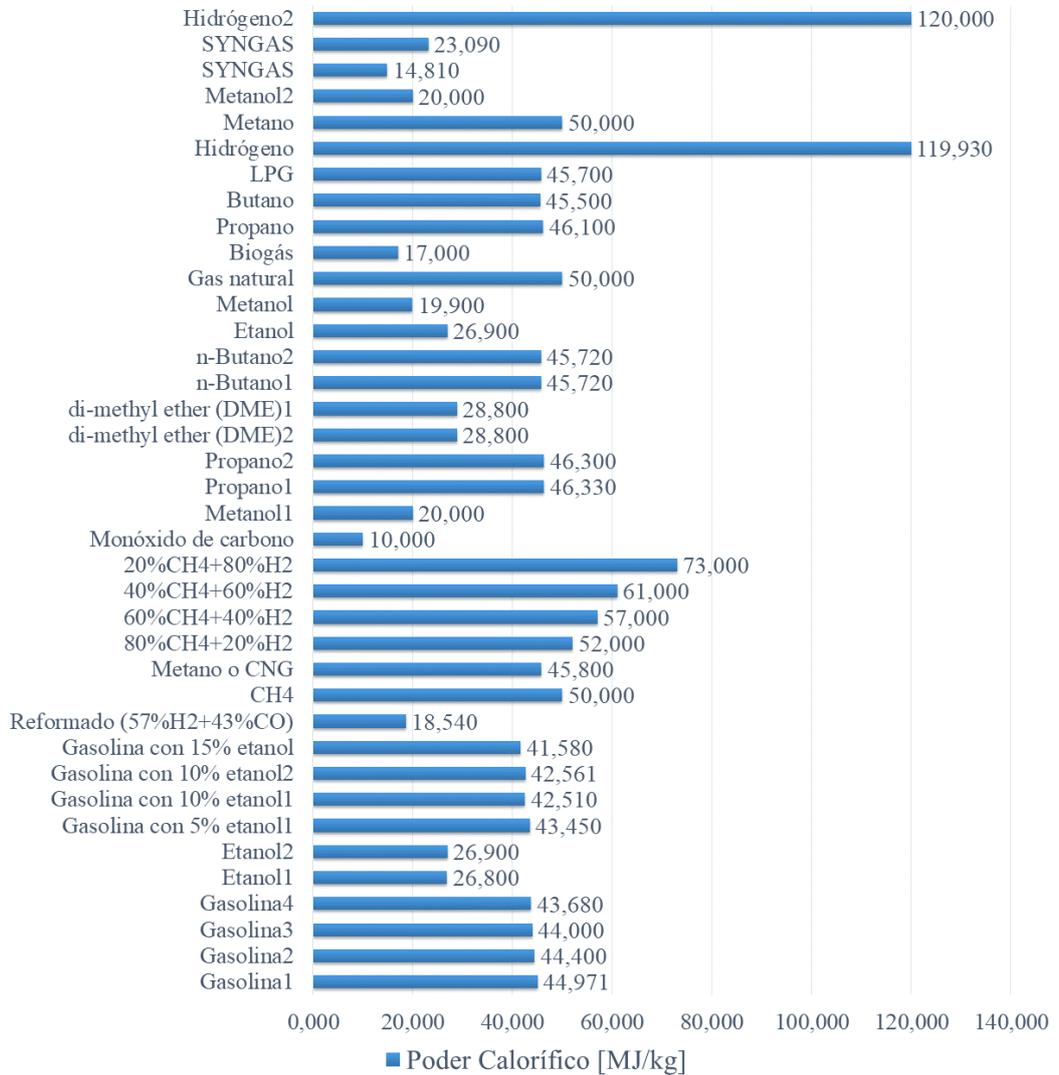


Figura 1.1: Poder calorífico inferior de los combustibles usados en MEP [MJ/kg].

Como se observa en la Figura 1.1, los combustibles usados en los MCIA tienen valores muy variables de PCI. Para los combustibles usados en los MEP [Figura 1.1], el monóxido de carbono es el de menor PCI, siendo alrededor de 4.5 veces menor que el de la gasolina, mientras que el de mayor PCI es el hidrógeno, que representa 2.66 veces más que la gasolina. Por otro lado, para los combustibles usados en los MEC [Figura 1.2], ambos biocombustibles (biodiesel y bio-oil hidrotratado) tienen un PCI menor que el del

diésel (véase Ecuación 1.1). Sin embargo, estos valores no limitan la aplicación de los combustibles alternativos, debido a que una evaluación adecuada del contenido energético del proceso de combustión de un MCIA, es el PCI de la mezcla; dónde, $(AC)_{est}$ es la relación aire/combustible estequiométrica del combustible.

$$PCI_{mezcla} = \frac{PCI_{combustible}}{(AC)_{est} + 1} \quad (1.1)$$

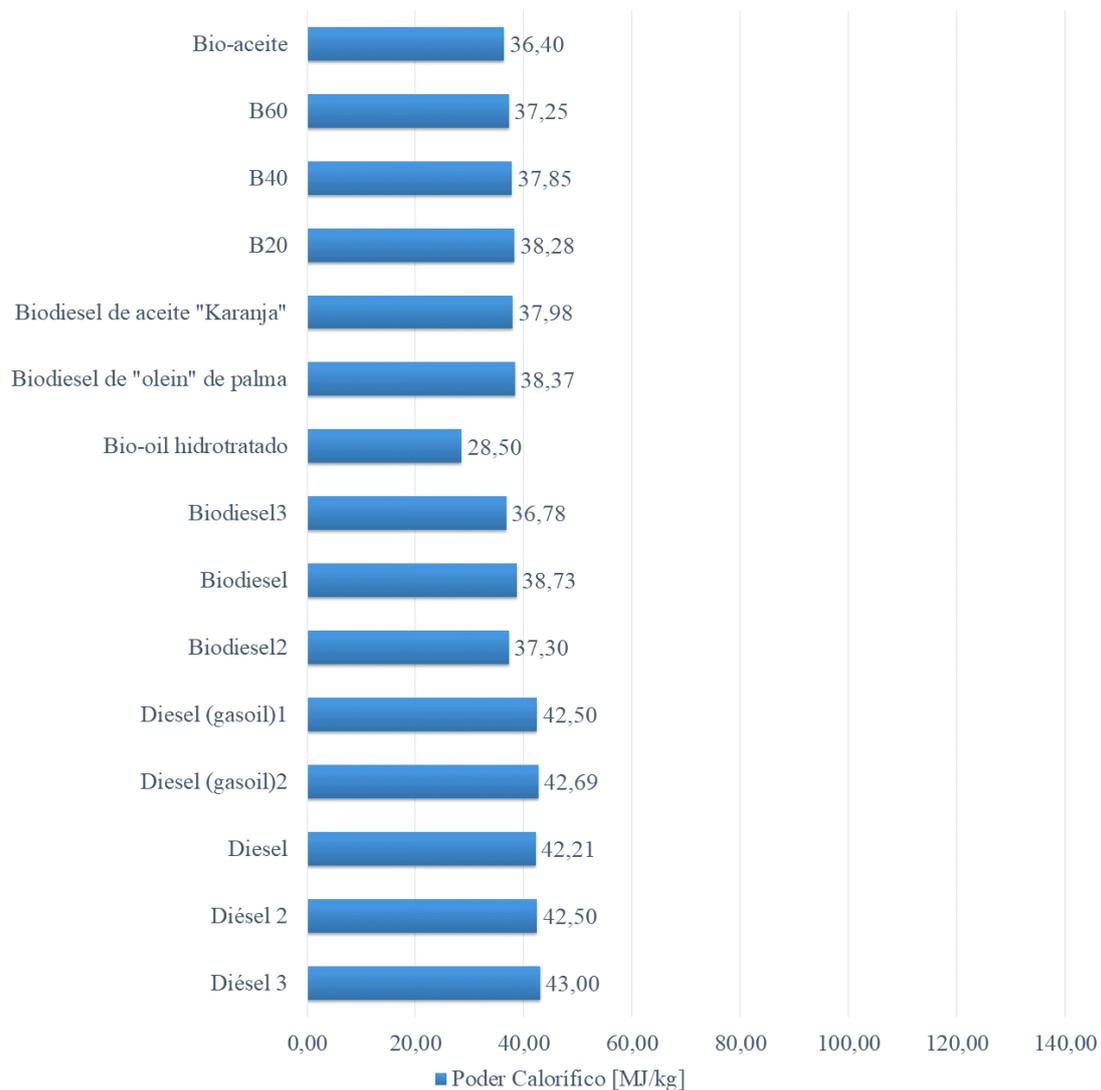


Figura 1.2: Poder calorífico inferior de los combustibles usados en MEC [MJ/kg].

Las Figuras 1.3 y 1.4 muestran una comparativa entre el PCI de la mezcla para los diferentes combustibles analizados. De acuerdo con estos datos, contrario a lo que ocurre con el PCI del combustible, el PCI de la mezcla no presenta diferencias significativas con respecto a la gasolina y el diesel, estando entre 2,34 y 3,40 MJ/kg. Como se mencionó anteriormente, el PCI del biogás es de 2.93 veces menor que el de la gasolina; sin embargo, considerando la mezcla con el aire, esta disminuye a sólo 1.2 veces. Para el caso del hidrógeno, la diferencia entre su PCI y el de gasolina disminuye, de 2.66 a 1.2, considerando la mezcla con aire.

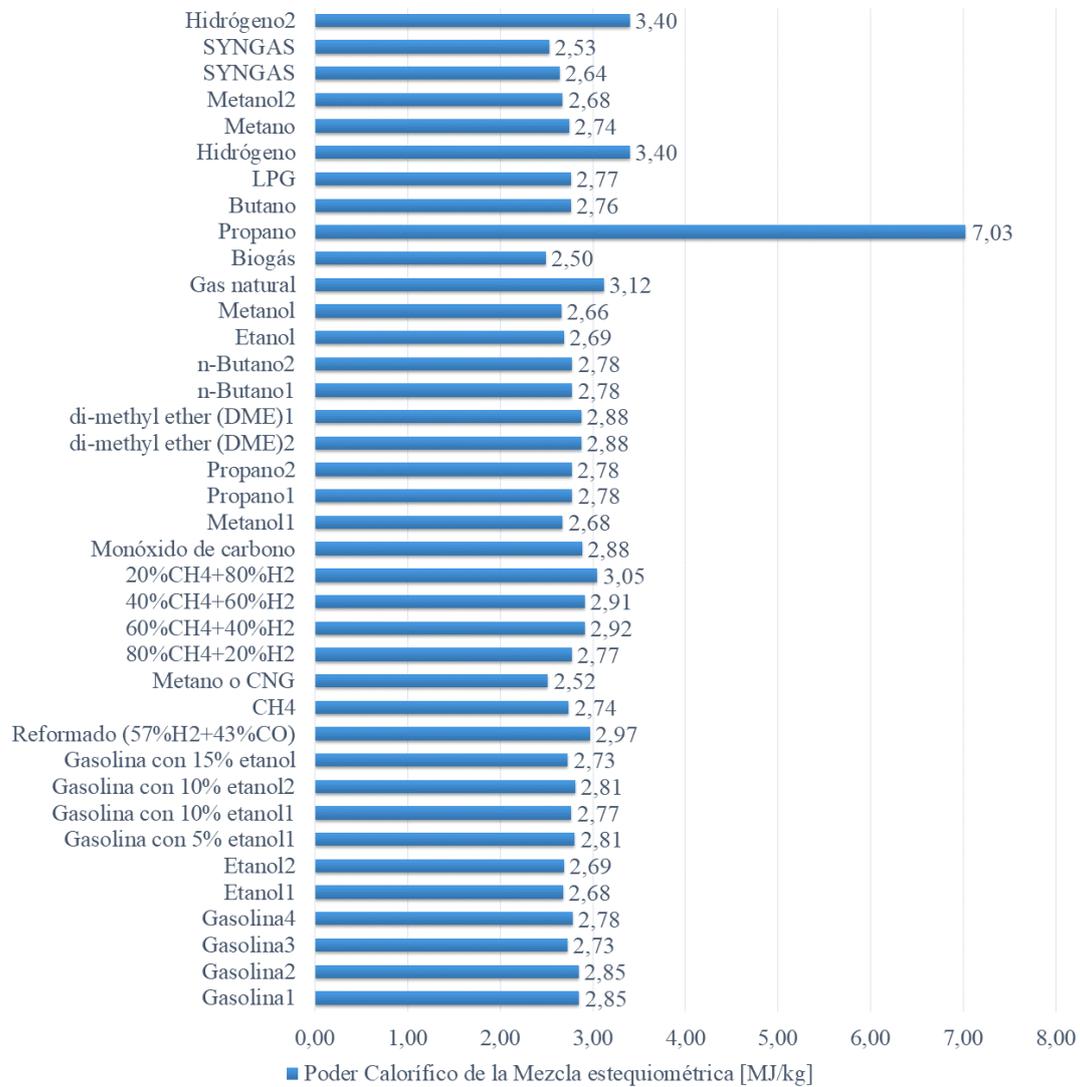


Figura 1.3: Poder calorífico inferior de la mezcla de los diferentes combustibles con aire en MEP [MJ/kg].

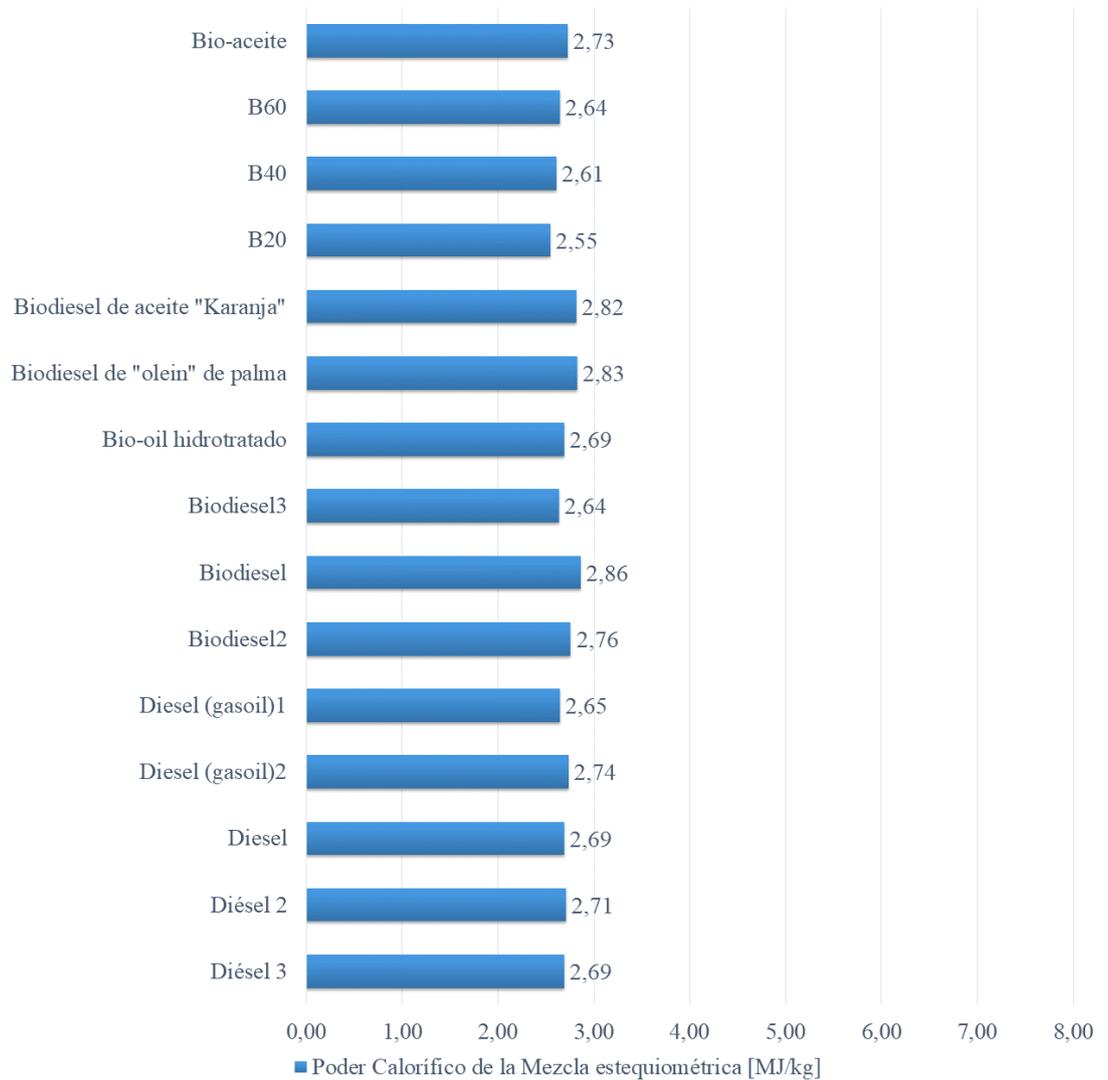


Figura 1.4: Poder calorífico inferior de la mezcla de los diferentes combustibles con aire en MEC [MJ/kg].

1.1.1. Propiedades del aire

El aire es, en la mayoría de los casos, la fuente principal de oxígeno necesario para realizar el proceso de combustión en un MCIA. En la Tabla 1.1 se muestran las proporciones relativas de los principales componentes del aire seco [?].

Cuadro 1.1: Principales constituyentes del aire seco según Heywood [?].

Gas	Volumen [ppm]	Peso molecular	Fracción molar	Relación molar
O_2	209 500	31,998	0.2095	1
N_2	780 900	28,012	0.7905	3.773
Ar	9 300	38,948	-	-
CO_2	300	40,009	-	-
<i>Aire</i>	1 000 000	28,962	1.0000	4.773

Ya que el nitrógeno atmosférico contiene trazas de otras especies, su peso molecular es ligeramente diferente al del peso molecular del nitrógeno puro. En este trabajo se usará un valor de 28,16 para el peso molecular del nitrógeno atmosférico y una composición del aire de 3,773 moles de nitrógeno por mol de oxígeno [?].

1.1.2. Relación estequiométrica aire/combustible

En un proceso de combustión ideal de un hidrocarburo, si se cuenta con oxígeno suficiente, el carbono e hidrógeno que componen el combustible pueden oxidarse completamente en dióxido de carbono y agua, respectivamente. Para un mol de un hidrocarburo genérico, el balance para la reacción de combustión completa puede expresarse de acuerdo con la Ecuación 1.2, en la cual, se supone que reacciona un mol de $C_xH_yO_z$ con B moles de aire:



$$\text{Donde: } B = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right).$$

Para obtener la relación estequiométrica en términos másicos, es necesario multiplicar cada uno de los términos de la Ecuación 1.2 por sus respectivos pesos moleculares (PM_i). La relación que existe entre la masa de aire y la masa de combustible necesaria para oxidar completamente el combustible, se denomina relación estequiométrica aire/combustible, $(AC)_{est}$, que de forma genérica se puede expresar como se indica en la Ecuación 1.3. La Figura 1.5 muestra valores de $(AC)_{est}$ para varios combustibles.

$$(AC)_{est} = \frac{2 \cdot B \cdot PM_O + 2(3,773) \cdot B \cdot PM_N}{x \cdot PM_C + y \cdot PM_H + z \cdot PM_O} \quad (1.3)$$

Con la relación $(AC)_{est}$ se puede hacer un análisis del flujo másico de los combustibles alternativos respecto a los tradicionales, que se necesita para obtener una mezcla de igual riqueza. Para su comparación se utilizó la Ecuación 1.4; donde \dot{m}_f es el flujo másico de combustible de referencia (sea gasolina o diesel), mientras que \dot{m}_{ref} es el flujo másico del combustible alternativo.

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{ref}} = \frac{(AC)_{est} \cdot (gasolinao diesel)}{(AC)_{est} \cdot combustiblealternativo(MEPoMEC)} \quad (1.4)$$

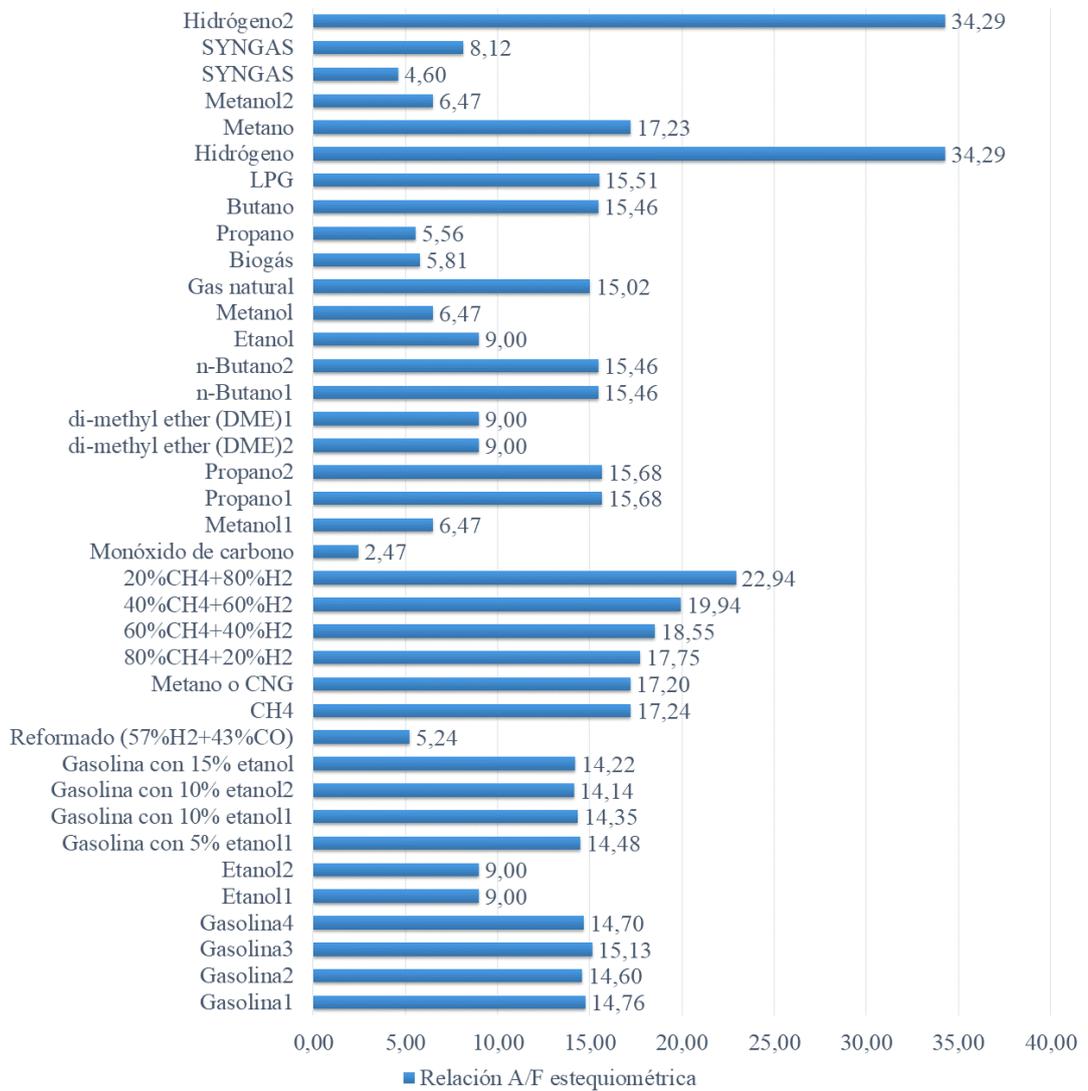


Figura 1.5: Relación $(AC)_{est}$ de los combustibles.

La Figura 1.6 muestra la relación del flujo másico de cada combustible. Por ejemplo, para obtener una mezcla de igual riqueza con respecto a la gasolina se necesita 2.54 veces más flujo másico de biogás. En el caso del metano se necesitarían 0.86 veces el flujo másico de gasolina; esto es, 0.12 menos caudal de metano. Para los MEC, se necesitarían 1.16 y 1.56 veces más biodiesel y bio-oil hidrotratado, respectivamente, que el flujo másico del diesel como se ilustra en la Figura 1.7.

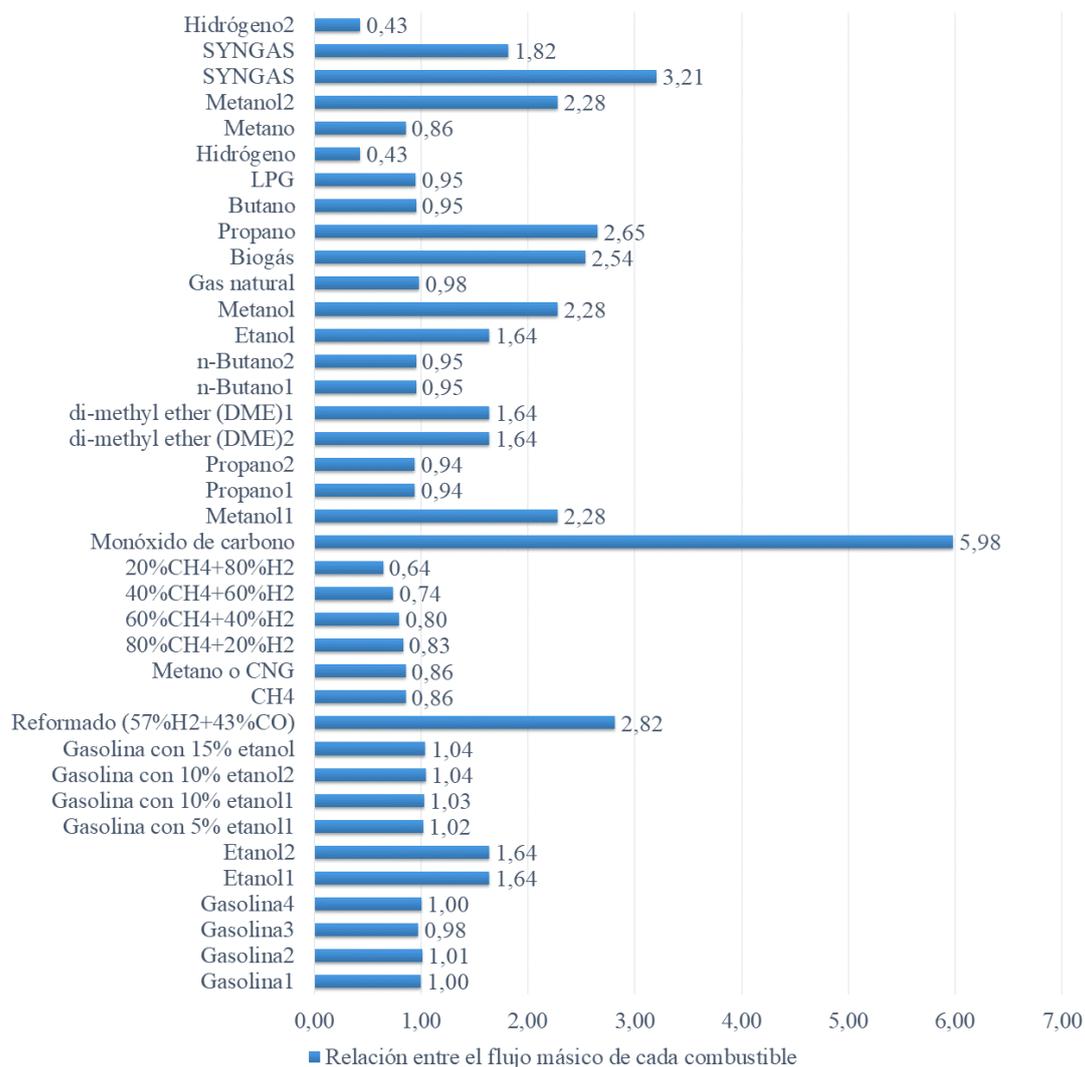


Figura 1.6: Relación entre el flujo másico de cada combustible con respecto al combustible de uso convencional para MEP (Gasolina).

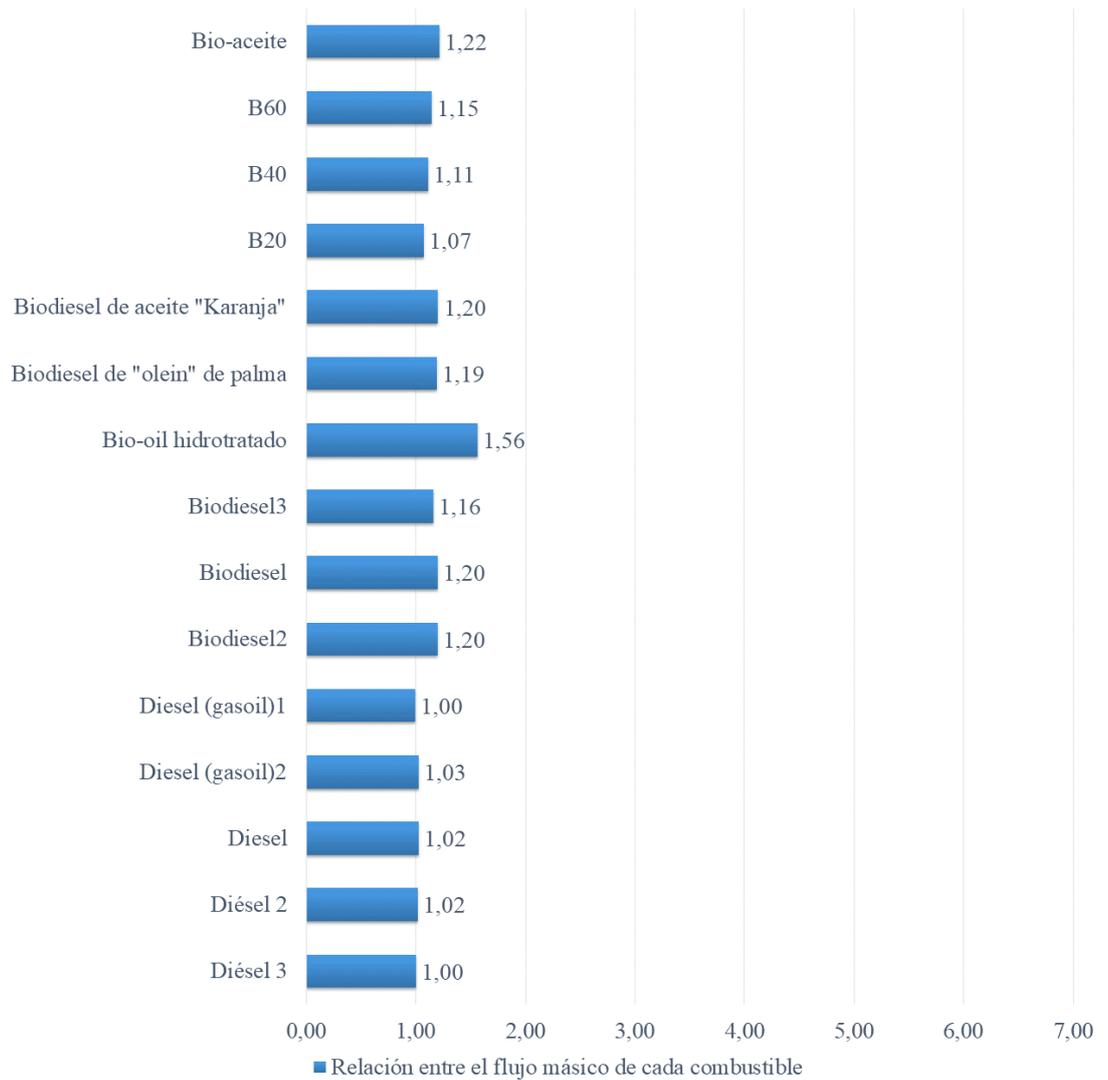


Figura 1.7: Relación entre el flujo másico de cada combustible con respecto al combustible de uso convencional para MEC (Diesel).

1.2. Efecto del tipo de Combustible y la Relación aire-combustible

En los MEP la presencia del combustible gaseoso (y vapor de agua) en el sistema de admisión, reduce la presión parcial del aire por debajo de la presión de la mezcla. Para mezclas de aire, vapor de agua y combustible gaseoso, se puede considerar que la presión en el colector de admisión es la suma de las presiones parciales de cada componente.

Para los combustibles líquidos, es menor la influencia en la caída de presión en la admisión (y por tanto el rendimiento volumétrico). Generalmente también ocupan un volumen muy pequeño del sistema de admisión, lo que permite que entre más aire. Lo contrario ocurre para los combustibles gaseosos, ya que requieren más volumen dentro del colector de admisión durante su inyección. En teoría este hecho produce una caída de potencia en torno al 9.5 % que es muy difícil de recuperar [?].

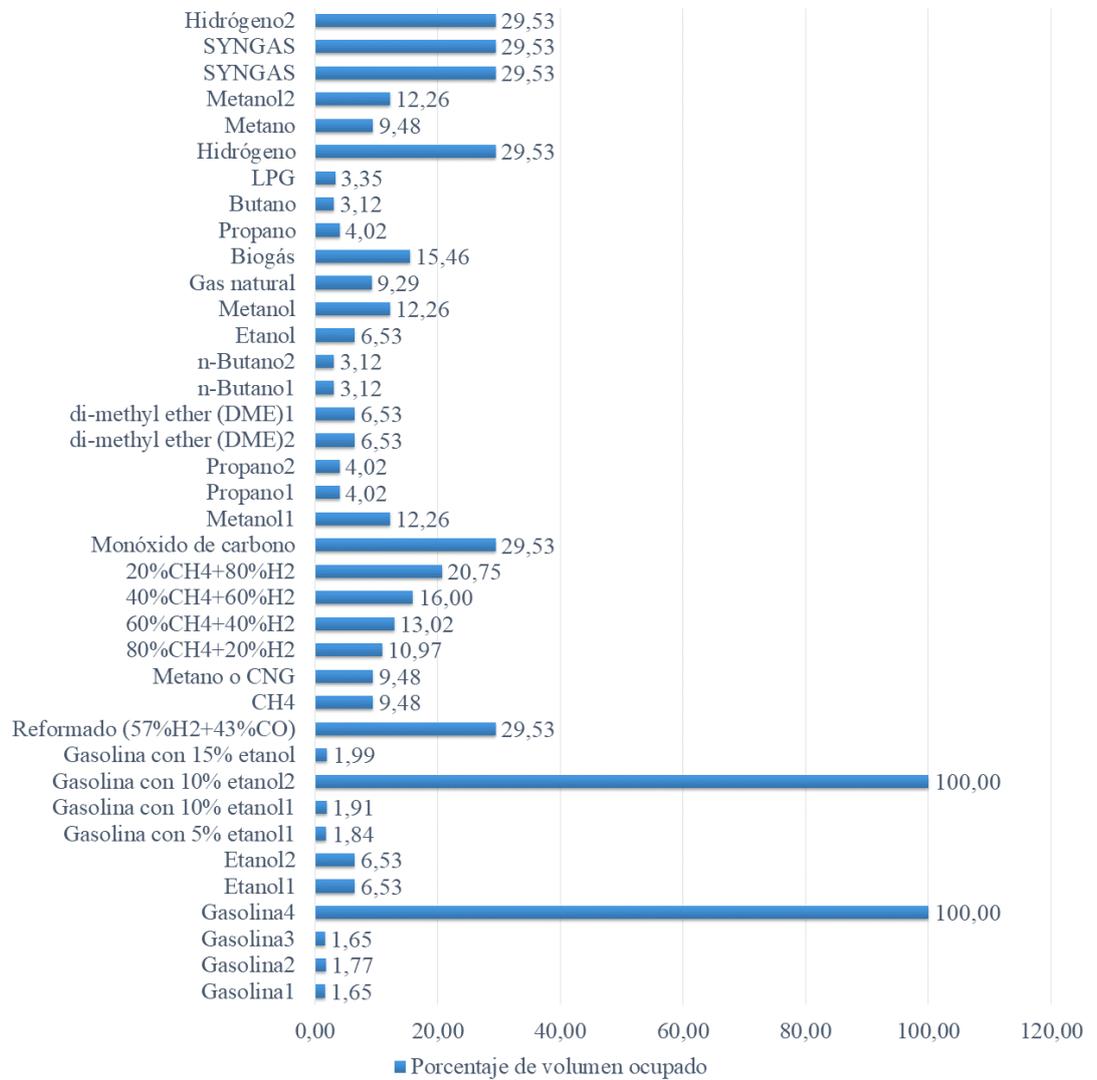


Figura 1.8: Porcentaje de volumen ocupado por cada combustible respecto al total de la mezcla para MEP.



Figura 1.9: Porcentaje de volumen ocupado por cada combustible respecto al total de la mezcla para MEC.

El volumen que desplaza el combustible respecto al de la mezcla aire-combustible, se obtuvo de acuerdo con la Ecuación 1.5. Como se puede observar en las Figuras 1.8 y 1.9 los combustibles gaseosos ocupan aproximadamente entre 2% - 28% más volumen que la gasolina, y para los combustibles líquidos, el etanol ocupa un 5% más volumen que la gasolina, aproximadamente.

$$\%V = \frac{\text{molesdecombustible}}{\text{molesdelamezcla}} = \frac{1}{(1 + 4,773 \cdot B)} * 100 \quad (1.5)$$

1.2.1. Efecto en las Prestaciones del Motor

Para analizar el efecto de los diferentes combustibles en las prestaciones del motor, se utilizó un modelo termodinámico basado en el ciclo dual de aire estándar, el cual se discutió en el Capítulo 3 del presente trabajo. A pesar de su simplicidad, este modelo incluye elementos que permiten estimar las prestaciones de un MCIA con bastante exactitud, sin los elevados costos de la experimentación [?]. La Tabla 1.2 muestra las características de los motores utilizados para el análisis de los combustibles.

Cuadro 1.2: Característica de los motores empleados [?].

Parámetros Geométricos	MEP	MEC
Número de cilindros	4	6
Diámetro del pistón [mm]	70	108
Carrera [mm]	72	125
Relación de compresión	9,5	16,5

En primer instancia, el modelo de trabajo se debe ajustar a los resultados experimentales de cada motor; las Figuras 1.10 y 1.11 muestran la comparación de los resultados del modelo con los resultados experimentales de cada motor; donde se puede observar que el modelo teórico se ajustó a los datos experimentales, validándose así la confiabilidad de éste.

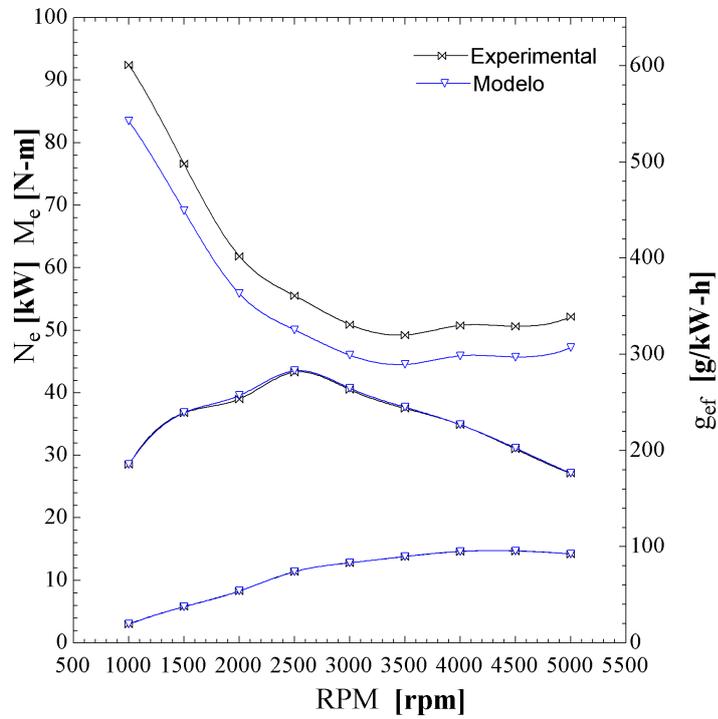


Figura 1.10: Comparación entre el consumo específico, el par y la potencia experimentales con los resultados del modelo termodinámico usado en este trabajo para MEP.

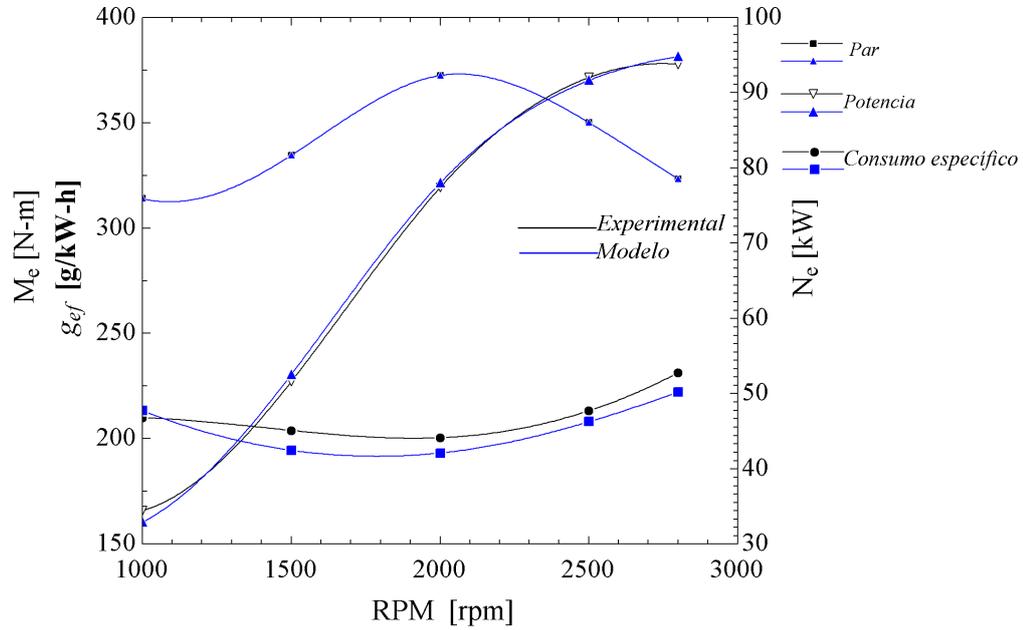


Figura 1.11: Comparación entre el consumo específico, el par y la potencia experimentales con los resultados del modelo termodinámico usado en este trabajo para MEC.

Una vez ajustado el modelo, se procedió al análisis del efecto de cada uno de los combustibles alternativos sobre las prestaciones del motor correspondiente. Para efectos de estos estudios se podrán observar en las siguientes secciones donde se presentan los resultados en MEP con los combustibles correspondientes así como para los MEC con los combustibles estudiados en éste.

1.3. Efectos de los combustibles alternativos en el MEP

La sección presenta el resumen de las principales características y parámetros de los combustibles analizados para el MEP que se modeló y mencionó en la sección anterior, en la Tabla 1.3 nos muestran los combustibles que se analizarán con el modelo.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP19

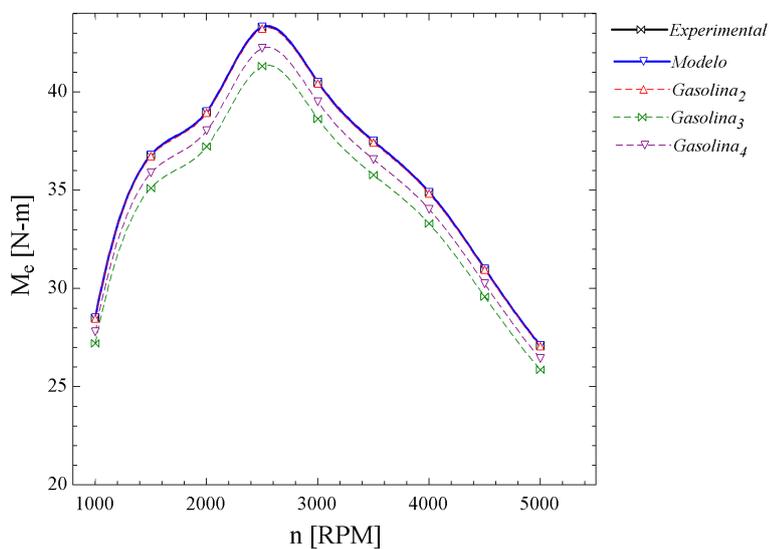
Cuadro 1.3: Características de los combustibles analizados en este trabajo para MEP.

Combustible	Formula	B	(AC) _{est}	PCI	PCI _{mez}	$\frac{m_f}{m_{ref}}$	%V	Referencia
Gasolina		C ₈ H ₁₈	12,50	44,971	2,85	1,00	1,65	[?]
Gasolina ₂		C _{7,93} H _{14,83}	11,64	44,400	2,85	1,01	1,77	[?]
Gasolina ₃		C ₈ H ₁₈	12,50	44,000	2,73	0,98	1,65	[?]
Gasolina ₄		-	-	43,680	2,78	1,00	-	[?]
Etanol ₁		C ₂ H ₅ OH	3,00	26,800	2,68	1,64	6,53	[?]
Etanol ₂		C ₃ H ₅ OH	3,00	26,900	2,69	1,64	6,53	[?]
Metanol ₁		CH ₃ OH	1,50	20,000	2,68	2,28	12,26	[?]
Metanol ₂		CH ₄ O	1,50	19,900	2,66	2,28	12,26	[?]
Gasolinacon15%etanol(E15 ₁)		C _{7,04} H _{13,51} O _{0,15}	10,34	41,580	2,73	1,04	1,99	[?]
Gasolinacon10%etanol(E10 ₁)		C _{7,34} H _{13,95} O _{0,10}	10,78	42,510	2,77	1,03	1,91	[?]
Gasolinacon10%etanol(E10 ₂)		-	-	42,561	2,81	1,04	-	[?]
Gasolinacon5%etanol(E5 ₁)		C _{7,63} H _{13,38} O _{0,05}	11,20	43,450	2,81	1,02	1,84	[?]
n - Butano		C ₄ H ₁₀	6,50	45,720	2,78	0,95	3,12	[?]
CH ₄		CH ₄	2,00	50,000	2,74	0,86	9,48	[?]
Metano(CGN)		-	-	45,800	2,52	0,86	9,48	[?]
Propano ₁		C ₃ H ₈	5,00	46,330	2,78	0,94	4,02	[?]
Propano ₂		C ₃ H ₉	5,00	46,300	2,78	0,94	4,02	[?]
Propano ₃		C ₃ H ₈	5,00	46,100	2,78	0,95	4,02	[?]
GasLP		0,3C ₃ H ₈ + 0,7C ₄ H ₁₀	6,05	45,700	2,77	0,95	3,35	[?]
GasNatural		0,85C ₃ H ₈ + 0,07C ₂ H ₆ + 0,02C ₃ H ₆ + 0,01N ₂ + 0,05CO ₂	2,05	50,000	3,12	0,98	9,29	[?]
Biogás		0,57C ₃ H ₈ + 0,41CO ₂ + 0,0018CO + 0,01H ₂ + Otros	1,15	5,81	17,000	2,50	2,54	15,46
Hidrógeno ₁		H ₂	0,5	34,29	119,930	3,40	0,43	29,53
Hidrógeno ₂		H ₂	0,5	34,29	120,000	3,40	0,43	29,53
Reformado		0,57H ₂ + 0,43CO	0,5	5,24	18,540	2,97	2,82	29,53
80%CH ₄ + 20%H ₂		0,8CH ₄ + 0,2H ₂	1,70	17,75	52,000	2,77	0,83	10,97
60%CH ₄ + 40%H ₂		0,6CH ₄ + 0,4H ₂	1,40	18,55	57,000	2,92	0,80	13,02
40%CH ₄ + 60%H ₂		0,4CH ₄ + 0,6H ₂	1,10	19,94	61,000	2,91	0,74	16,00
20%CH ₄ + 80%H ₂		0,2CH ₄ + 0,8H ₂	0,80	22,94	73,000	3,05	0,64	20,75
SY.NGA550%		0,8CH ₄ + 0,2H ₂	1,70	17,75	52,000	2,77	0,83	10,97

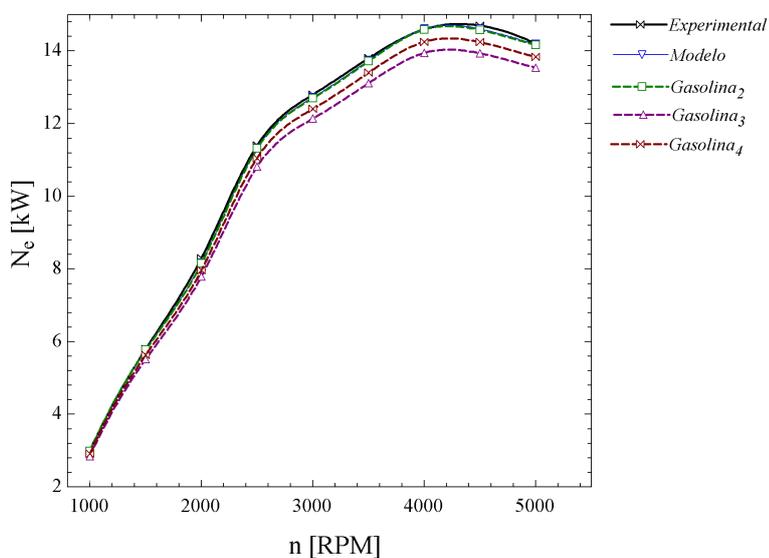
1.3.1. Gasolinas

La Figura 1.12 a) muestra el par obtenido por las diversas gasolinas, de la cual la *Gasolina*₂ tiene un ligero incremento, alrededor de 0.2 %, comparado con los valores experimentales, mientras que la *Gasolina*₃ presenta un déficit del 4.5 % y la *Gasolina*₄ de 2.5 % relacionándolo con los valores experimentales. Esto, se relaciona con la mezcla rica, permitiendo tener un rendimiento similar y/o mejor que la parte experimental y déficit debido a factores de mezcla pobre. Si bien, como indica la Tabla 1.3 los PCI de cada gasolina son muy similares pero el %V es mayor en la *Gasolina*₂ por 0.12 % al igual el la relación flujos de masas con 0.02 %, permitiendo tener un comportamiento similar a los parámetros experimentales y modelados.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP21



(a)



(b)

Figura 1.12: Curva de desarrollo para diversas Gasolinas en un MEP; a) Par, b) Potencia.

Al igual que el par efectivo, el comportamiento en la potencia efectiva tiene la misma tendencia, solo que ahora la Gasolina₂ tiene una prestación

mayor de 0.7 % respecto a la curva experimental lo cual se puede observar en la Figura 1.12 b), en cuanto a la *Gasolina₃* tiene una pérdida alrededor del 5 % y la *Gasolina₄* casi del 3 %.

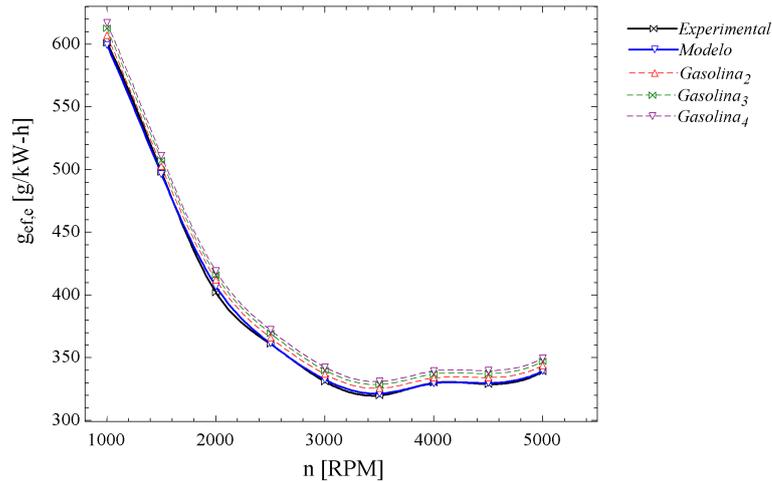


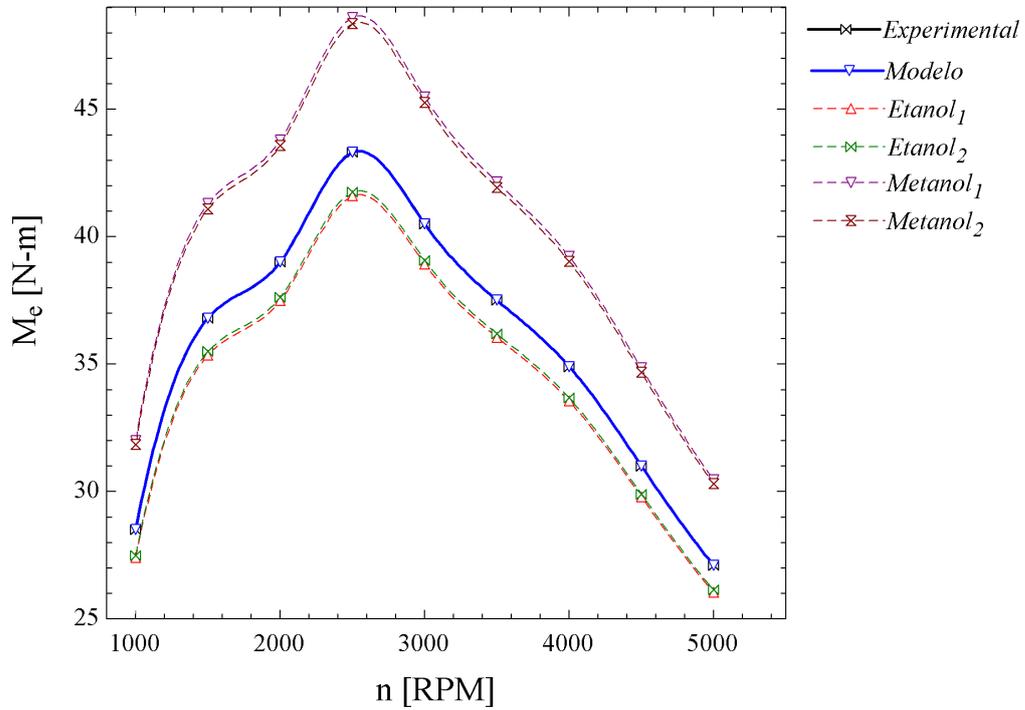
Figura 1.13: Consumo específico desarrollado para diversas Gasolinas en un MEP.

El ajuste de la tendencia experimental respecto al modelo y los demás combustibles a estudiar muestran en la Figura 1.13 como varía el consumo específico de combustible, entre 1.5 % a 3.5 % aproximadamente, con una tendencia a incrementar desde la *Gasolina₂* hasta la *Gasolina₄* en forma suave.

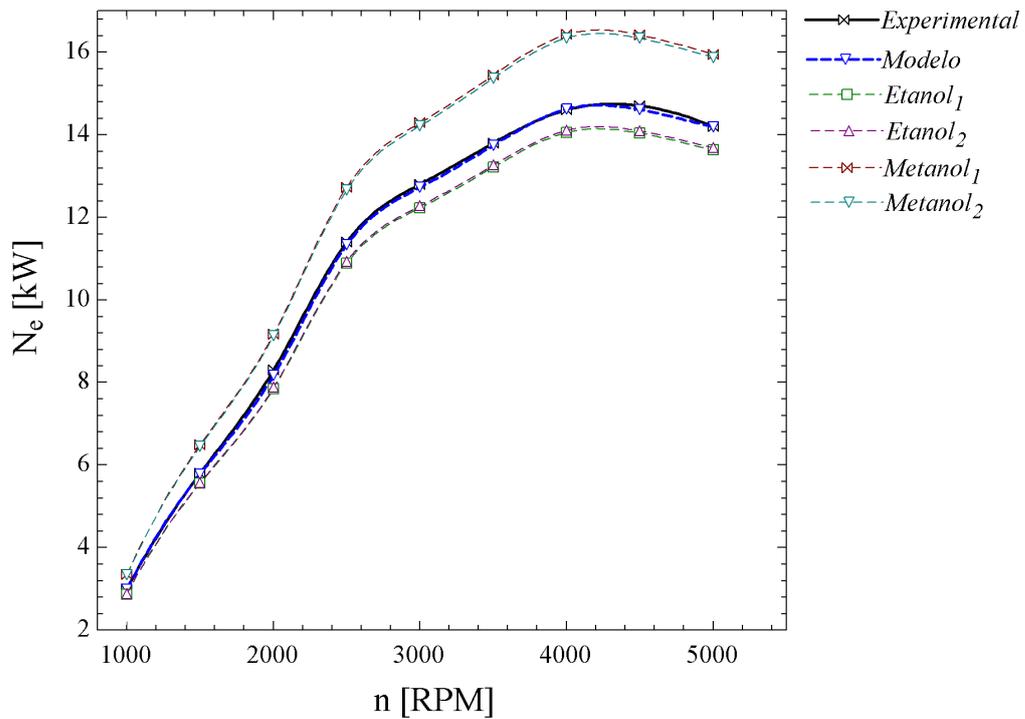
1.3.2. Alcoholes

Como se observa en la Figura 1.14 a), en el par efectivo desarrollado existe una notable diferencia entre los tipos de alcoholes que se analizan, donde el Etanol a las mismas condiciones de operación del motor a las cuales se obtuvieron los datos experimentales, queda por debajo con un déficit del 4 % en ambos casos, mientras que con el Metanol se presenta un incremento de alrededor de 12 %, debido a la mezcla enriquecida de combustible.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP23



(a)



(b)

Figura 1.14: Curva de desarrollo para diversos Alcoholes en un MEP; a) Par, b) Potencia.

La potencia efectiva que se genera con los diferentes alcoholes se muestra en la Figura 1.14 b), la cual indica que el comportamiento del motor tiene cierta similitudes a la contraparte del par efectivo, el Metanol tiene 12 % de potencia efectiva por encima del modelo así como del experimental, mientras que con el Etanol se tiene un déficit del 4 % respecto a la curva del modelo como la experimental. Aunque cualquier alcohol sea aproximadamente la mitad del PCI de la Gasolina, la razón de flujos de masa son mayores a esta entre 0.64 a 1.28 veces mayor que la gasolina así como %V incrementa considerablemente, y entre alcoholes el Metano duplica esta razón al etanol.

Para poder mantener las condiciones de operación del motor a condiciones normales, ambos combustibles presentan en la Figura 1.15 un incremento en el consumo de combustible alrededor del 68 % con Etanol, en cuanto al Metanol su incremento es de 125 % aproximadamente. Aunado con los beneficios del Metanol el incremento de apr como de potencia efectivos tiende a consumir una mayor cantidad de combustible, de igual manera se percibe una caída de la potencia en su punto máximo más suave a diferencia de la gasolina.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP25

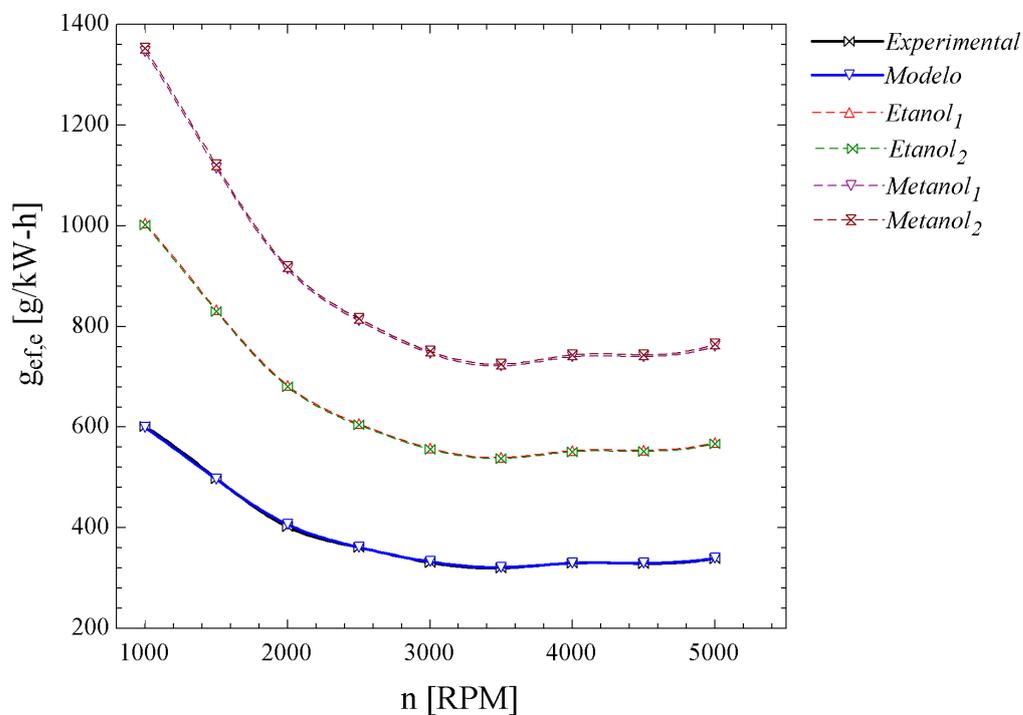
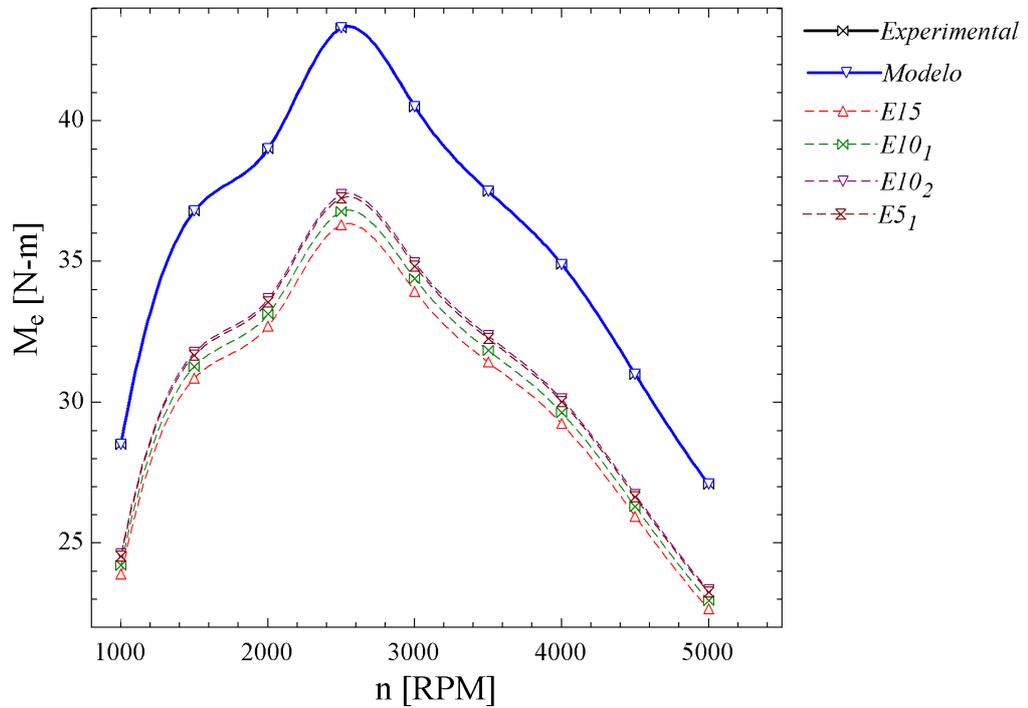


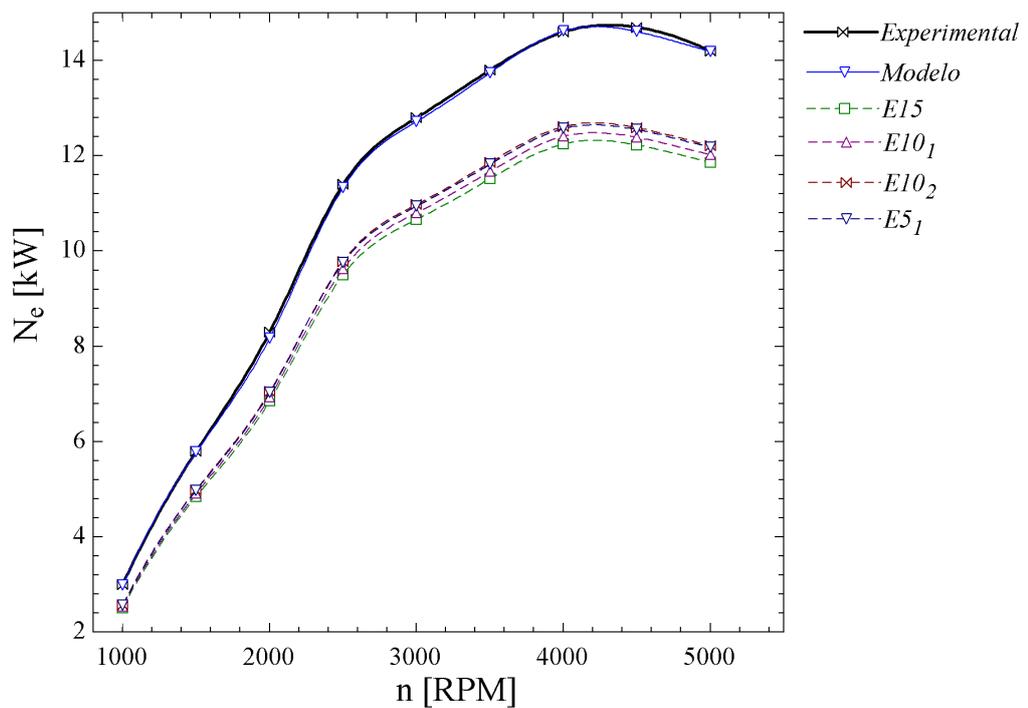
Figura 1.15: Consumo específico desarrollado para diversos Alcoholes en un MEP.

1.3.3. Mezcla de alcoholes

En la Figura 1.16 a) se analiza el efecto sobre el par efectivo de diferentes mezclas de Etanol con Gasolina las cuales presentan un déficit de 14 a 16 % respecto a los datos experimentales. Las mezclas con mejor comportamiento son la $E5_1$ así como $E10_2$, y la mezcla $E15$ con el menor par generado.



(a)



(b)

Figura 1.16: Curva de desarrollo para diversas mezclas de Alcoholes en un MEP; a) Par, b) Potencia.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP27

La Figura 1.16 b) muestra la potencia efectiva desarrollada en el motor con las mezclas de Etanol y Gasolina, tiene la misma tendencia que las curvas de par efectivo, en la cual se tiene un ligero incremento de 1% del $E5_1$ comparado con las demás mezclas, además de un decremento de entre 14 a 15% en comparación con los datos experimentales. Aunque existe una disminución de par y potencia efectivos, requiere un incremento en el consumo, como se muestra en la Figura 1.17, alrededor de 4 a 9%. El menor incremento corresponde a la mezcla $E5_1$ y el máximo a la mezcla $E15$.

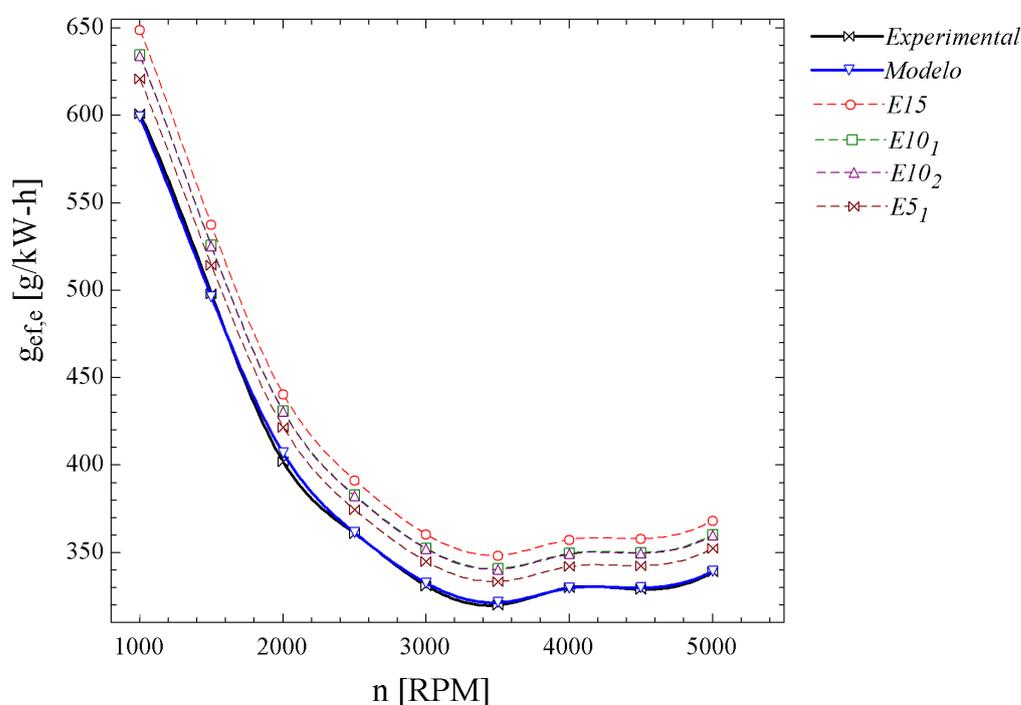


Figura 1.17: Consumo específico desarrollado para diversas mezclas de Alcoholes en un MEP.

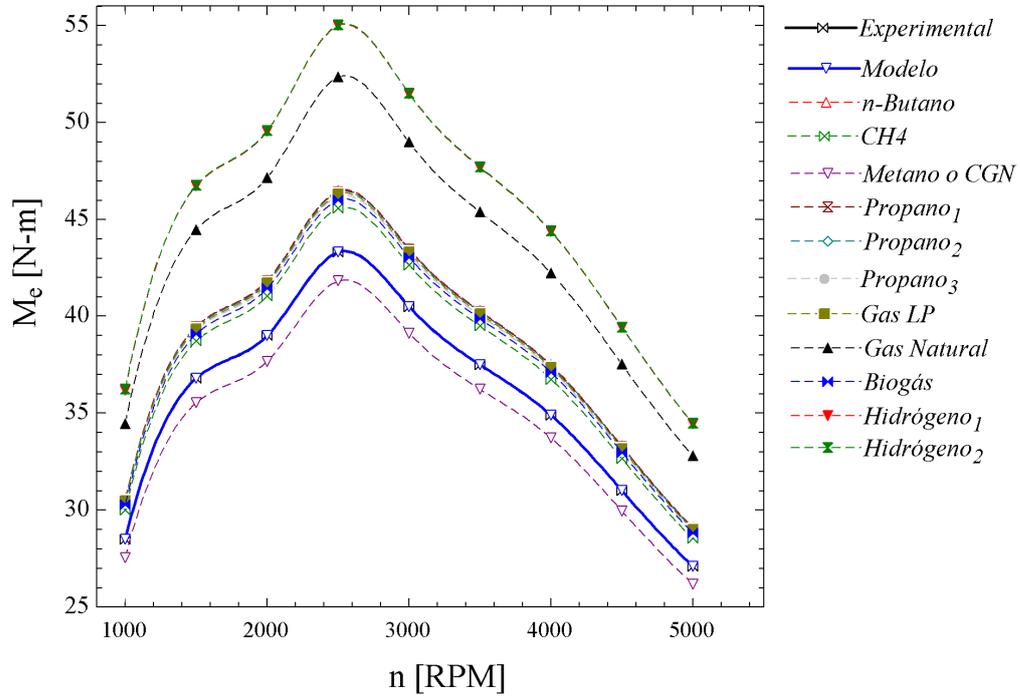
1.3.4. Gases

Si bien los combustibles gaseosos presentan una ventaja a los líquidos debido a que se homogeniza de forma casi inmediata, en cambio los combustibles líquidos se requiere pulverizarlos para que estos puedan homogenizarse con el aire. Es notorio también que su PCI como su PCI_{mez} es mayor que los

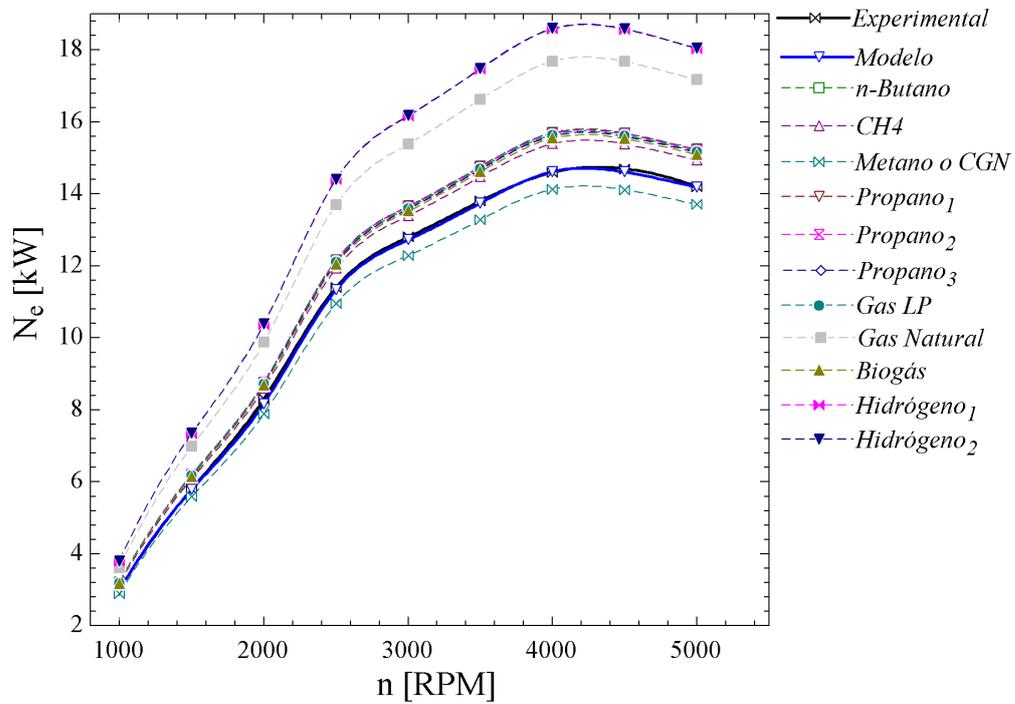
combustibles líquidos que se citan en el presente trabajo lo que se esperará tener mejor prestación de par, potenci y consumo.

Los gases presentan buenas prestaciones, similares a las experimentales e incluso mayores a estas como es el caso del Hidrógeno, con un incremento de 26 %; por otro lado, el Metano CGN tiene un déficit de 4 % en comparación a los datos experimentales, como se puede observar en la Figura 1.18 a). El Biogás presenta las mismas prestaciones que si se alimentara el motor con el combustible base; el CH_4 logra un incremento de 5 %; el Gas Natural logra un crecimiento de 20 % y los gases restantes un 7 %, todos con respecto a los datos del modelo y experimentales. El CGN tiene una pérdida importante con respecto a las prestaciones del motor con combustible base, ya que maneja mezclas pobres al igual que un poder calórico inferior alto.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP29



(a)



(b)

Figura 1.18: Curva de desarrollo para diversos Gases en un MEP; a) Par, b) Potencia.

Al depender la potencia del par, su tendencia es similar, alcanzando los mejores resultados y un cambio del 6 % el Hidrógeno y Gas Natural; como se muestra en la Figura 1.18 b).

Se esperaría que al tener prestaciones similares o ligeramente mayores a los datos experimentales, conllevaría a un consumo de combustible por debajo de lo obtenido en la parte experimental. La Figura 1.19 muestra una demanda de Biogás demanda 165 % más que el combustible base, mientras que los demás gases requieren de 1 a 3 % menos combustible que el de referencia. Por otro lado, el CH_4 presenta una menor prestación de potencia y par, lo que equivale a un 10 % menos que el combustible de referencia. El hidrógeno requiere 63 % menos combustible que si se utilizara Gasolina.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP31

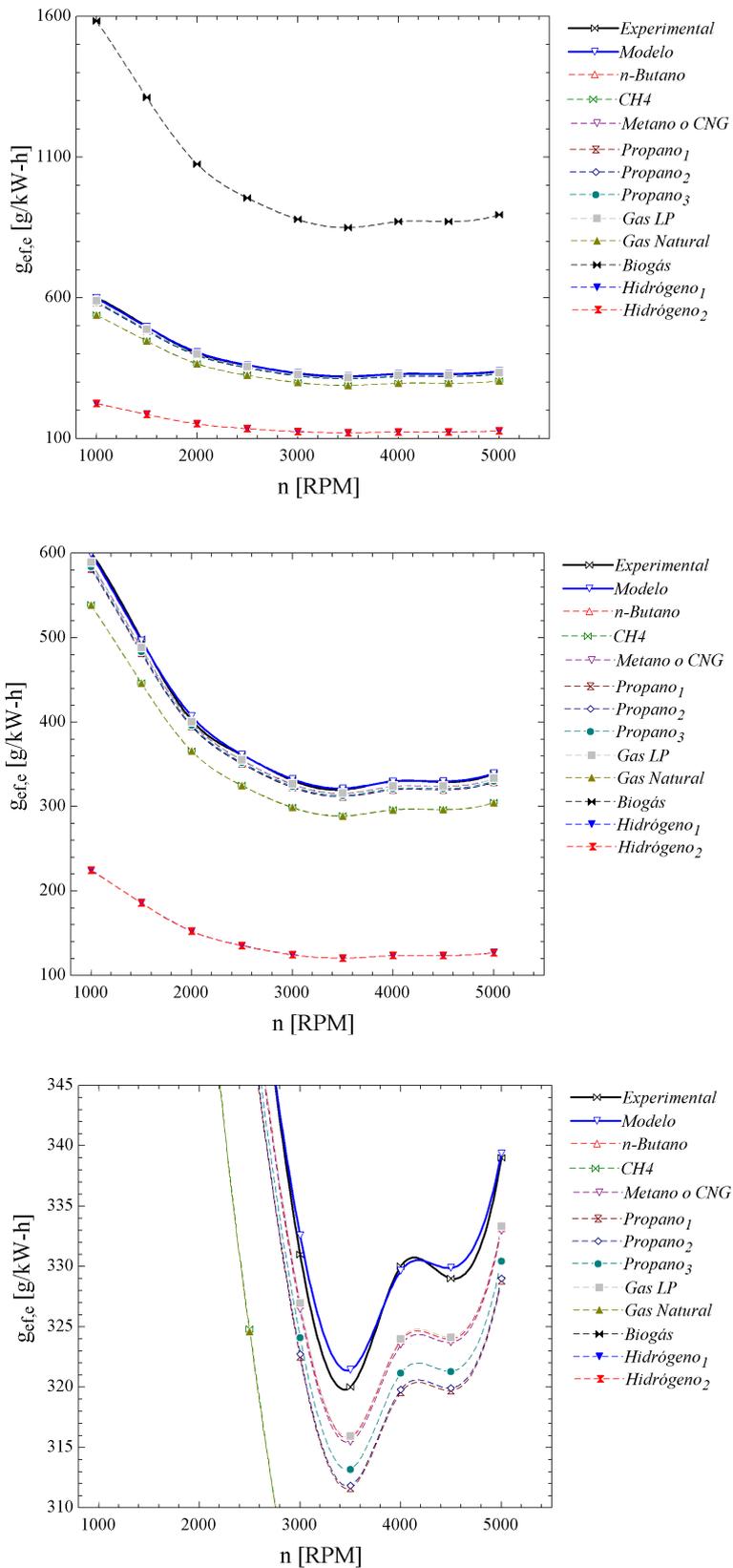
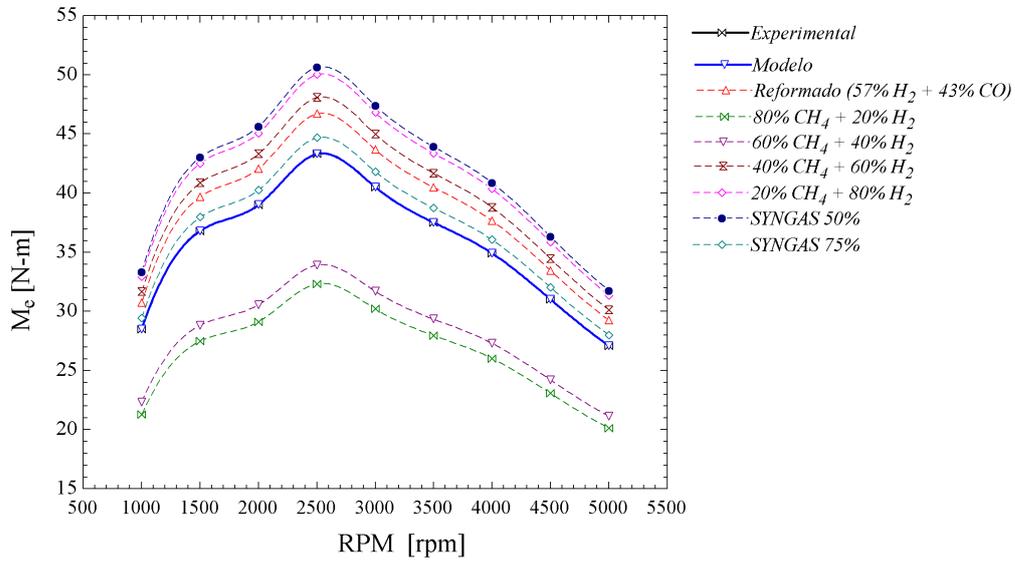


Figura 1.19: Consumo específico desarrollado para diversos Gases en un MEP.

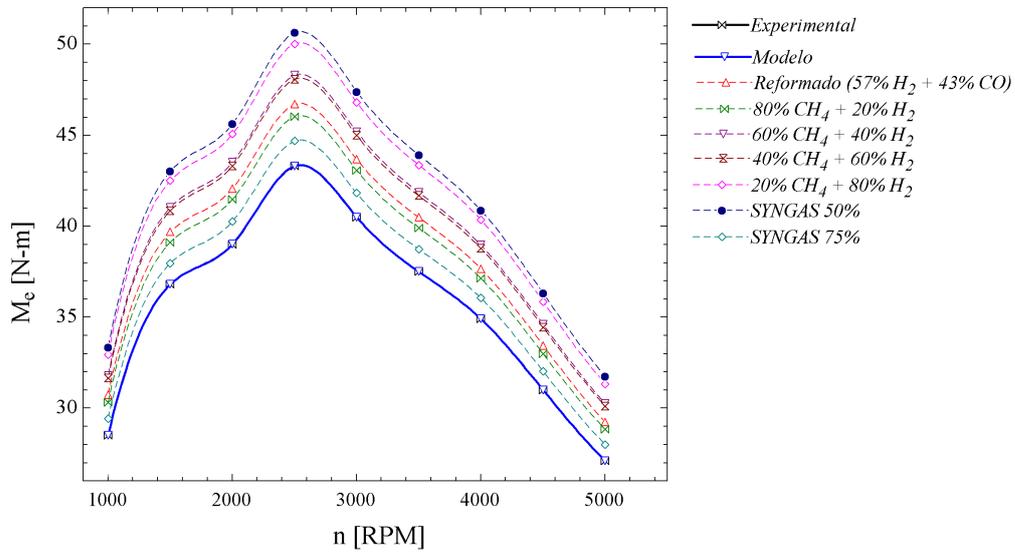
1.3.5. Mezcla de gases

Las mezclas entre gases permiten un incremento en el comportamiento del par efectivo comparado con las mezclas de alcohol - gasolina, alrededor del 8 a 17 % respecto a los valores experimentales del combustible base, como se ilustra en la Figura 1.20 a). Los máximos valores los presenta el SYNGAS50 y la mezcla 20 % CH_4 + 80 % H_2 , el Reformado tiene un incremento del 8 % y el SYNGAS75 solo del 3 % de forma global. No todos tienden a incrementar, las mezclas con mayor cantidad de metano, 80 y 60 %, disminuyendo un 26 y 22 % respectivamente.

1.3. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEP33



(a)



(b)

Figura 1.20: Par desarrollado para diversas mezclas de Gases en un MEP.

La potencia efectiva desarrollada muestra un comportamiento muy simi-

lar que la del par desarrollado, con una variación de $\pm 1\%$ entre la mayoría de las mezclas, como se observa en la Figura 1.20 b).

La mayoría de las mezclas de gases tienen un descenso en el consumo de combustible para generar las prestaciones observadas en el par y la potencia efectiva como se ilustra en la Figura 1.21, las cuales van desde un 13 a 38 %. El consumo más cercano a los datos experimentales lo presenta la mezcla de gas con 80 % de CH_4 y el de menor consumo el que tiene la mezcla de 80 % con H_2 . El SYNGAS50 presenta un comportamiento favorable de par y potencia pero para lograrlo requiere de 204 % más combustible que el combustible base, el reformado es otro caso similar con un 143 %.

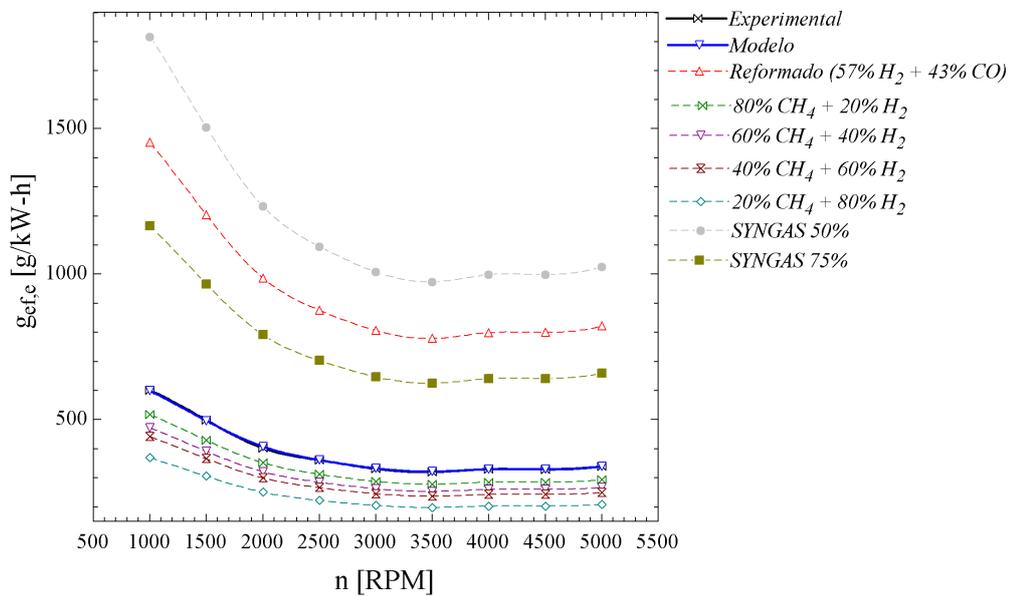


Figura 1.21: Consumo específico desarrollado para diversas mezclas de Gases en un MEP.

1.4. Efectos de los combustibles alternativos en el MEC

La sección presenta el resumen de las principales características y parámetros de los combustibles analizados en esta sección para el MEC que se

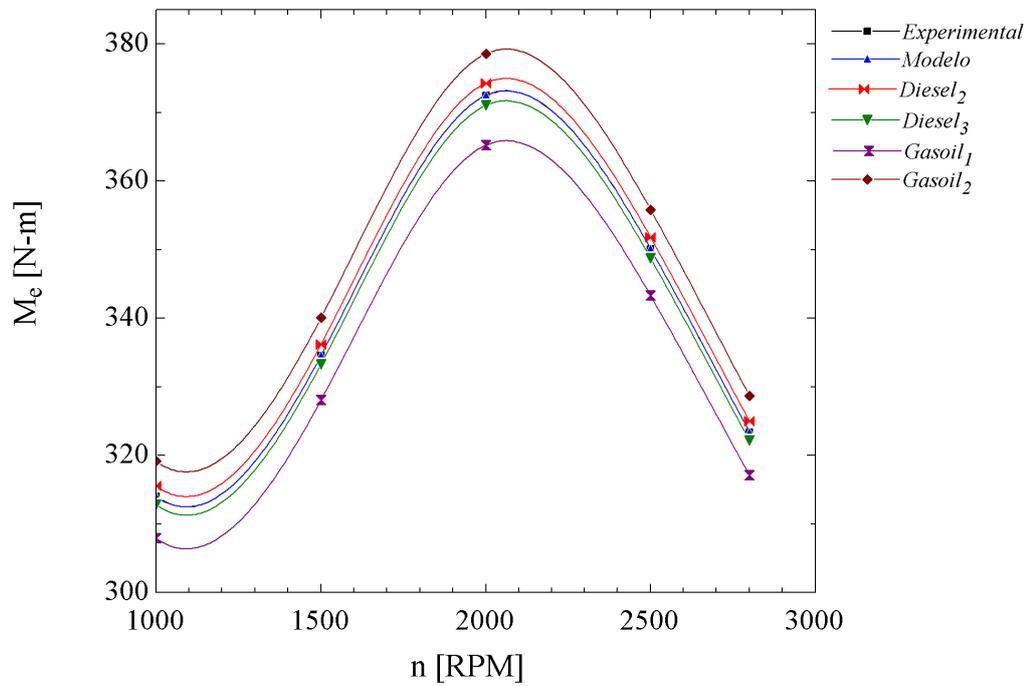
1.4. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEC35

modelo y menciono en secciones anteriores. La Tabla 1.4 nos muestran los combustibles que se analizarán con el modelo.

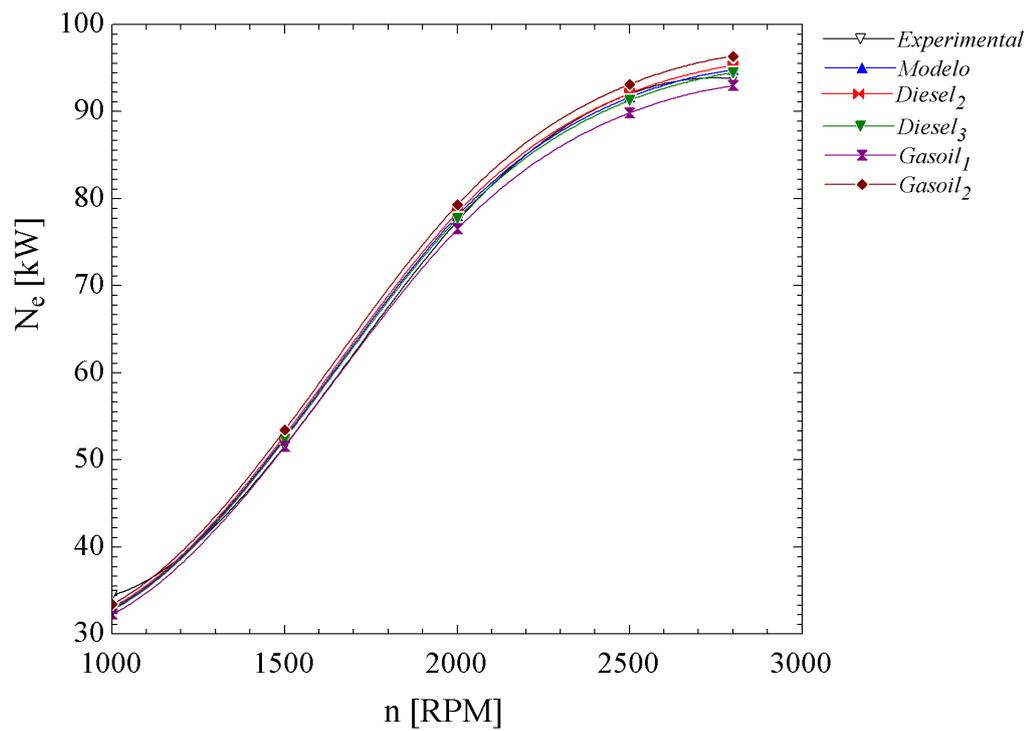
Cuadro 1.4: Características de los combustibles analizados en este trabajo para MEC.

Combustible	Formula	B	$(AC)_{est}$	PCI	PCI_{mez}	$\frac{m_f}{m_{ref}}$	%V	Referencia
<i>Diesel</i>	$C_{12}H_{23}$	17.75	14.67	42.210	2.694	0.92	1.17	[?]
<i>Diesel</i> ₂	-	16.00	14.70	42.500	2.707	0.92	1.29	[?]
<i>Diesel</i> ₃	-	16.00	15.00	43.000	2.688	0.90	1.29	[?]
<i>Gasoil</i> ₁	$C_{10}H_{22}$	15.50	15.06	42.500	2.464	0.90	1.33	[?]
<i>Gasoil</i> ₂	$C_{13,15}H_{24,6}$	19.30	14.60	42.690	2.736	0.93	1.07	[?]
<i>Bio – aceite</i>	$C_{18,64}H_{32,48}NO_2$	25.76	12.34	36.400	2.729	0.90	0.81	[?]
<i>Biodiesel</i>	$C_{18,08}H_{34,86}O_2$	25.80	12.54	38.730	2.860	1.08	0.81	[?]
<i>Biodiesel</i> ₂	$C_{18,7}H_{34,9}O_2$	26.43	12.52	37.300	2.759	1.08	0.79	[?]
<i>Biodiesel</i> ₃	$C_{19}H_{38,62}O_2$	27.75	12.95	36.780	2.637	1.04	0.75	[?]
<i>Biodieselde"olein" depalma</i>	$C_{16,74}H_{34,34}O_2$	24.33	12.56	38.370	2.829	1.08	0.85	[?]
<i>Biodieseldeaceite"Karanja"</i>	$C_{17,75}H_{33,43}O_{1,98}$	25.12	12.47	37.980	2.821	1.08	0.83	[?]
<i>Bio – oilhidrotratado</i>	$C_{10}H_{13,34}O_{2,53}$	12.57	9.59	28.500	2.692	1.41	1.71	[?]
<i>B20</i>	$0,8C_{12}H_{23} + 0,2C_{17,75}H_{33,43}O_{1,98}$	19.92	14.02	38.280	2.549	0.96	1.08	[?]
<i>B40</i>	$0,6C_{12}H_{23} + 0,4C_{17,75}H_{33,43}O_{1,98}$	20.70	13.51	37.850	2.609	1.00	1.00	[?]
<i>B60</i>	$0,4C_{12}H_{23} + 0,6C_{17,75}H_{33,43}O_{1,98}$	22.17	13.09	37.250	2.643	1.03	0.94	[?]

1.4.1. Diesel



(a)



(b)

Figura 1.22: Curva de desarrollo para diversos Diesel en un MEC; a) Par, b) Potencia

1.4. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEC37

Como se muestra en la Figura 1.22 a), la curva experimental como la del modelo ajustan sin ningún detalle, además dos combustibles presentan un par superior a de estos con una diferencia global de 0.5 a 2%, *Diesel₂* y *Gasoil₂*, mientras que el *Gasoil₁* y *Diesel₃* muestran un comportamiento similar por debajo de todos los combustibles, aunque tengan PCI similares que al mezclar con aire disminuyen, creando este comportamiento. Por otro lado, en la Figura 1.22 b), la potencia se comporta de manera similar, aunque con ligeros cambios entre la parte experimental y el modelo. El comportamiento de potencia se incrementa de 2.17 a 1.85 % para el *Gasoil₂* y *Diesel₂*, aunque para el *Diesel₃* y *Gasoil₁* disminuye de 1.63 a 2.17 % con respecto al modelo y la parte experimental.

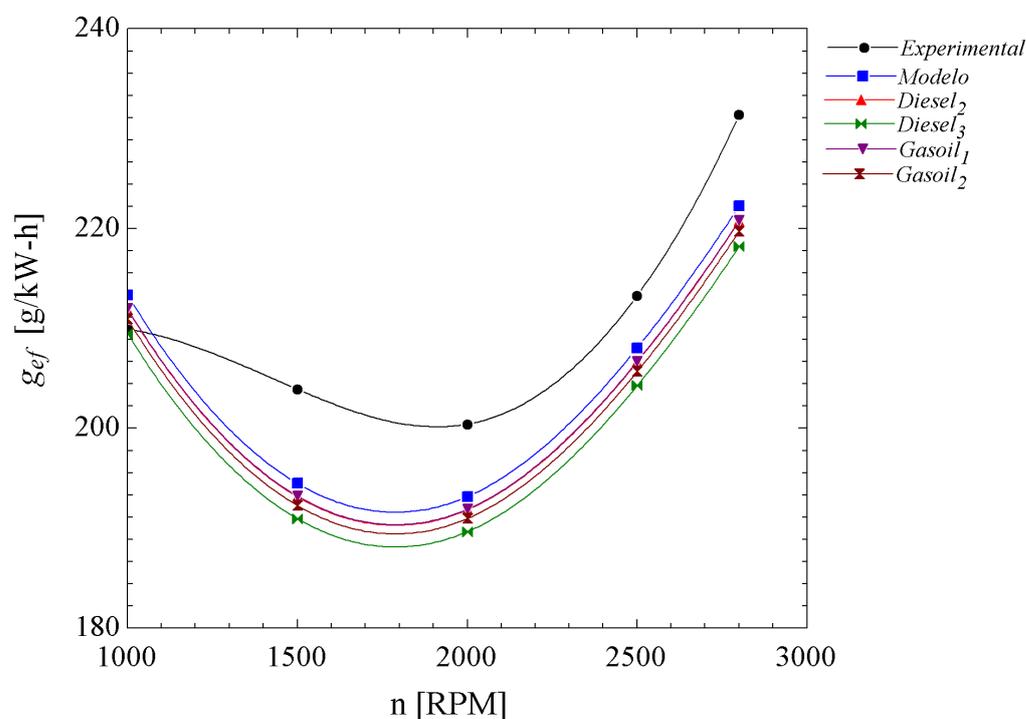
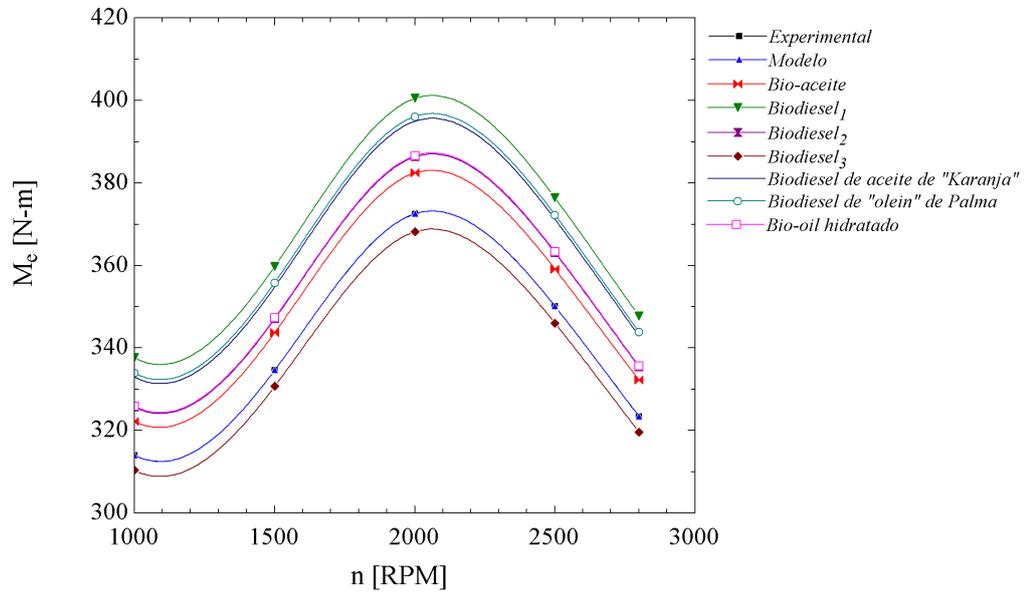


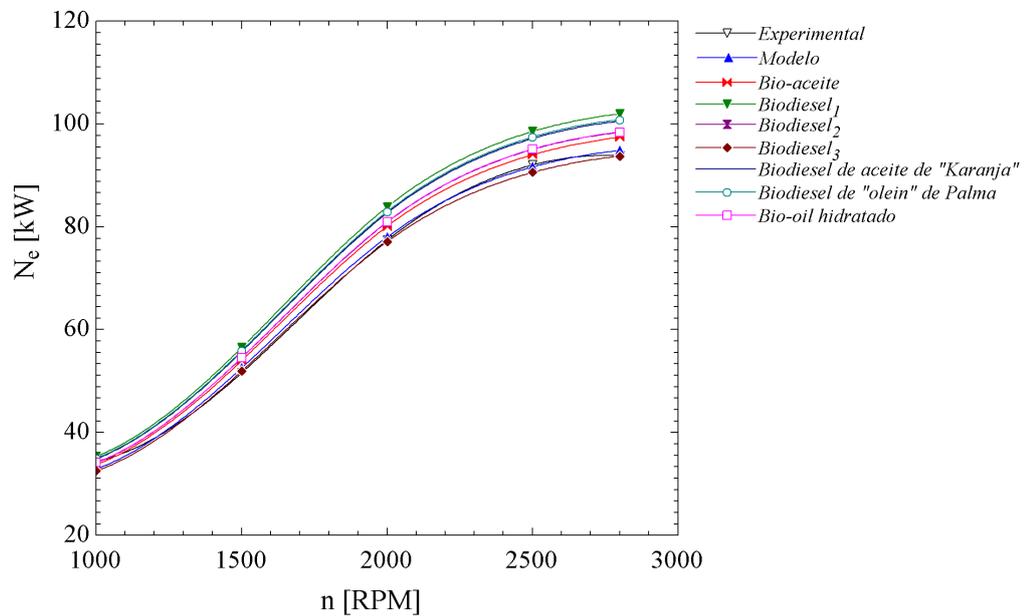
Figura 1.23: Consumo específico desarrollado para diversos Biodiesel en un MEC.

La Figura 1.23 presenta el consumo de combustibles, donde el *Gasoil* presenta una disminución global de 3.63 %, mientras que para el *Diesel₂* es de 3.66 % y para el *Diesel₃* de 4.37 %, todos por debajo del modelo y la parte experimental.

1.4.2. Biocombustibles



(a)



(b)

Figura 1.24: Curva de desarrollo para diversos Bioiesel en un MEC; a) Par, b) Potencia.

1.4. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEC39

Para el caso de los biocombustible, el incremento en el par desarrollado, como se ilustra en la Figura 1.24 a). Se observa una mejoría del 7.51 % para el *Biodiesel*₁, mientras que el *Biodiesel* de Olein incrementa alrededor de 7%. Por debajo de estos se encuentra el *Biodiesel* de Karanja; posteriormente el *Bio - oil*, *Biodiesel*₂ y el *Bio - aceite* que presentan un incremento de alrededor de 3.8 % al 2.66 % respecto a la parte experimental y el modelo, lo cual indica que lleva un aporte energético. El *Biodiesel*₃ tiene una ligera pérdida respecto a las curvas de referencia del 1.2 %. La potencia desarrollada por el motor esta instimamente relacionada con el par desarrollado, como se refiera en la Figura 1.24 b). Lo anterior genera tendencias similares, presentando el *Biodiesel*₁ una ganancia de 7.26 %, el *Biodiesel* de Olein de 6.09 %, *Biodiesel* de Karanja de 5.79 %, el *Bio - oil* de 3.87 %, el *Biodiesel*₂ de 3.84 % y el *Bio - aceite* de 3.21 %, mientras que el *Biodiesel*₂ tiende a un ligero descenso de 1.65 %.

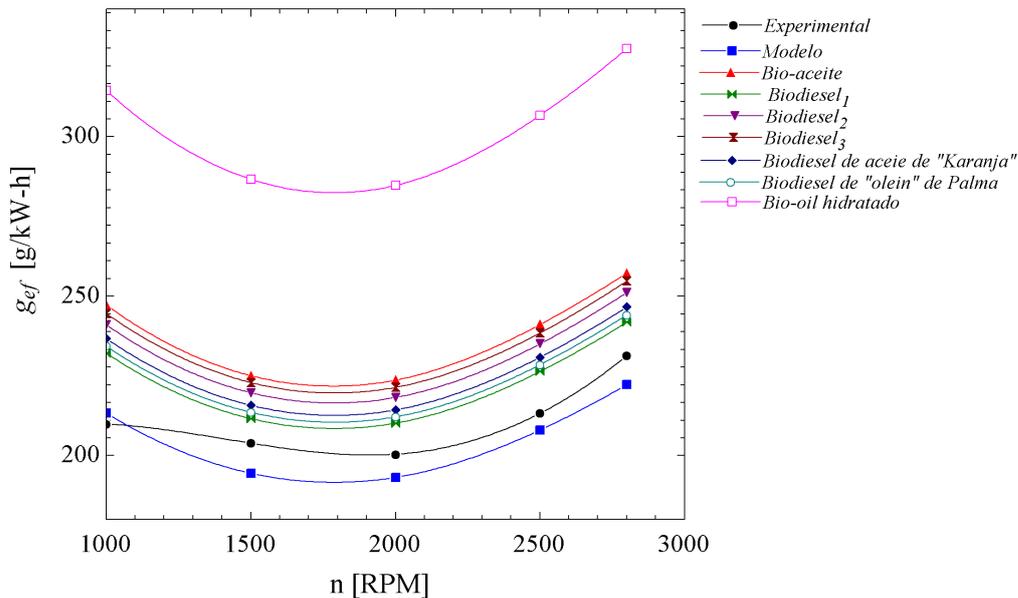


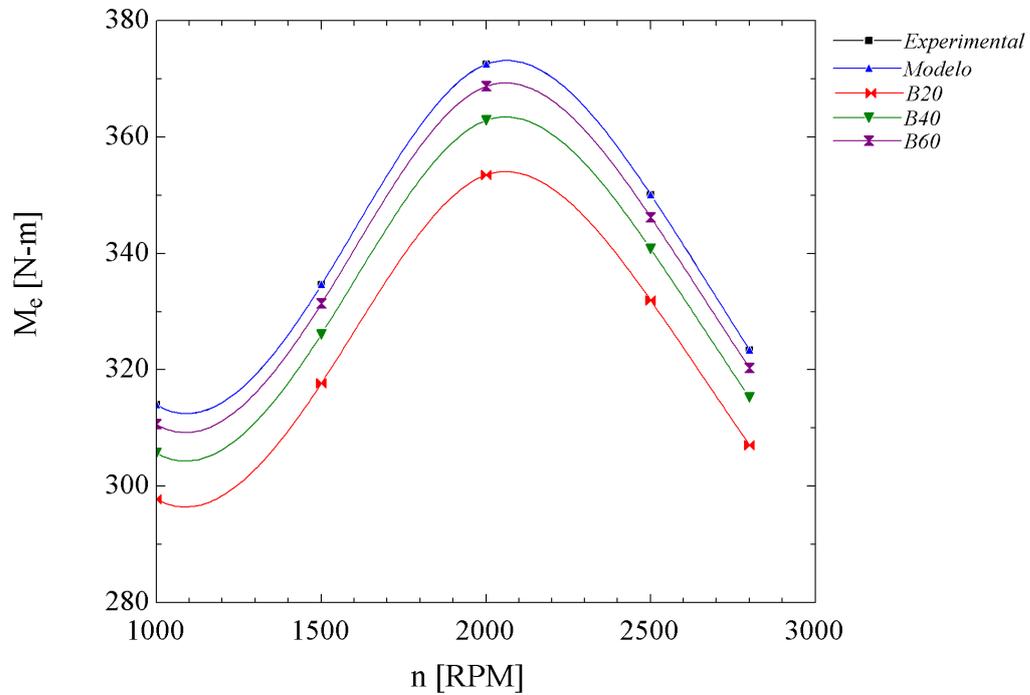
Figura 1.25: Consumo específico desarrollado para diversos Biodiesel en un MEC.

La Figura 1.25 nos indica que existe un consumo mayor para tratar de emular las condiciones de operación del motor con el combustible *Bio - oil*, que es el de mayor consumo con un incremento de 44 %, seguido del

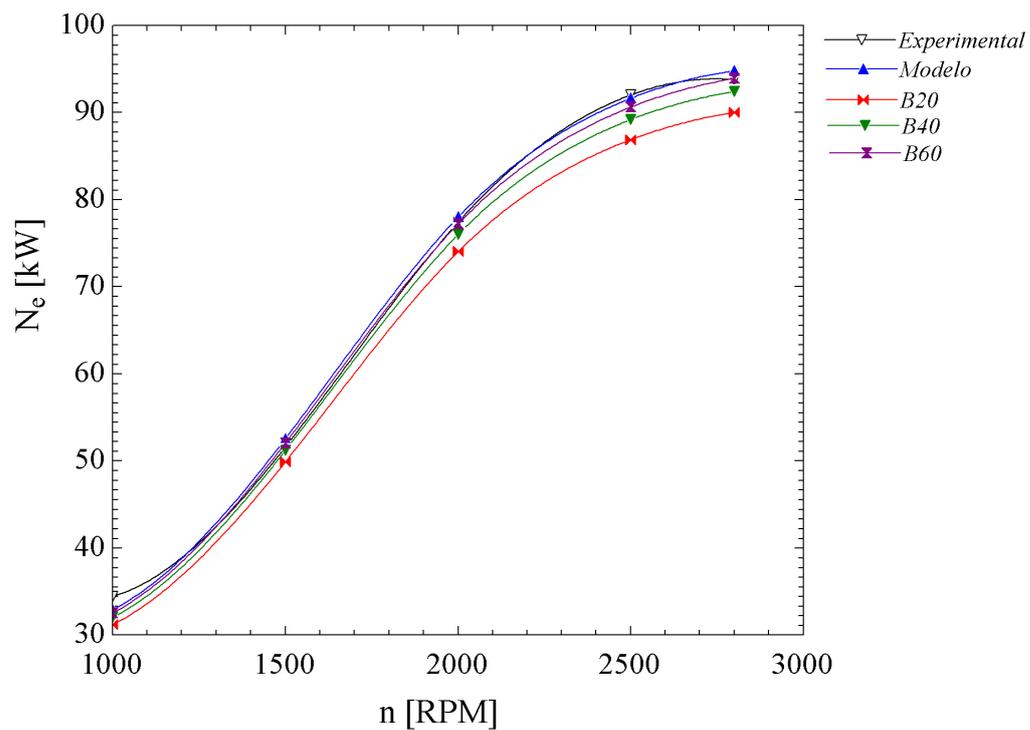
Bio – aceite que requiere 13% adicional, el *Biodiesel*₃ 11.63%, el *Biodiesel*₂ 10.04%, el *Biodiesel* de *Karanja* 8.07%, el *Biodiesel* de *Olein* 6.98% y finalmente el *Biodiesel*₁ con 5.98% por arriba del consumo para el modelo y la parte experimental.

1.4. EFECTOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL MEC41

1.4.3. Mezclas de Biodiesel



(a)



(b)

Figura 1.26: Curva de desarrollo para diversas mezclas de Bioiesel en un MEC; a) Par, b) Potencia.

Las mezclas de Biodiesel se presentan en la Figura 1.26 a), con un par desarrollado por debajo de las curvas de referencia, en un porcentaje de 1 % en *B60*, 2.6 % para *B40* y 5.11 % para *B20*. El combinar Diésel con Biodiesel, disminuye sus prestaciones en el par desarrollado ligeramente. La potencia al igual que el par desarrollado genera decrementos en sus prestaciones de operación respecto a las curvas de referencia como muestra la Figura 1.26 b), donde *B60* decrece 1.65 %, *B40* un 2.81 % y *B20* con 5.33 %.

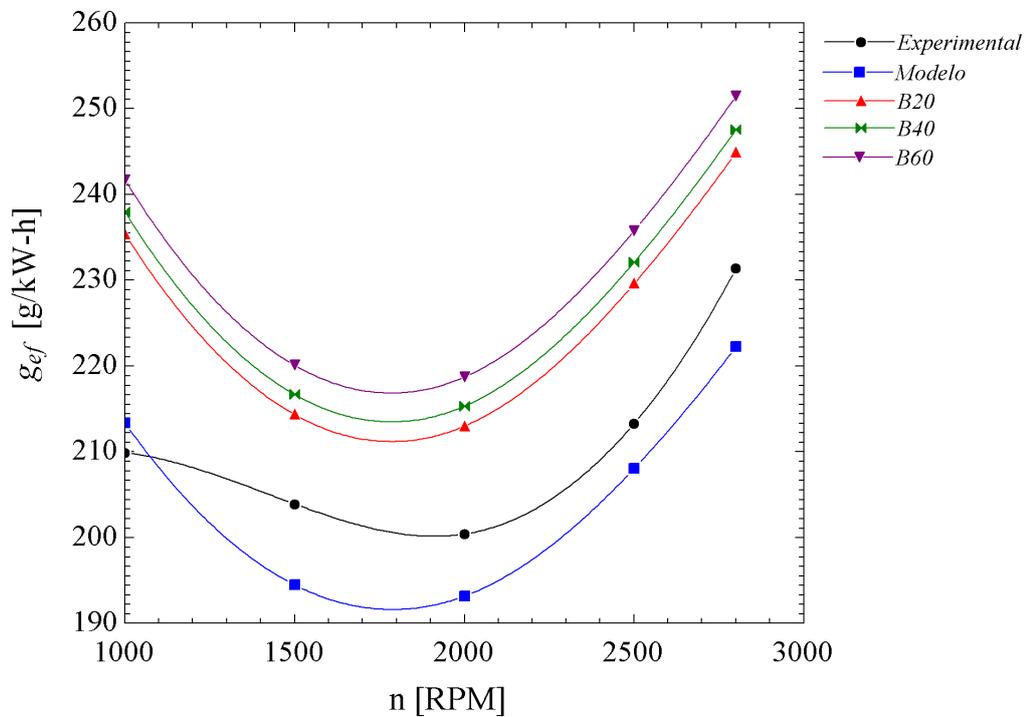


Figura 1.27: Consumo específico desarrollado para diversas mezclas de Biodiesel en un MEC.

Las pérdidas de par así como de potencia provocan un incremento del consumo específico de combustible, lo cual se muestra en la Figura 1.27, donde *B60* se desvía 10.29 %, *B40* con 8.58 % mientras que *B20* solo tiene un incremento de 7.40 %. Esta implica mayor consumo para tratar de alcanzar las mismas condiciones de operación del motor, aún así, sin obtener las mismas prestaciones.