



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALIMENTADOS POR COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Autor

Rubén Serrano Ruiz

Director

Eva María Llera Sastresa

**Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia
Energética**



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

FEBRERO 2016

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. RUBÉN SERRANO RUIZ,

con nº de DNI 72999586R en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster Universitario en Energías Renovables, (Título del Trabajo)

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA
ALIMENTADOS POR COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 26 DE ENERO DE 2016



Fdo: Rubén Serrano Ruiz

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALIMENTADOS POR COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS, RESUMEN

Partiendo de datos procedentes de fuentes secundarias, este estudio persigue los siguientes objetivos:

- Analizar el comportamiento de los principales combustibles alternativos (hidrógeno, biodiesel, bioetanol, gas natural comprimido y gas natural licuado) en motores de combustión interna (MACI's) en cuanto a sus emisiones (CO_2 , CO, NO_x e hidrocarburos totales) y principales parámetros de funcionamiento (rendimiento y régimen de giro).
- Identificar las modificaciones necesarias de los motores alternativos de combustión interna convencionales para el uso de combustibles alternativos.
- Establecer métodos para normalizar los resultados obtenidos en pruebas bajo diferentes condiciones a una referencia común y para el cálculo de las variables no medidas.
- Hacer una clasificación de los principales combustibles alternativos en función de diferentes criterios medioambientales y económicos.
- Definir un único indicador que permita categorizar los combustibles según su idoneidad ante diferentes escenarios.

El estudio se centra en MACI's convencionales (tanto de encendido provocado, como de encendido por compresión) y de aspiración natural que en ocasiones han sido modificados para su adaptación a cada tipo de combustible alternativo.

Por medio de 2 indicadores económicos y 4 indicadores medioambientales se analiza el comportamiento de un total de 30 carburantes, entre los que se incluyen combustibles puros, mezclas y combustibles duales, utilizando como herramienta visual un conjunto de diagramas radiales.

Para 8 escenarios diferentes se implementa el método analítico-jerárquico (AHP) obteniendo un ranking de carburantes más adecuados para cada escenario.

ÍNDICE

CAPÍTULO 0. NOMENCLATURA	6
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL	8
1.2 OBJETIVOS	11
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS	13
2.1 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS A COMPARAR	13
2.2 PARÁMETROS COMPARATIVOS.....	14
2.3 DATOS	15
2.4 TRATAMIENTO DE DATOS.....	16
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1 DIAGRAMAS RADIALES	20
3.1.1 RANGO DE [1100, 1500] RPM	20
3.1.2 RANGO DE (1500, 2000] RPM	28
3.1.3 RANGO DE (2000, 2500] RPM	34
3.1.4 RANGO DE (2500, 3000] RPM	39
3.1.5 RANGO DE (3000, 3500] RPM	41
3.1.6 RANGO DE (3500, 4000] RPM	44
3.1.7 RANGO DE (4000, 4500] RPM	46
3.1.8 RANGO DE (4500, 5000] RPM	47
3.2 ANÁLISIS MULTICRITERIO	48
3.2.1 ESCENARIO 1.....	50
3.2.2 ESCENARIO 2.....	50
3.2.3 ESCENARIO 3.....	51
3.2.4 ESCENARIO 4.....	52
3.2.5 ESCENARIO 5.....	53
3.2.6 ESCENARIO 6.....	53
3.2.7 ESCENARIO 7.....	54
3.2.8 ESCENARIO 8.....	55
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	56
ANEXO A: EJEMPLO DE CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN	58

ANEXO B: MODIFICACIONES EN LOS MACÍ's	59
B.1 GAS NATURAL.....	59
B.2 HIDRÓGENO	60
B.3 ETANOL.....	60
ANEXO C: TABLAS DE INDICADORES NORMALIZADOS.....	62
ANEXO D: RANKINGS COMPLETOS.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	75

CAPÍTULO 0. NOMENCLATURA

AHP: proceso analítico-jerárquico	PM_{mezcla} : peso molar de la mezcla
CO ₂ : emisiones de CO ₂ normalizadas	PM_a : peso molar del componente "a"
CO: emisiones de CO normalizadas	r: relación de compresión
D: diámetro del pistón	S: carrera
g_{ef} : Consumo específico de combustible	tep: toneladas equivalentes de petróleo
HC: emisiones de hidrocarburos inquemados normalizadas	V_T : Cilindrada
γ_a : fracción volumétrica del componente "a" en la mezcla	z: número de cilindros
MACI: motor alternativo de combustión interna.	η : eficiencia efectiva
MEC: motor de encendido por compresión	Combustibles de las pruebas (porcentajes en volumen):
MEP: motor de encendido provocado	100G: GASOLINA
m_f : flujo másico de combustible	100D: DIÉSEL
MODIFICACIONES: número y complejidad de modificaciones, variable normalizada	100H2: H2 PURO
\dot{N}_e : Potencia efectiva en el cigüeñal	5H2:95G: 5% H2 + 95% GASOLINA
NOx: emisiones de NOx normalizadas	10H2:90G: 10% H2 + 90% GASOLINA
PCI: poder calorífico inferior del combustible	15H2:85G: 15% H2 + 85% GASOLINA
PCI_{mezcla} : poder calorífico inferior de la mezcla o el combustible dual	20H2:80G: 20% H2 + 80% GASOLINA
PCI_a : poder calorífico inferior del componente "a"	25H2:75G: 25% H2 + 75% GASOLINA
	16H2:84D: 16% H2 + 84% DIÉSEL
	30H2:70D: 30% H2 + 70% DIÉSEL
	36H2:64D: 36% H2 + 64% DIÉSEL
	46H2:54D: 46% H2 + 54% DIÉSEL
	100E: ETANOL PURO

50E:50G: 50% ETANOL + 50%
GASOLINA

80E:20G: 80% ETANOL + 20%
GASOLINA

85E:15G: 85% ETANOL + 15%
GASOLINA

40EMP:60D: 40% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE PALMA + 60% DIÉSEL

100AC: ACEITE DE SEMILLA DE CAUCHO

10EMC:90D: 10% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE CAUCHO + 90% DIÉSEL

20EMC:80D: 20% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE CAUCHO + 80% DIÉSEL

50EMC:50D: 50% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE CAUCHO + 50% DIÉSEL

75EMC:25D: 75% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE CAUCHO + 25% DIÉSEL

100EMC: ÉSTER METÁLICO DE ACEITE
DE CAUCHO

20EMM:80D: 20% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE MADHUCA + 80% DIÉSEL

40EMM:60D: 40% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE MADHUCA + 60% DIÉSEL

60EMM:40D: 60% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE MADHUCA + 40% DIÉSEL

80EMM:20D: 80% ÉSTER METÁLICO DE
ACEITE DE MADHUCA + 20% DIÉSEL

100EMM: ÉSTER METÁLICO DE ACEITE
DE MADHUCA

GNL: GAS NATURAL LICUADO

GNC: GAS NATURAL COMPRIMIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL

Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural son la fuerza impulsora de la civilización industrial moderna. A nivel mundial [1], los combustibles fósiles representan el 86.66% de la energía primaria consumida repartiéndose en un 32,87%, 30,06% y 23,73% entre el petróleo, carbón y gas natural respectivamente.

La producción global de petróleo era de 4130,2 millones de tep en 2013 [1], mientras que en 1990 era de 3175,4 millones de tep. Es decir, la producción de petróleo ha crecido un 1,31% de media cada año desde la década de los 90, la demanda mundial de petróleo no ha dejado de crecer.

Según la Administración de Información sobre Energía de Estados Unidos [2] el uso mundial de combustibles líquidos aumentará desde los 85,7 millones de barriles por día en 2008 hasta los 112,2 millones de barriles por día en 2035. Se espera que la demanda de estos recursos aumente todavía más debido a la expansión económica de los países en desarrollo. Sin embargo, la dependencia de los combustibles fósiles, en especial del petróleo, va a dar lugar a que las reservas se aproximen rápidamente al punto en que éstas hayan sido explotadas a más de la mitad de su capacidad, dada la naturaleza limitada y no renovable del petróleo.

En Europa, en el año 2013 el 30,03% de la energía primaria consumida provenía del petróleo [1,3], un 31,58% de la energía final fue destinada al sector del transporte.

En España, en el año 2013 el transporte ocupa el 39,26% del consumo final de energía [4]. Concretamente, la carretera representa el 88,72% del total de consumos de transporte.

Desde 1985, los consumos de este sector han aumentado 2,5 veces los valores de dicho año. Los vehículos particulares representan el 50% del consumo de transporte por carretera. Por tanto, este sector precisa mejorar su eficiencia energética y reducir los consumos de energía primaria.

Además, se debe tener en cuenta, que la dependencia del petróleo en el sector del automóvil es total, se abastece en casi un 99% de productos petrolíferos.

Según el Observatorio del Transporte y la Logística en España (año 2013) [5], “el sector del transporte es el responsable de algo más del 25% de las emisiones de gases de

efecto invernadero (GEI), una cifra superior a la media europea (en torno al 20%). Entre los años 2000 y 2011 los gases de efecto invernadero se redujeron un 8% pero en el transporte las emisiones aumentaron en un 3%. En los modos de transporte, la carretera es el responsable del 91% de las emisiones, a su vez, los viajeros son responsables del 75% de las emisiones, el 25% se debe al transporte de mercancías. El vehículo privado, es decir, el turismo, representa el 62% de las emisiones de la carretera y el 82% de las debidas al transporte de viajeros por carretera. En los últimos años, la eficiencia energética de la carretera en relación con el tráfico que canaliza, ha experimentado un ligero empeoramiento”.

Si se continúa con la misma tendencia se prevé que para el año 2030 las emisiones del tráfico rodado se sitúen en un 35% más altas respecto a los niveles de 1990. De esta manera se incumpliría el objetivo del Libro Blanco para el transporte de la Comisión Europea [6]; en 2050 se pretende alcanzar una reducción del 60% de las emisiones de CO₂ respecto a 1990.

El transporte por carretera, es por tanto, uno de los sectores que más energía final demanda, teniendo un papel fundamental en las emisiones de contaminantes, es necesario incentivar tecnologías más limpias en este sector.

Actualmente, el uso del vehículo eléctrico es testimonial, la máquina térmica que domina este sector es el motor alternativo de combustión interna (mayoritariamente el motor de 4 tiempos). La modificación y mejora del diseño de estos dispositivos no es suficiente para optimizar consumos y emisiones, por lo que para lograr estos propósitos es necesario poner el foco en los combustibles alternativos.

Los combustibles alternativos ofrecen una solución viable a dos problemas fundamentales del transporte: la dependencia del petróleo y el impacto ambiental de las emisiones atmosféricas.

Para alcanzar lo que se proponía en el año 2000 en el Libro Verde sobre la seguridad del abastecimiento energético en la Unión Europea [7] y reducir la dependencia energética del petróleo, se planeó sustituir el 20% de los combustibles convencionales del transporte terrestre para el año 2020. Se proponía básicamente la intensificación de los biocarburantes para el corto plazo, el gas natural para el medio plazo y el hidrógeno a largo plazo.

Por consiguiente, la Comisión Europea ha decidido incentivar no sólo a los biocarburantes, sino también, al gas natural comprimido (GNC), al gas natural licuado (GNL) y al hidrógeno.

Dentro de los biocarburantes, el biodiesel procedente de especies no comestibles reduce el precio y elimina los impactos negativos del biodiesel procedente de especies comestibles: explotación de tierras para cultivos de productos alimentarios, y por

ende, escasez de suministro de productos agrícolas destinados a alimentación. En este estudio se tendrá en cuenta tanto el biodiesel procedente de especies alimenticias como el procedente de especies no comestibles.

Todos los agentes que pueden tener un papel relevante en un cambio al uso de combustibles alternativos precisan contar con una información clara y accesible que les permita tomar decisiones a la hora de considerar cambios en la tecnología utilizada o en el combustible consumido.

Desde el punto de vista de la operación de los motores existen diversos estudios, de cara a reducir consumos y mejorar eficiencias [8, 9]. Desde la perspectiva medioambiental los estudios se centran en la medida de las emisiones de los principales contaminantes (CO_2 , NO_x ...) [10, 11]. Desde la perspectiva de sus parámetros de funcionamiento los estudios se centran en cómo los motores alternativos de combustión interna (MACI's) convencionales se comportan con un combustible alternativo y las modificaciones que deberían de implementarse en ellos [11, 35].

Por otro lado, los estudios existentes sólo comparan el comportamiento de un combustible alternativo en un motor convencional con el combustible que se quema habitualmente en él (gasolina o diesel), sin existir análisis comparativos de los diferentes combustibles alternativos entre sí. De tal forma que se ofrece una imagen sesgada de los diferentes combustibles alternativos.

Por lo tanto, se requiere establecer un análisis integral y comparativo entre distintas experiencias para decidir sobre la idoneidad de uno u otro combustible alternativo.

La mayor parte de la información disponible sobre el comportamiento de combustibles alternativos en motores de combustión interna convencionales procede de pruebas en banco de ensayos a distintas condiciones. Su interpretación no es directa, ya que para comparar los resultados obtenidos se hace necesario homogeneizar los datos de las diversas fuentes secundarias, dado que se miden en diferentes condiciones, unidades...

Las perspectivas respecto a los combustibles alternativos para un medio y largo plazo son fundamentalmente medioambientales. No obstante, el parámetro relacionado con el consumo (rendimiento del motor) es determinante también en un escenario de seguridad energética (disponibilidad del combustible adecuada, precios asumibles) y en el seno de un sector como el del transporte terrestre de mercancías y pasajeros en los que el coste del combustible es determinante en la rentabilidad de las empresas.

La elección del combustible alternativo más adecuado no es una tarea sencilla, dado que depende en gran medida del criterio considerado (medioambiental o económico) e incluso de la variable que se analice (p.ej. CO_2 vs materia particulada). Además, el

escenario o el contexto en el que se plantea la elección también juega un papel fundamental a la hora de determinar la idoneidad de un combustible.

Por ejemplo, en escenarios con precios del petróleo bajos la aplicación de criterios de tipo económico llegaría a descartar el uso de biocombustibles, mientras que desde la perspectiva medioambiental de la contribución al cambio climático el problema no quedaría resuelto.

Se trata de un problema de análisis multicriterio en el que los criterios a aplicar en la selección de combustibles alternativos pueden ser numerosos. En este estudio únicamente se han considerado dos criterios:

- Un criterio económico formado por dos subcriterios:
 - el coste del combustible
 - el coste adicional del motor
- Un criterio medioambiental: integrado por varios subcriterios consistentes en los principales tipos de emisiones en la fuente.

Por lo tanto, es necesario avanzar en el conocimiento sobre los combustibles alternativos, considerando su influencia sobre las emisiones, parámetros de funcionamiento del motor y la necesidad de adaptar los subsistemas de los motores alternativos de combustión interna.

1.2 OBJETIVOS

A continuación se enumeran los objetivos que persigue este proyecto final de máster:

- Analizar el comportamiento de los principales combustibles alternativos (hidrógeno, biodiesel, bioetanol, gas natural comprimido y gas natural licuado) en motores de combustión interna en cuanto a sus emisiones (CO_2 , CO, NO_x e hidrocarburos totales) y principales parámetros de funcionamiento (rendimiento y régimen de giro).
- Identificar las modificaciones necesarias de los motores alternativos de combustión interna convencionales para el uso de combustibles alternativos.
- Establecer métodos para normalizar los resultados obtenidos en pruebas bajo diferentes condiciones a una referencia común y para el cálculo de las variables no medidas.
- Hacer una clasificación de los principales combustibles alternativos en función de diferentes criterios medioambientales y económicos.
- Definir un único indicador que permita categorizar los combustibles según su idoneidad ante diferentes escenarios.

Los datos utilizados en este estudio proceden de fuentes secundarias, tal como se comentará en la sección 2.3.

El documento se va a estructurar de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se describe la metodología y herramientas que se han aplicado. El capítulo 3 muestra los resultados obtenidos con la justificación de los mismos, por medio de dichos resultados se desarrolla un análisis multicriterio para distintos escenarios mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). En el capítulo 4 se sintetizan una serie de conclusiones que se derivan de los resultados. En el anexo A se incluye uno de los ficheros utilizados en este estudio donde a modo de ejemplo se muestra cómo se han llevado a cabo los balances de materia y cálculos de combustión. En el anexo B se resumen las modificaciones más significativas que requieren los motores con el uso de combustibles no convencionales. De cara a facilitar la comprensión de los diagramas radiales expuestos en el capítulo 3, el anexo C adjunta unas tablas donde se muestran los valores numéricos normalizados de los indicadores o variables de comparación. El anexo D incorpora los rankings completos obtenidos mediante el análisis multicriterio mostrado en el capítulo 3.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

2.1 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS A COMPARAR

Se trata de comparar entre sí todos aquellos combustibles que la Comisión Europea considera como alternativos (hidrógeno, gas natural, bioetanol y biodiesel) y determinar cómo influyen distintas fracciones de los mismos en mezclas o en uso dual con combustibles convencionales (gasolina y diesel).

La tabla 1 muestra los combustibles que se van a comparar en este trabajo. Asimismo se muestra la codificación de cada combustible de cara a facilitar su análisis. Los porcentajes que aparecen en las mezclas hacen referencia al tanto por ciento en volumen de cada componente.

CODIFICACIÓN		
COMBUSTIBLE	CÓDIGO	
GASOLINA	100G	
DIÉSEL	100D	
H2 PURO	100H2	
5% H2 + 95% GASOLINA	5H2:95G	
10% H2 + 90% GASOLINA	10H2:90G	
15% H2 + 85% GASOLINA	15H2:85G	
20% H2 + 80% GASOLINA	20H2:80G	
25% H2 + 75% GASOLINA	25H2:75G	
16% H2 + 84% DIÉSEL	16H2:84D	
30% H2 + 70% DIÉSEL	30H2:70D	
36% H2 + 64% DIÉSEL	36H2:64D	
46% H2 + 54% DIÉSEL	46H2:54D	
ETANOL PURO	100E	
50% ETANOL + 50% GASOLINA	50E:50G	
80% ETANOL + 20% GASOLINA	80E:20G	
85% ETANOL + 15% GASOLINA	85E:15G	
40% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE PALMA + 60% DIÉSEL	40EMP:60D	
ACEITE DE SEMILLA DE CAUCHO	100AC	
10% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE CAUCHO + 90% DIÉSEL	10EMC:90D	
20% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE CAUCHO + 80% DIÉSEL	20EMC:80D	
50% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE CAUCHO + 50% DIÉSEL	50EMC:50D	
75% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE CAUCHO + 25% DIÉSEL	75EMC:25D	
ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE CAUCHO	100EMC	
20% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE MADHUCA + 80% DIÉSEL	20EMM:80D	
40% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE MADHUCA + 60% DIÉSEL	40EMM:60D	
60% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE MADHUCA + 40% DIÉSEL	60EMM:40D	
80% ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE MADHUCA + 20% DIÉSEL	80EMM:20D	
ÉSTER METÁLICO DE ACEITE DE MADHUCA	100EMM	
GAS NATURAL LICUADO + DIÉSEL (PILOTO)	GNL	13
GAS NATURAL COMPRIMIDO	GNC	

Tabla 1 codificación de los combustibles a comparar

Como se puede observar en la tabla 1, se ha incluido ésteres metílicos originados a partir de aceites de tres fuentes diferentes: Palma, Caucho y Madhuca. El aceite de palma es comestible, mientras que los aceites de caucho y madhuca no.

2.2 PARÁMETROS COMPARATIVOS

La comparación de los combustibles va a basarse en el estudio de 6 variables:

- El rendimiento efectivo, como variable relacionada con el consumo de energía y su influencia sobre los costes de operación del motor. Es por tanto, una variable que también incorpora un criterio económico. Afecta a una categoría de impacto que se repite en muchos estudios: el agotamiento de los recursos naturales. Se trata de un parámetro adimensional, por lo que permite la comparación entre motores de distinto tamaño. Puede expresarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{N_e}{m_f \cdot PCI} \quad (1)$$

donde,

N_e : Potencia efectiva en el cigüeñal [kW]

m_f : flujo másico de combustible [kg/s]

PCI: poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

- Las emisiones específicas (g/kWh) de CO₂, CO, NO_x e hidrocarburos totales. Estas 4 variables permiten tener en cuenta un criterio de comparación medioambiental. Al expresarlas por unidad de energía producida se convierten en variables específicas, permitiendo la comparación de emisiones generadas cuando se produce la misma cantidad de energía útil.
- La relevancia y el número de modificaciones necesarias en un motor para poder usar un determinado combustible. Esta variable incorpora un criterio de comparación económico, dada la necesidad de mayores costes de fabricación del motor para el uso de combustibles alternativos. Únicamente se tendrán en cuenta las modificaciones realizadas sobre el propio motor, no sobre el depósito, los filtros, el sistema estructural del vehículo, el radiador, etc. En el anexo B se resumen las modificaciones más importantes que requieren los motores con el uso de combustibles alternativos.

2.3 DATOS

Ante la imposibilidad de realizar pruebas de campo los datos se extraen de fuentes secundarias, en concreto, de resultados de pruebas específicas en bancos de motores para distintos tipos y mezclas de combustible publicados en revistas científicas.

Tras una primera revisión y ante la ausencia de pruebas representativas a distintos regímenes de carga se opta por seleccionar ensayos a plena carga, dosado estequiométrico y régimen de giro variable. Los parámetros a analizar son la eficiencia y/o el consumo específico de combustible, las emisiones (CO_2 , CO , NO_x e hidrocarburos totales), y la relevancia y el número de modificaciones del motor que requiere cada combustible.

Los motores sobre los que tienen lugar los ensayos son motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC) convencionales de aspiración natural que en ocasiones han sido modificados para su adaptación a cada tipo de combustible alternativo. Una buena parte de estos motores pertenecen a turismos comerciales el resto son motores de pruebas de laboratorio. Los parámetros de dichos MACI's se sitúan en los rangos indicados en la tabla 2.

PARÁMETRO	RANGO
Número de cilindros (z)	1 ÷ 6
Cilindrada (V_T) [cm^3]	380 ÷ 3300
Diámetro (D) [mm]	76,5 ÷ 108
Carrera (S) [mm]	64 ÷ 120
Relación de compresión (r)	8 ÷ 19
Potencia máxima ($N_{e_{\max}}$) [kW]	12 ÷ 150

Tabla 2 rangos de los parámetros pertenecientes a los maci's analizados

Los rangos de la tabla 2 son típicos de motores pertenecientes a turismos comerciales.

A continuación, se presentan las fuentes de las que se han extraído datos obtenidos en distintas pruebas para cada tipo de combustible alternativo:

Hidrógeno	[10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]
Biodiésel	[19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]
Bioetanol	[24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31]
Gas natural	[32], [33], [34], [35]

Tabla 3 fuentes secundarias

2.4 TRATAMIENTO DE DATOS

La principal problemática de manejar datos procedentes de fuentes secundarias es la heterogeneidad en las condiciones de las pruebas, las variables medidas y los resultados presentados, es necesario normalizar y homogeneizar toda esta colección de datos técnicos.

Otra dificultad de este estudio estriba en analizar datos que han sido obtenidos bajo distintas condiciones atmosféricas. Las normas DIN 70020 e ISO 1585 (entre otras) permiten corregir los datos medidos y llevarlos a una referencia común por medio de factores de corrección [46]. La norma DIN 70020 establece la referencia común en una temperatura de 20°C y una presión de 1 atm, mientras que la norma ISO 1585 lo hace a una temperatura de 25°C y una presión de 1 bar. Los datos técnicos de los ensayos fueron en su mayoría medidos en condiciones de presión cercanas a 1 atm y en un rango de temperaturas comprendido entre 23 y 30°C, en consecuencia, no precisaron ser corregidos. El resto de los datos fueron corregidos usando alguna de las anteriores normas por los propios autores de los experimentos, por ende, la corrección no fue necesaria en este estudio.

No todas las variables de comparación utilizadas en este estudio figuran en los resultados de las pruebas, y sobre todo, las unidades de medida cambian enormemente de un ensayo a otro. En algunos ensayos no figuran las emisiones de CO, o de CO₂. Por otro lado, las emisiones se suelen reflejar en ppm, es necesario trasladarlas a unidades específicas (g/kWh) para permitir la comparación entre ensayos y motores. En algunos de los ensayos, se sustituye el rendimiento efectivo por el consumo específico.

Conociendo el consumo específico y el poder calorífico de cada combustible se puede obtener el rendimiento efectivo mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{1}{g_{ef} * PCI} \cdot \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \quad (2)$$

Donde,

g_{ef} : Consumo específico de combustible [g/kWh]

PCI: poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

Si se utilizan mezclas o combustible dual debe tenerse en cuenta la fracción en volumen de cada componente, de esta manera en la ecuación (2) debe introducirse el PCI de la mezcla:

$$PCI_{mezcla} = \frac{y_a \cdot PM_a \cdot PCI_a + y_b \cdot PM_b \cdot PCI_b}{PM_{mezcla}} \quad (3)$$

$$PM_{mezcla} = y_a \cdot PM_a + y_b \cdot PM_b \quad (4)$$

Donde,

PCI_{mezcla} : poder calorífico inferior de la mezcla o el combustible dual [kJ/kg]

PM_{mezcla} : peso molar de la mezcla [kg/kmol]

y_a : fracción volumétrica del componente "a" de la mezcla

PM_a : peso molar del componente "a" [kg/kmol]

PCI_a : poder calorífico inferior del componente "a" [kJ/kg]

Para calcular las emisiones de CO o CO₂ que no figuran en las pruebas debe realizarse cálculos de combustión, siendo conocidos la composición del combustible, el consumo específico, el dosado y el resto de las emisiones.

Por otro lado, en la mayor parte de los ensayos, las emisiones se expresan en ppm. Para convertir las emisiones a g/kWh debe realizarse un balance de masa mediante la reacción de combustión y calcular las fracciones molares de todos los productos de combustión, conociendo las fracciones molares y el consumo específico de combustible. En el anexo 1 se muestra uno de los ficheros de EES utilizados en este estudio a modo de ejemplo para ilustrar el procedimiento de cálculo de las emisiones.

Para llevar a cabo los cálculos anteriores se han establecido dos aproximaciones en los productos de combustión:

- Los NO_x están formados únicamente por NO₂: los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de gases compuestos por: óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El dióxido de nitrógeno es el principal contaminante de los NO_x. Se genera como subproducto en todas las reacciones de combustión a elevada temperatura [36].
- Los HC están formados únicamente por benceno (C₆H₆): Los hidrocarburos inquemados están formados por un amplio grupo de compuestos cuyos enlaces están formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno. Abundan en el crudo de petróleo, gas natural y carbón. Están formados por metano (CH₄), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀), benceno (C₆H₆), acetileno (C₂H₂), etc. Puesto que es muy complicado determinar a priori la composición de los HC que se van a formar con un determinado combustible, y al mismo tiempo, el benceno es un constituyente natural de la gasolina y uno de los principales

componentes de los HC, va a hacerse la aproximación de que los HC están formados únicamente por benceno [36, 37].

La tabla 4 muestra las fórmulas químicas de los combustibles y los PCI que se han empleado para modelar las reacciones de combustión.

COMBUSTIBLE	FÓRMULA	PCI [kJ/kg]
Gasolina	C_8H_{18}	43500
Diesel	$C_{12}H_{23}$	43000
Hidrógeno	H_2	119930
Biodiesel	$C_{17}H_{34}O_2$	36800
Bioetanol	C_2H_5OH	26790
Gas natural licuado (GNL)	$(0,998CH_4 + 0,0010C_2H_6 + 0,0010N_2)$ [33]	49244
Gas natural comprimido (GNC)	$(0,9442CH_4 + 0,0229C_2H_6 + 0,0003C_3H_8 + 0,0025C_4H_{10} + 0,0057CO_2 + 0,0044N_2 + 0,02H_2O)$ [32]	46900

Tabla 4 fórmulas químicas y PCI de los combustibles

Una vez se ha llegado a este punto, a partir de los datos de los ensayos y de los cálculos explicados anteriormente se obtienen emisiones y eficiencias que se distribuyen en distintos rangos o intervalos de regímenes de giro, cada rango está formado por una amplitud de 500 rpm. Los resultados se clasifican en 8 intervalos de regímenes de giro. En total, los 8 intervalos abarcan regímenes de giro comprendidos entre 1100 rpm y 5000 rpm. No obstante, algunos combustibles no están representados en alguno de los intervalos por falta de datos. Es complicado obtener información de todos los combustibles estudiados por medio de fuentes secundarias para un amplio conjunto de revoluciones.

En una primera aproximación se presentan las variables a análisis en diagramas radiales (véase apartado 3.1), posteriormente se elaborará un ranking de combustibles para distintos escenarios por medio de un análisis multicriterio (véase apartado 3.2). Para ello es necesario establecer una escala común para todas las variables de comparación, es decir, se deben “adimensionalizar” las 6 variables de comparación. Cada variable de comparación va a expresarse en una unidad diferente (nº de modificaciones, g/kWh, % rendimiento). Para normalizar se recurre al método propuesto en [38]. Las variables de comparación han sido normalizadas a una escala común comprendida entre 0 y 10 donde 0 indicará el peor valor de la variable dentro del grupo de experiencias que sean representadas en un intervalo de regímenes de giro, es decir, el peor rendimiento, las máximas emisiones de CO_2 , el máximo número de

modificaciones, etc. y 10 indicará el mejor valor posible que puede asumir la variable, 100% de rendimiento efectivo, 0 emisiones, 0 modificaciones del motor, etc.

Para normalizar los datos de rendimiento efectivo se recurre a la siguiente ecuación:

$$\eta_{normalizado} = \eta * 10 \quad (5)$$

El resto de variables se normalizan mediante la siguiente expresión:

$$variable_{normalizada} = \frac{valor_{max}-variable}{valor_{max}} \cdot 10 \quad (6)$$

Donde,

variable: es el valor numérico de la variable que se desea normalizar

valor_{max}: es el máximo valor de la variable en el intervalo de regímenes de giro estudiado.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DIAGRAMAS RADIALES

En esta sección se muestran las variables de análisis en gráficos radiales para cada rango de regímenes de giro. El diagrama radial permite condensar gran cantidad de información en un único gráfico. De esta manera, se pueden visualizar fácilmente las fortalezas y debilidades de cada combustible. Cada variable de comparación o indicador se sitúa en un vértice del diagrama y cada línea cerrada de un mismo color representa a un combustible alternativo. Cuanto más se aproxime un determinado combustible a la periferia del gráfico radial, mejor será su comportamiento frente a los de su grupo (menor número de modificaciones necesarias, más rendimiento y menores emisiones), por el contrario, cuanto más se acerque un combustible al centro del diagrama peor comportamiento adoptará frente a los de su grupo. Esto es así por la estrategia adoptada en la normalización de los datos.

3.1.1 RANGO DE [1100, 1500] RPM

En la Figura 1 se puede ver el diagrama radial para la mayoría de combustibles alternativos en el rango de 1100 a 1500 rpm. Se puede observar que en la periferia del gráfico se sitúa un combustible ideal, es decir, aquel que presenta cero emisiones, 100% de rendimiento efectivo, y no requiere de modificaciones del motor para su uso. Por ende, cuanto más se acerque un combustible a la periferia más se aproximarán sus características a las de un combustible ideal. Dado que son representados un gran número de combustibles, no se aprecian fácilmente los detalles del diagrama. En la Tabla 5 (anexo C) se muestran los valores numéricos normalizados de las variables para cada combustible.

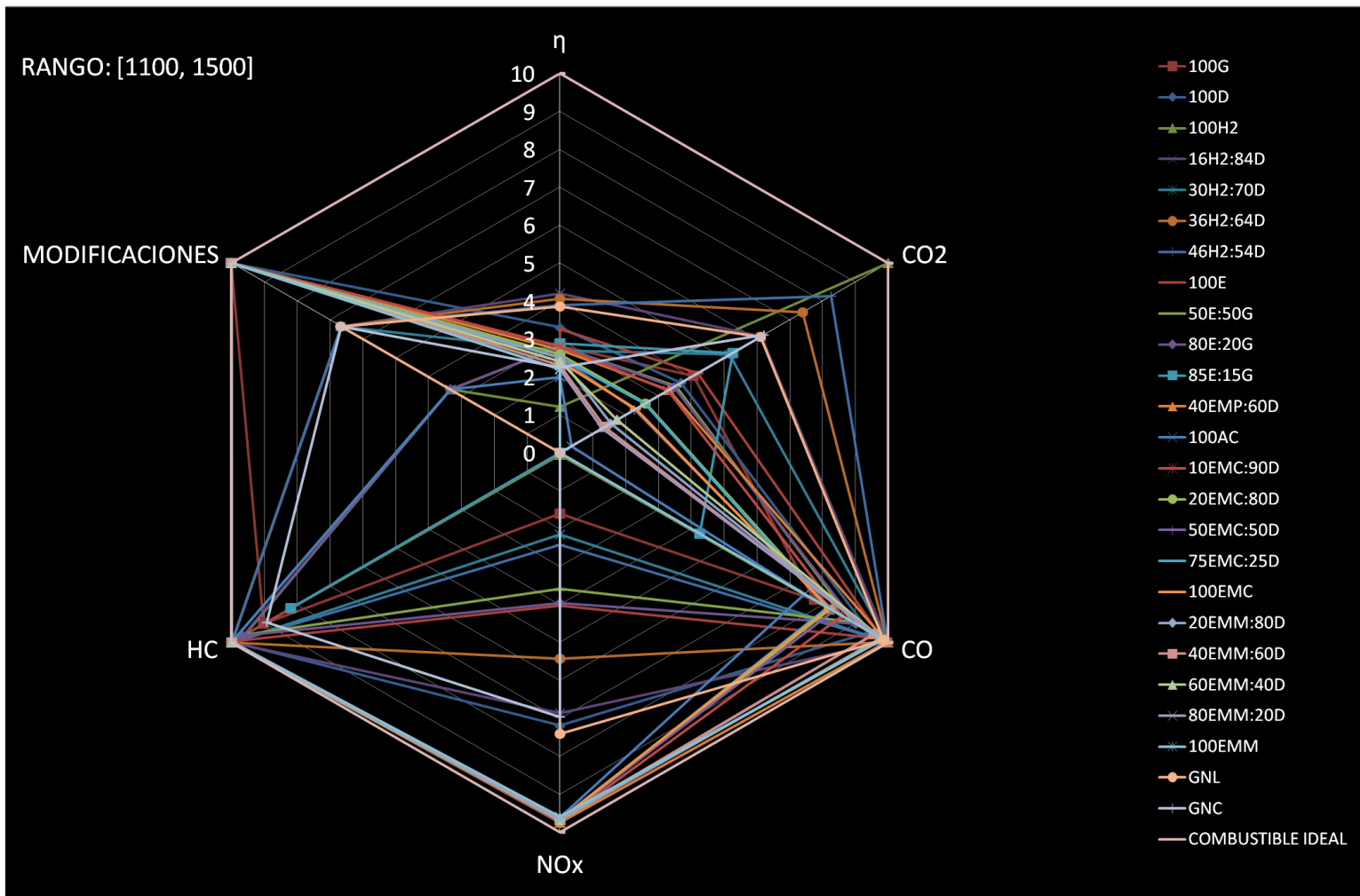


Fig.1 diagrama radial, rango [1100, 1500]

Tanto en el gráfico como en la tabla, se puede apreciar que 100H2 presenta emisiones ideales de CO₂, CO y HC (es decir, cero emisiones). 100H2 se corresponde con el hidrógeno puro. Por estequiometría, el H₂ no genera los anteriores compuestos en su reacción de combustión, dado que no posee átomos de carbono en sus moléculas. No obstante, el H₂ puro es el combustible que peor rendimiento efectivo promueve. Esto se debe a la baja densidad del hidrógeno. El hidrógeno es más ligero que el aire, de tal forma que durante la carrera de aspiración del pistón el H₂ desplaza parte del aire, dejando menos volumen disponible para el aire que se bombea en el cilindro. De esta manera se reduce la eficiencia volumétrica de aspiración del motor y con ello la eficiencia efectiva. Otro factor que explica la baja eficiencia térmica del H₂ puro es el elevado flujo de calor que escapa a través de las paredes de los cilindros durante la fase de combustión. El hidrógeno posee un mayor PCI que la gasolina o el diesel. Además, ostenta muy bajas energías de ignición, límites amplios de inflamabilidad de mezclas de hidrógeno-aire y alta velocidad de propagación de la llama, estos tres factores facilitan que la reacción de combustión del H₂ tienda a ser completa. La combustión completa genera un mayor pico de presión en el cilindro, y por ende, da lugar a una mayor temperatura en el cilindro. Tanto un elevado PCI como una reacción de combustión completa facilitan elevadas temperaturas, con lo que se generan importantes flujos de calor que escapan del cilindro reduciéndose la eficiencia efectiva.

Los combustibles del 40EMP:60D al 100EMM presentan las menores emisiones de NOx. Estos se corresponden con distintas mezclas de biodiesel con diesel. La formación de NOx es un mecanismo que depende fuertemente de la temperatura. El biodiesel posee un PCI inferior al del diesel, por lo tanto, al mezclar biodiesel con diesel se reduce el PCI de la mezcla y con ello la temperatura en la combustión. De esta manera se reduce la formación de NOx al emplear biodiesel.

Por el contrario al caso anterior, el combustible 85E:15G (mezcla de 85% etanol y 15% de gasolina) es el que mayores emisiones de NOx presenta. Posiblemente esto se deba a que el contenido de oxígeno en la molécula de etanol facilite la formación de NOx.

El mejor valor de rendimiento se corresponde al 16H2:84D (mezcla de 16% de H₂ y 84% de diesel). El hidrógeno posee una alta velocidad de propagación de llama y además una mayor capacidad de difusión que otros combustibles. La adición de hidrógeno al combustible diesel podría aumentar la homogeneidad de la pulverización de combustible diesel, ya que la elevada difusividad del H₂ da lugar a una mezcla de combustible más uniforme. Por otro lado, al añadir H₂ la relación H/C aumenta, por ende, la duración de la combustión se acorta. Estos tres factores (alta velocidad de propagación de la llama, mezcla homogénea de combustible y corta duración de la combustión) favorecen el aumento del rendimiento de la reacción de combustión y con ello el aumento del rendimiento efectivo.

El peor valor de emisiones de CO₂ lo presenta el 100EMM (Éster metílico de aceite de madhuca). El biodiesel presenta un 11% de contenido de oxígeno. Lo que promueve que la reacción de combustión tienda a ser completa, a mayor cantidad de biodiesel más completa será la combustión, y por lo tanto, más CO₂ se emitirá.

Las máximas emisiones de CO se corresponden al GNC (gas natural comprimido). El gas natural conlleva una velocidad de combustión lenta, lo que da lugar a una combustión más incompleta. Por otro lado, el gas natural tiende a desplazar al aire en la carrera de admisión, con lo que se reduce el rendimiento volumétrico, favoreciéndose, también de esta manera una combustión incompleta. Una combustión incompleta da lugar a una mayor generación de CO.

Las peores emisiones de HC las presenta el gas natural licuado (GNL). Estas emisiones son promovidas por una reacción de combustión incompleta favorecida por las causas descritas en el anterior párrafo. Una reacción incompleta resulta en una menor temperatura de combustión, y conduce a una menor oxidación de los hidrocarburos no quemados, y por lo tanto, emisiones más altas.

Como es lógico, ni la gasolina ni el diesel (100G y 100D) requieren modificaciones en el motor. Tampoco requieren modificaciones los combustibles 40EMP:60D, 10EMC:90D, 20EMC:80D,..,100EMM. Es decir, todas las mezclas de biodiesel. Por el contrario, las

máximas modificaciones en el motor las requieren los combustibles 100E, y el 85E:15G. Es decir, el etanol puro y la mezcla de 85% de etanol y 15% de gasolina.

A continuación se agrupan los combustibles por tecnologías con objeto de apreciar qué tendencias aparecen dentro de una misma tecnología. La Figura 2 muestra el diagrama radial para el hidrógeno y sus mezclas con diesel.

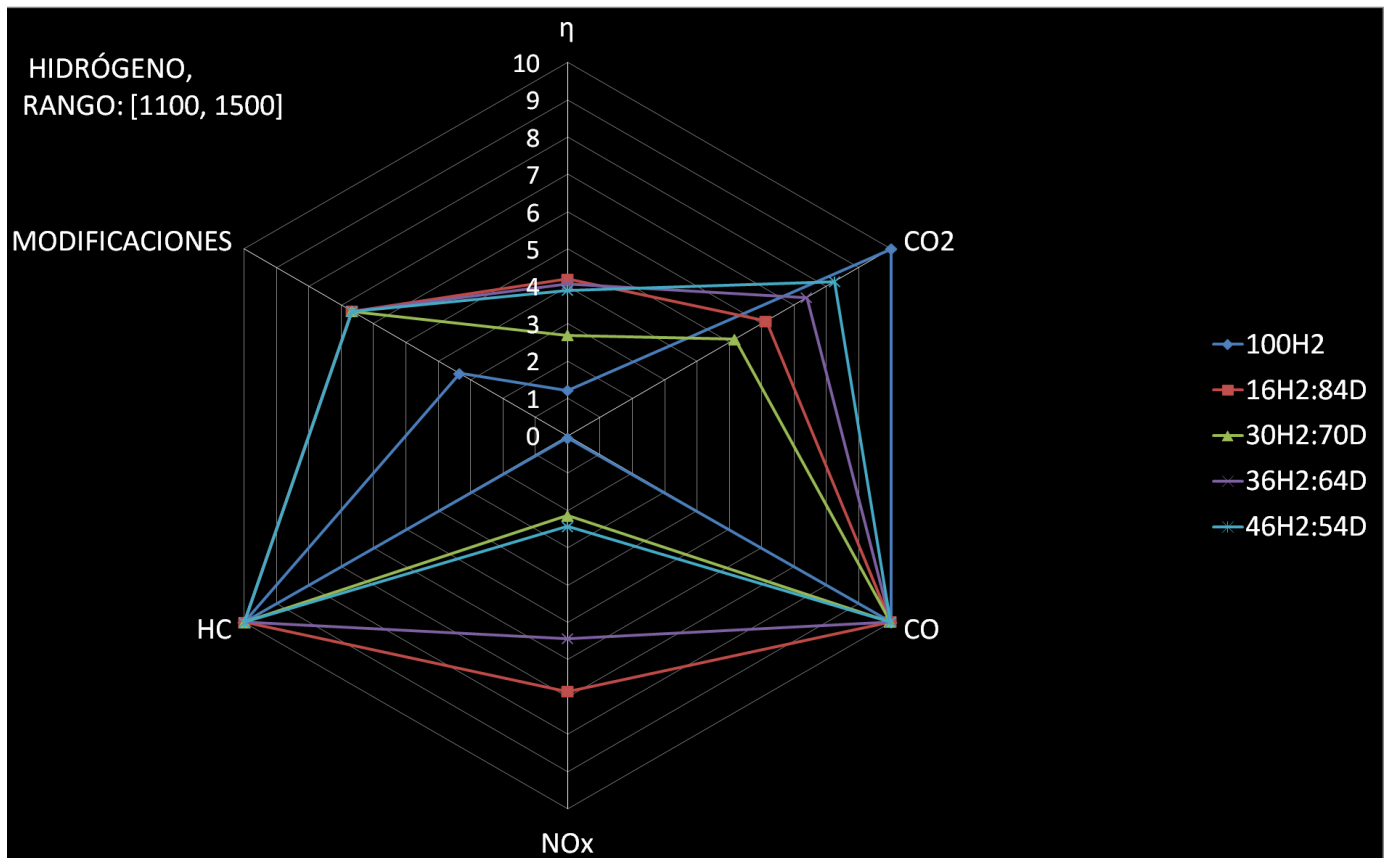


Fig.2 diagrama radial hidrógeno, rango [1100, 1500]

En las emisiones de CO₂, CO y HC se observa que a medida que aumenta la fracción de H₂ que se añade en la mezcla H₂-diésel menores emisiones tienen lugar de los anteriores compuestos. Esto se debe principalmente a que si aumenta la cantidad de H₂ de la mezcla disminuye la cantidad de átomos de carbono del combustible. Además, cuanto más H₂ se añada más aumenta el rendimiento de la combustión (como se explica en párrafos superiores) facilitando la oxidación del CO y de los hidrocarburos inquemados. En el caso de las emisiones de NO_x la situación es contraria. Cuanto más H₂ se añada a la mezcla de combustible, más tiende la reacción de combustión a ser completa. Al mismo tiempo, aumenta el PCI de la mezcla conforme se incrementa el contenido de H₂. Estas dos razones implican un aumento de temperatura en la combustión, y por ende, se promueven mayores emisiones de NO_x.

Si aumenta la fracción de H₂ de la mezcla el rendimiento efectivo tiende a disminuir. Si aumenta la cantidad de H₂ aumenta el rendimiento de la combustión pero también aumentan los flujos de calor que escapan a través de las paredes de los cilindros y

además disminuye el rendimiento volumétrico (la razón de esto se explica en párrafos superiores), con lo que el rendimiento efectivo disminuye.

Las mezclas de hidrógeno con diesel requieren de menores modificaciones que el uso de H₂ puro.

En la Figura 3 se muestra el diagrama radial del etanol puro y sus mezclas con gasolina.

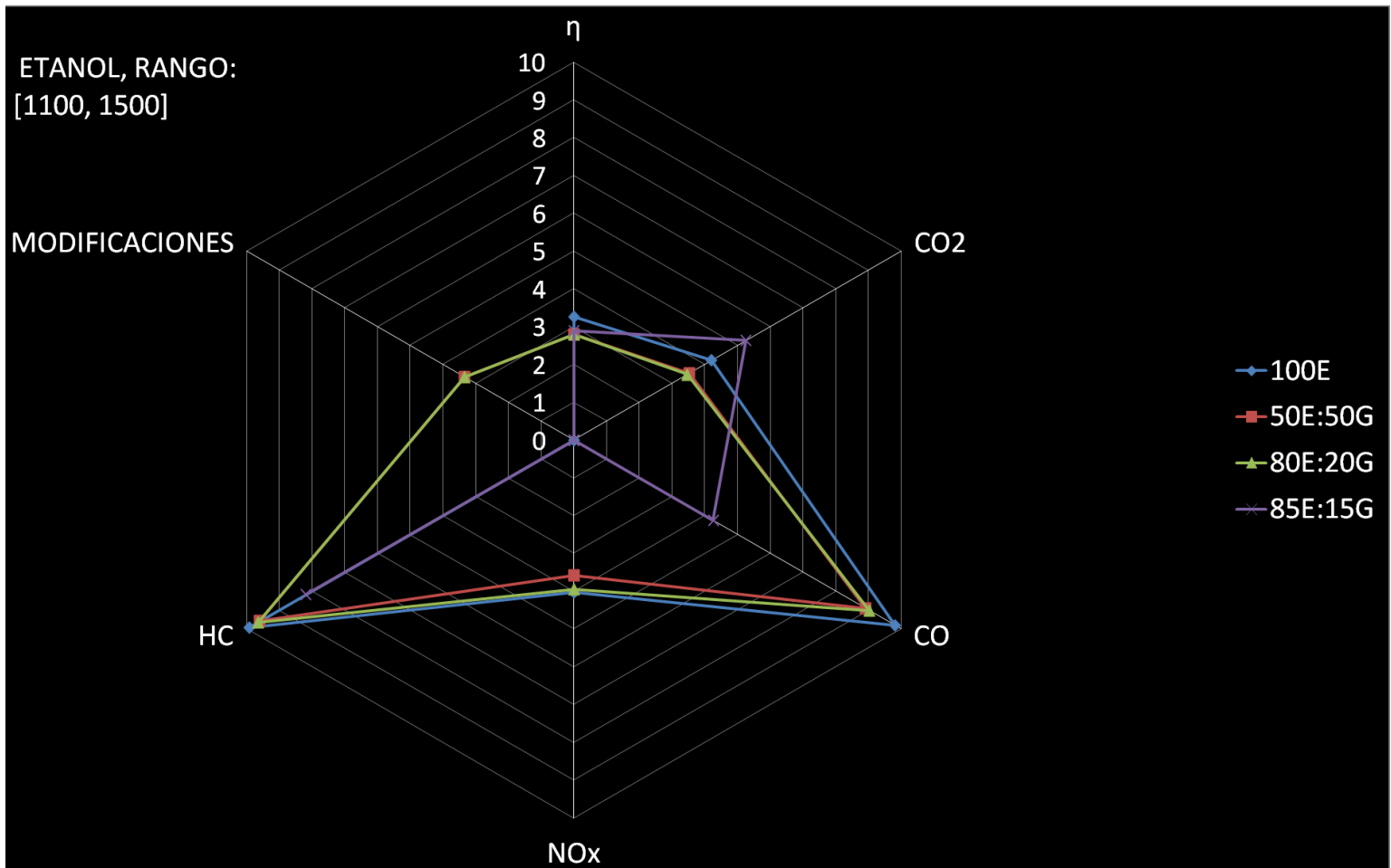
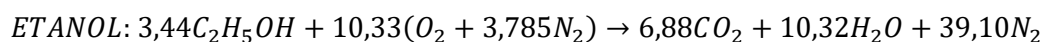
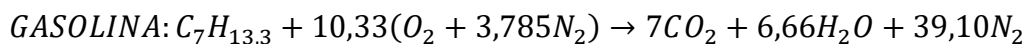


Fig.3 diagrama radial etanol, rango [1100, 1500]

Puede apreciarse que a medida que aumenta el contenido de etanol de la mezcla con gasolina tiende a disminuir las emisiones de HC, CO y CO₂ (a excepción de 85E:15G). Una explicación de este comportamiento radica en las reacciones químicas de combustión:



Como se puede ver a partir de las ecuaciones químicas de reacción completa del etanol y la gasolina, el etanol tiene una menor cantidad de átomos de carbono que la gasolina. Por pura estequiometría se reducen los productos con átomos de carbono en la combustión. Por otro lado, el etanol posee un 35% de oxígeno, este oxígeno facilita

la oxidación del CO y los hidrocarburos inquemados, con lo que mejora la eficiencia de la reacción de combustión.

Es importante apreciar que las emisiones de CO₂ son superiores en el etanol puro que con una mezcla etanol-gasolina con elevado contenido en etanol. A medida que las fracciones de etanol en la mezcla se sitúan por encima del 80% si se incrementa la cantidad de etanol disminuyen las emisiones de CO₂, ya que el efecto de facilitar la oxidación de CO a CO₂ es menos dominante frente a la menor cantidad de carbono de la mezcla combustible que implica el uso del etanol. Sin embargo, para el etanol puro las emisiones de CO₂ son mayores que para una mezcla con gasolina con alto contenido en etanol. Ya que el uso de etanol puro conlleva un mayor contenido de oxígeno en el combustible (el 35% del combustible es oxígeno), facilitando la oxidación de CO a CO₂, de esta manera se incrementan las emisiones de dióxido de carbono.

Se aprecia que a medida que aumenta el contenido de etanol las emisiones de NO_x tienden a disminuir (a excepción del 85E:15G). De las anteriores reacciones de combustión puede observarse que el etanol tiene alrededor de un 30% más de moléculas triatómicas en los productos de combustión que la gasolina. Esto significa que los productos de combustión del etanol **poseen un calor específico mayor que los de la gasolina**. Por otro lado, si se aumenta la cantidad de etanol en la mezcla, **el poder calorífico disminuye**. Además, con el contenido de etanol se **aumenta el calor latente de la mezcla**, generándose un efecto de enfriamiento del combustible en el colector de admisión. Estos tres factores dan lugar a que la temperatura durante la combustión disminuya, y por ende, se dificulta la formación de NO_x.

A medida que aumenta el contenido de etanol de la mezcla el rendimiento efectivo aumenta. Esto se debe a la disminución del flujo de calor que escapa a través de las paredes de los cilindros al reducirse la temperatura de combustión con la adición de etanol (como se ha explicado en el párrafo anterior). Además si se aumenta el contenido de etanol aumenta la eficiencia volumétrica, dado que se disminuye la temperatura en el colector de admisión. También, como se ha visto en el anterior párrafo aumenta el rendimiento de la reacción de combustión. Un aumento de la eficiencia volumétrica, una reducción en el flujo de calor que atraviesa la pared de los cilindros y un mayor rendimiento de la reacción de combustión resulta en una mejora del rendimiento efectivo.

A elevadas fracciones de etanol en la mezcla el motor precisa modificaciones.

La Figura 4 representa el diagrama radial del biodiesel y sus mezclas con el diesel. Dado que hay un gran número de combustibles representados no se aprecia bien el gráfico.

En la Tabla 6 (anexo C) se muestran los valores numéricos de los indicadores.

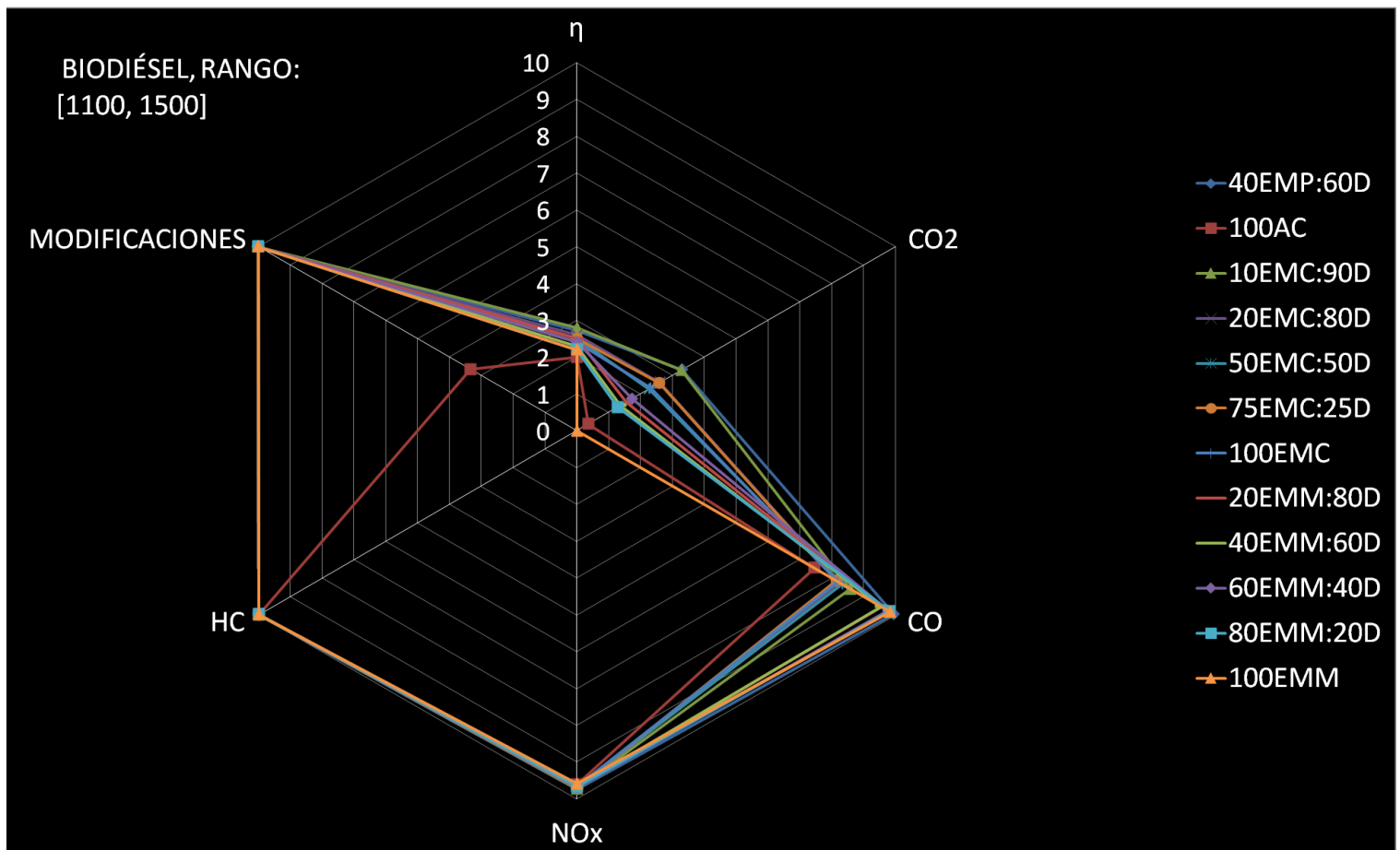


Fig.4 diagrama radial biodiesel, rango [1100, 1500]

No se aprecia una gran diferencia en las variables de comparación a excepción de las emisiones de CO y CO₂ del rendimiento y de las modificaciones del 100AC, y de las emisiones de CO₂ del 100EMM.

El combustible 100AC se corresponde con el aceite puro de semilla de caucho. Presenta valores elevados de emisiones de CO y CO₂ y el peor rendimiento térmico del grupo. Las mayores emisiones de CO y el peor rendimiento se pueden explicar fundamentalmente por dos razones:

- Bajo PCI del aceite puro
- Alta viscosidad del aceite puro.

Un bajo PCI conlleva una menor temperatura en la combustión y una menor salida de energía útil. A menor temperatura de combustión más dificultad encontrará el CO para oxidarse.

Una alta viscosidad de un combustible líquido afecta a las propiedades de flujo del combustible, tales como la atomización de la pulverización, la consecuente vaporización, y la mezcla de aire-combustible en la cámara de combustión. La reacción de combustión tiende a ser más incompleta reduciéndose el rendimiento de la reacción de combustión, por ende, generándose una mayor cantidad de CO.

Si se atiende a las modificaciones, se puede apreciar que las distintas mezclas de los ésteres metílicos con el diesel no requieren de modificaciones del motor. En cambio, el uso de aceite puro como combustible requiere de varias modificaciones.

El 100EMM se corresponde al éster metílico de aceite de madhuca, es decir, a una mezcla de 100% biodiesel y 0% diesel. Las peores emisiones de CO₂ las presenta este combustible. Una mayor concentración de biodiesel en una mezcla suele implicar una mayor producción de CO₂. Aproximadamente el 11% de biodiesel es oxígeno (C₁₇H₃₄O₂). Este contenido en oxígeno facilita que el CO se oxide para formar CO₂ volviéndose la reacción de combustión más completa. A más biodiesel más contenido de oxígeno en el combustible.

La Figura 5 muestra el diagrama radial para el gas natural. En él se compara el gas natural licuado (GNL) frente al gas natural comprimido (GNC).

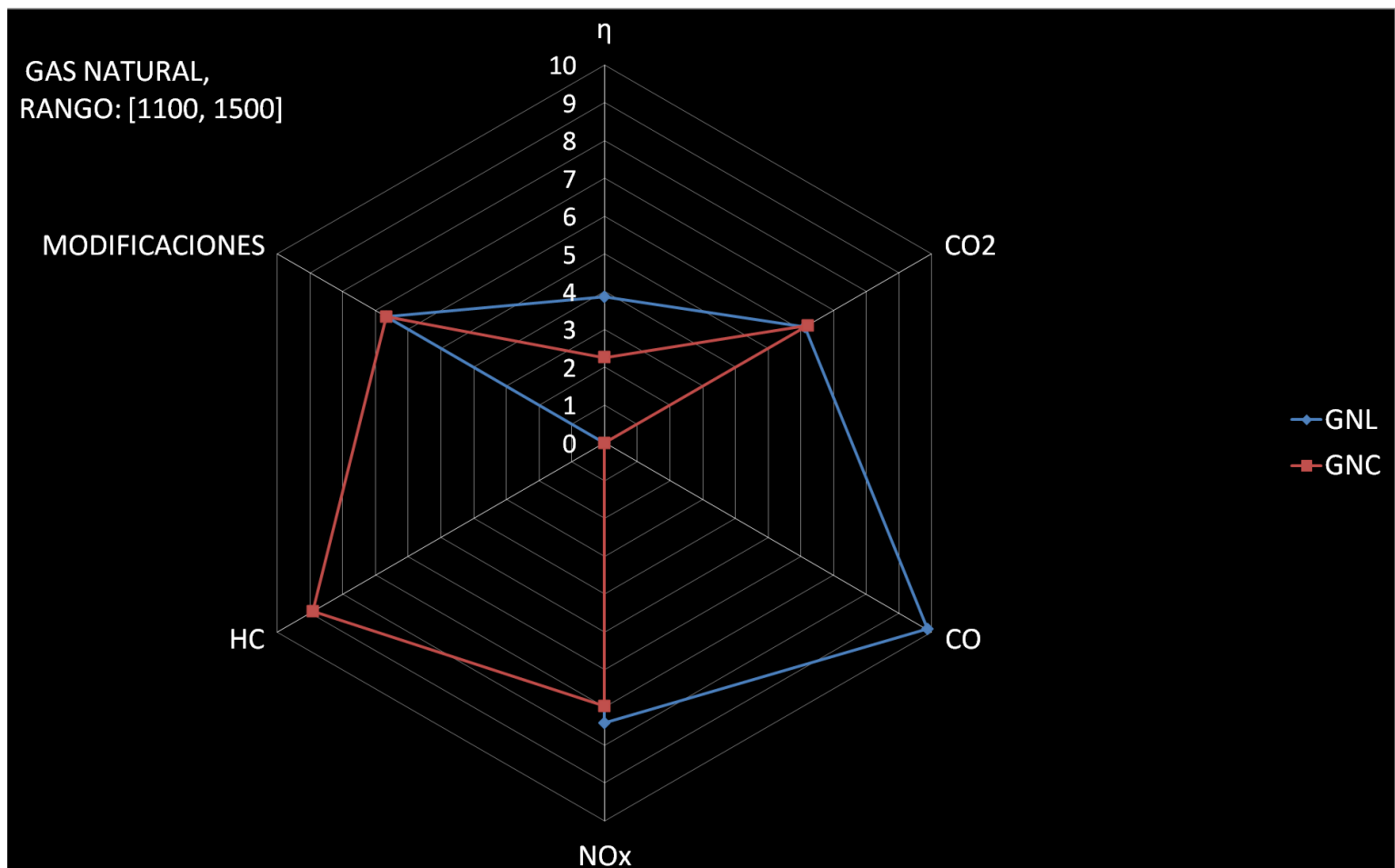


Fig.5 diagrama radial gas natural, rango [1100, 1500]

Si se observan las emisiones de ambos combustibles se puede apreciar que las emisiones de CO₂ son similares en ambos combustibles. En cambio, en las emisiones de CO y HC hay una gran disparidad. Por un lado, las emisiones de HC son superiores en el caso del gas natural licuado (GNL) pero las emisiones de CO son inferiores que con respecto al gas natural comprimido (GNC). Los combustibles líquidos tienden a presentar una mayor dificultad en alcanzar una buena atomización y en la evaporación para lograr una mezcla homogénea en comparación con los combustibles gaseosos, dado que requieren de un mayor tiempo. Por lo tanto, los combustibles líquidos tienen una mayor dificultad en lograr una combustión completa. Esto podría explicar las mayores emisiones de HC del gas natural licuado frente al gas natural comprimido.

Los combustibles gaseosos tienden a barrer parte del aire durante la aspiración del motor favoreciendo la formación de una mezcla rica en el interior de los cilindros. La ausencia de oxígeno en la mezcla dificulta la oxidación de CO a CO₂, lo que explica una mayor emisión de CO por parte del gas natural comprimido.

Las emisiones de NO_x son semejantes para ambos combustibles aunque son ligeramente mayores para el gas natural comprimido.

El gas natural comprimido presenta una peor eficiencia térmica, posiblemente por el hecho de que la eficiencia volumétrica de los combustibles gaseosos tienda a ser inferior que la de los combustibles líquidos (como se ha explicado en párrafos superiores los combustibles gaseosos tienden a barrer al aire durante la admisión al cilindro)

En cuanto a modificaciones, ambos combustibles requieren el mismo número y tipo de modificaciones en el motor.

3.1.2 RANGO DE (1500, 2000] RPM

La Figura 6 y la Tabla 7 (anexo C) representan respectivamente el diagrama radial y los valores numéricos normalizados para el rango de regímenes de giro comprendido entre 1500 y 2000 rpm.

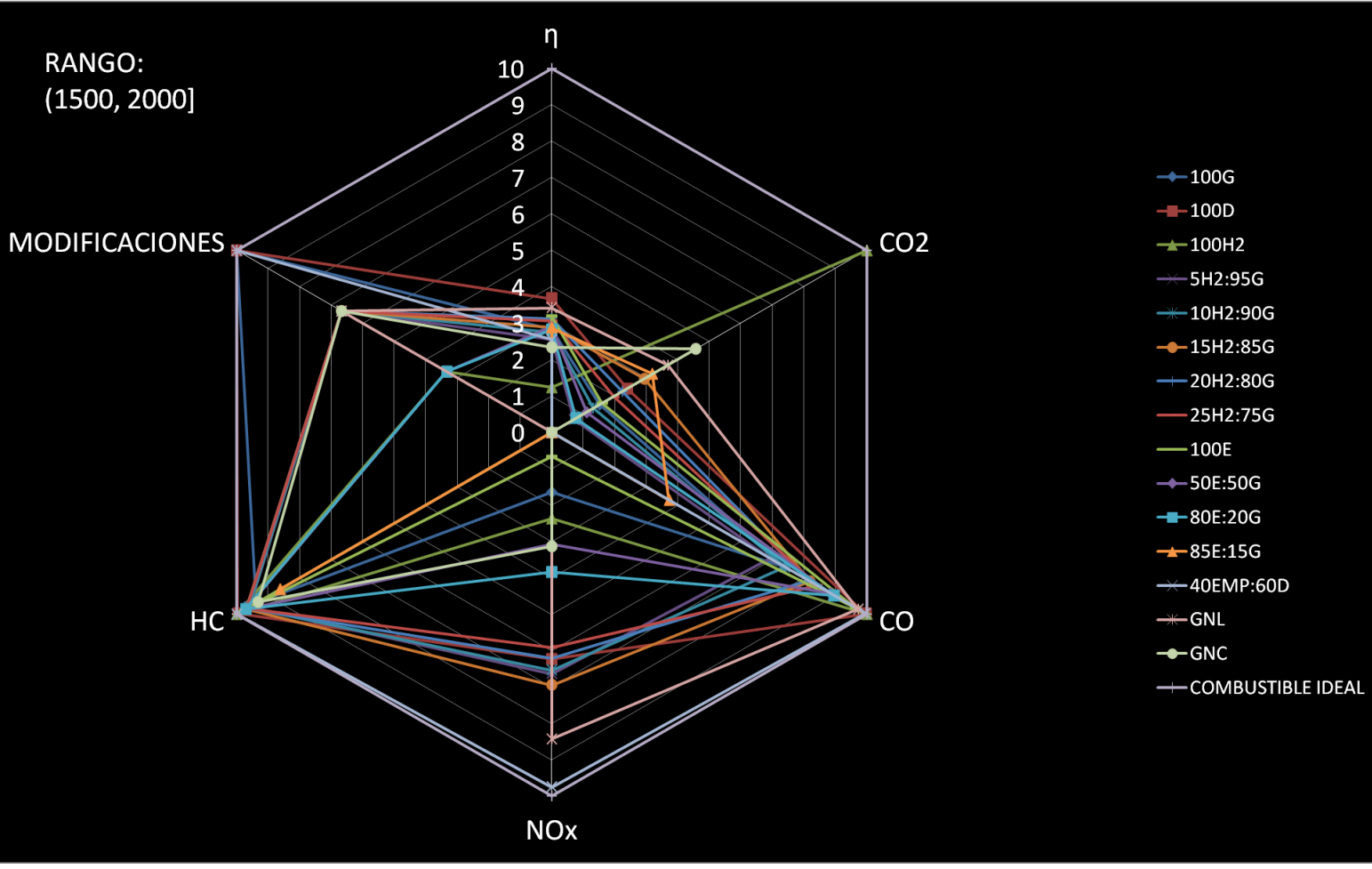


Fig.6 diagrama radial, rango [1500, 2000]

Como se ha comentado anteriormente, el hidrógeno puro implica emisiones nulas de CO₂, CO y HC, pero por el contrario presenta el peor rendimiento del conjunto de combustibles que han sido comparados en este rango de revoluciones.

Las menores emisiones de NOx las presenta nuevamente una mezcla de biodiesel (el combustible 40EMP:60D). Al igual que antes, el 85E:15G presenta las peores emisiones de NOx.

El mejor valor de rendimiento térmico, en este caso, lo presenta el diesel (100D) seguido muy de cerca por el gas natural licuado (GNL). El buen rendimiento térmico del GNL se debe fundamentalmente al elevado PCI de dicho combustible (49244 kJ/kg de GNL frente a 43000 kJ/kg del gasóleo). A mayor PCI de un combustible mayor efecto útil puede obtenerse. El peor valor de emisiones de CO₂ lo presenta el 40EMP:60D (40% de éster metílico de aceite de palma + 60% diesel). El biodiesel contiene aproximadamente un 11% de contenido en oxígeno, lo que facilita la oxidación de CO a CO₂, facilitando de esta manera una combustión más completa.

Las máximas emisiones de CO se corresponden nuevamente al GNC (gas natural comprimido).

Una vez más el gas natural licuado (GNL) exhibe el peor valor de emisiones de HC.

La gasolina, diesel y biodiesel son los únicos combustibles de los que se han comparado en este rango de regímenes de giro que no conllevan modificaciones en el motor. Por el contrario, el máximo número de modificaciones son exhibidas por los combustibles 100E y 85E:15G, es decir, el etanol puro y la mezcla de 85% de etanol y 15% de gasolina.

La Figura 7 muestra el diagrama radial para el hidrógeno y sus mezclas con gasolina.

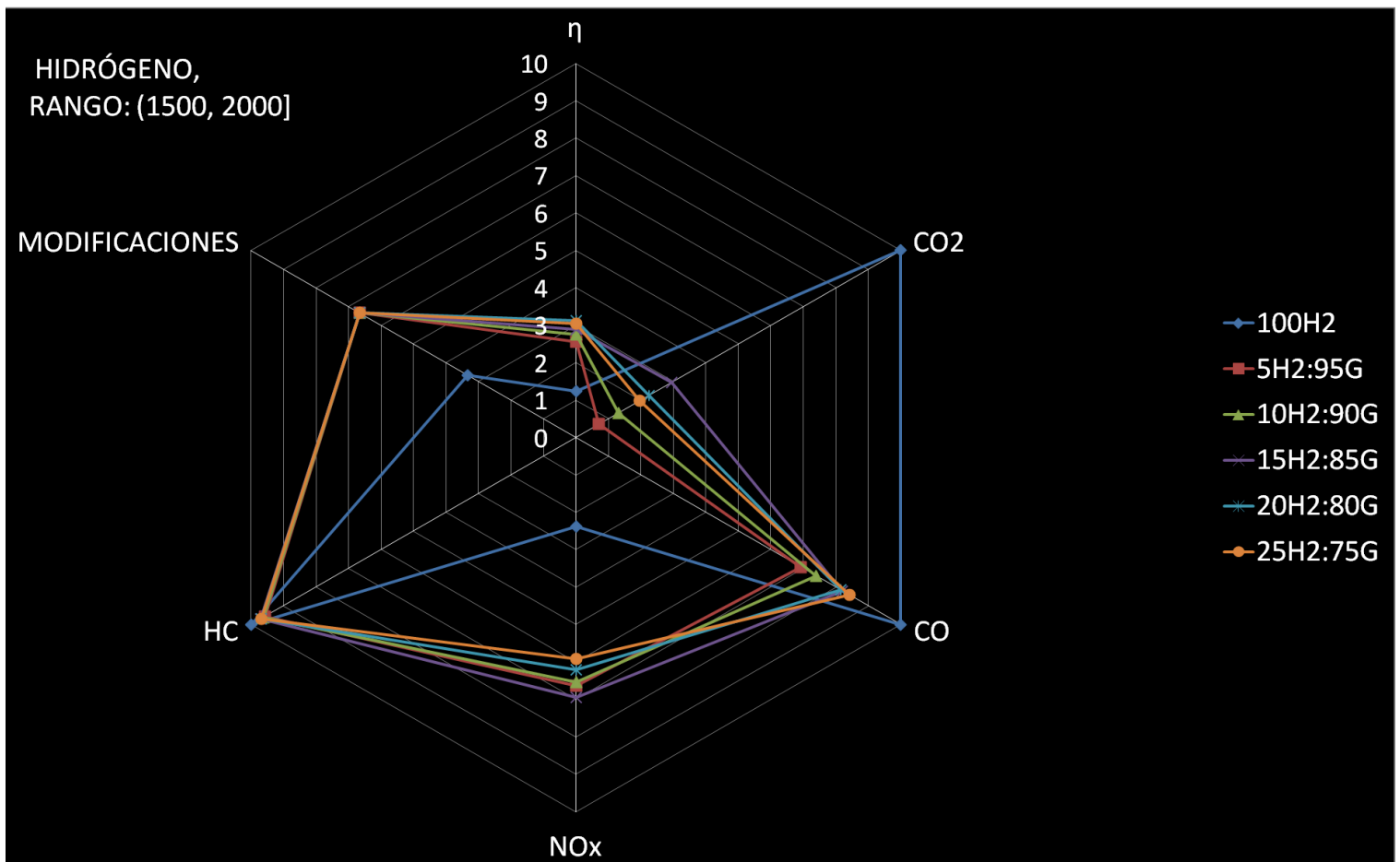


Fig.7 diagrama radial hidrógeno, rango (1500, 2000]

En cuanto a las emisiones se observan tendencias similares que el caso anterior, esto es, a mayor contenido de H₂ en la mezcla más se tiende a reducir la emisión de CO y HC pero aumentan las emisiones de NO_x. En el anterior apartado se ha explicado que cuanto más H₂ se añade a la mezcla más completa es la reacción de combustión facilitando la oxidación de HC y del CO a CO₂, por lo que las emisiones de CO₂ tienden a aumentar ligeramente.

En este caso, al aumentar la proporción de H₂ en la mezcla el rendimiento efectivo aumenta. Incrementando la fracción de hidrógeno en la mezcla se aumentan los flujos de calor que escapan del cilindro y se empeora el rendimiento volumétrico, con lo que el rendimiento efectivo tiende a disminuir. No obstante, con el incremento de H₂ se aumenta el rendimiento de la combustión, dado que el H₂ favorece una mezcla combustible-aire más homogénea, y al mismo tiempo, una combustión más completa, con lo que mejora el rendimiento efectivo. Este último efecto es el más significativo en este caso, con lo que aumenta el rendimiento efectivo.

El uso de H₂ puro conlleva un mayor número de modificaciones que cuando se utiliza mezclado con gasolina.

En la Figura 8 se aprecia el diagrama radial para el etanol puro y sus mezclas con gasolina.

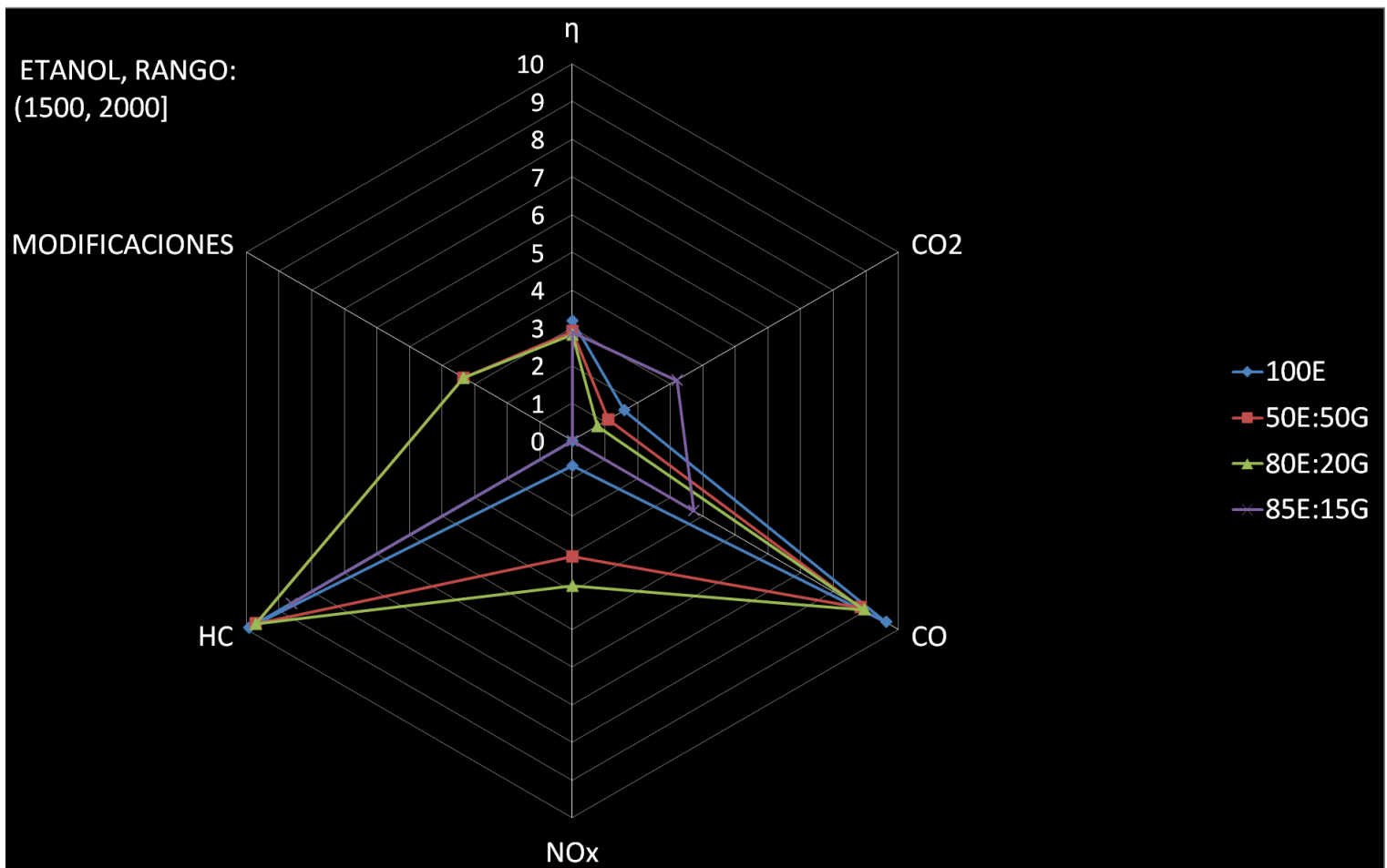


Fig.8 diagrama radial etanol, rango (1500, 2000]

Se observa una tendencia general de que a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla las emisiones de CO₂ aumentan, mientras que las de CO disminuyen (excepto para el 85E:15G). La clave radica en que cuanto mayor fracción de etanol se añade a la mezcla más se facilita la oxidación de CO a CO₂. Para bajos

porcentajes de contenido de etanol a medida que aumenta la fracción de etanol se aumentan las emisiones CO_2 , motivadas por un mayor contenido de oxígeno en las moléculas de etanol. Pero a medida que las fracciones de etanol en la mezcla se sitúan por encima del 80% si se incrementa la cantidad de etanol disminuyen las emisiones de CO_2 , ya que el efecto de facilitar la oxidación de CO a CO_2 es menos dominante frente a la menor cantidad de carbono de la mezcla combustible que implica el uso del etanol. Sin embargo, para el etanol puro las emisiones de CO_2 son mayores que para una mezcla con gasolina con alto contenido en etanol. Dado que en el uso de etanol puro conlleva un mayor contenido de oxígeno en el combustible (el 35% del combustible es oxígeno), facilitando la oxidación de CO a CO_2 , de esta manera se incrementan las emisiones de dióxido de carbono.

Las emisiones de CO mejoran con el contenido de etanol en la mezcla, excepto cuando el contenido del etanol en la mezcla supera el 80%, a partir de ahí las emisiones de CO tienden a aumentar, excepto para el etanol puro, donde se disminuyen de nuevo. La explicación de este fenómeno es complicada. A medida que aumenta el contenido en etanol la mezcla posee menor carbono para formar CO y más oxígeno para oxidar el CO a CO_2 , con lo que las emisiones de CO deberían reducirse con el aumento de etanol en la mezcla. Sin embargo, se ha explicado en el apartado 3.1.1 que cuanto mayor contenido de etanol hay en la mezcla mayor es el efecto de enfriamiento en el combustible, favoreciendo menores temperaturas en la combustión. Por otro lado, las emisiones de HC disminuyen ligeramente con el contenido de etanol, de esta forma aumenta la disponibilidad de átomos de carbono para formar CO. Más átomos de carbono para formar CO y menores temperaturas de combustión podrían ser las causas de una mayor emisión de CO para mezclas de etanol-gasolina con elevado contenido en etanol.

Para mezclas con bajo contenido en etanol, a medida que aumenta la cantidad de etanol se reducen las emisiones de NO_x , ya que se reducen las temperaturas de combustión pero para mezclas con elevado contenido en etanol o con etanol puro las emisiones de NO_x empeoran. El mayor contenido de oxígeno en el combustible facilita la formación de NO_x .

El rendimiento efectivo aumenta ligeramente con el contenido en etanol, como se ha explicado en el apartado 3.1.1.

La Figura 9 compara el diesel con una mezcla de biodiésel-diesel (40% éster metílico de aceite de palma + 60% diesel)

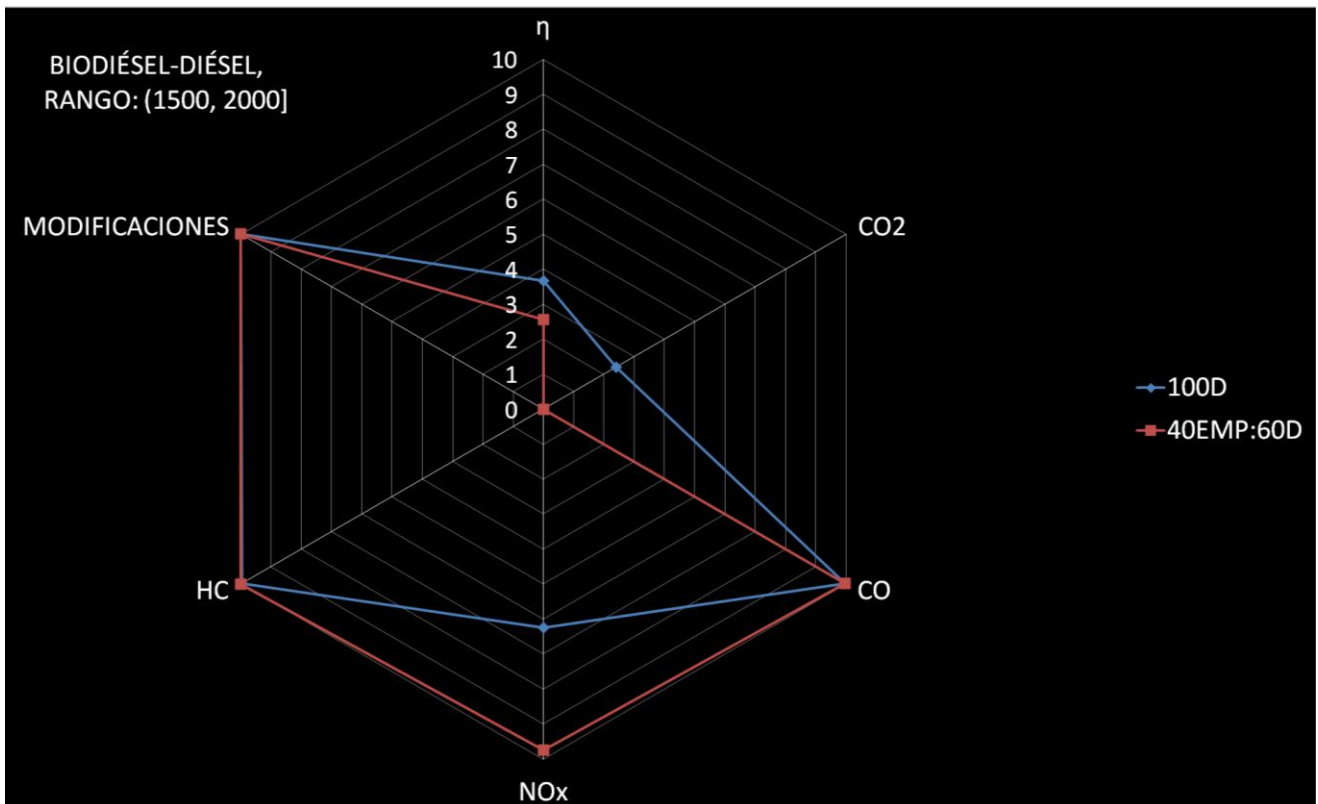


Fig.9 diagrama radial biodiesel, rango (1500, 2000]

Las emisiones de HC y CO son similares pero hay una gran discrepancia en las emisiones de CO₂, de NO_x y en el rendimiento efectivo.

El diesel posee una mayor PCI que en el caso del biodiesel, lo que da lugar a mayores temperaturas durante la fase de combustión. Por otro lado, el biodiesel aumenta la viscosidad de la mezcla. Una mayor viscosidad implica una peor atomización del combustible durante la inyección, por ende, la mezcla aire-combustible es más heterogénea, empeorando el rendimiento de la combustión.

La mayor temperatura de combustión del diesel genera mayores emisiones de NO_x.

El biodiesel posee un elevado contenido en oxígeno facilitando la oxidación de CO a CO₂, por lo que se emite mayor CO₂ que con el diesel.

El rendimiento efectivo promovido por el diesel es superior al del biodiesel, dado que el diesel posee un mayor rendimiento de la combustión y un PCI más elevado que el biodiesel.

Ninguno de los dos combustibles requiere de modificaciones en el motor.

La Figura 10 muestra el diagrama radial para el gas natural, donde se compara el gas natural licuado (GNL) con el gas natural comprimido (GNC).

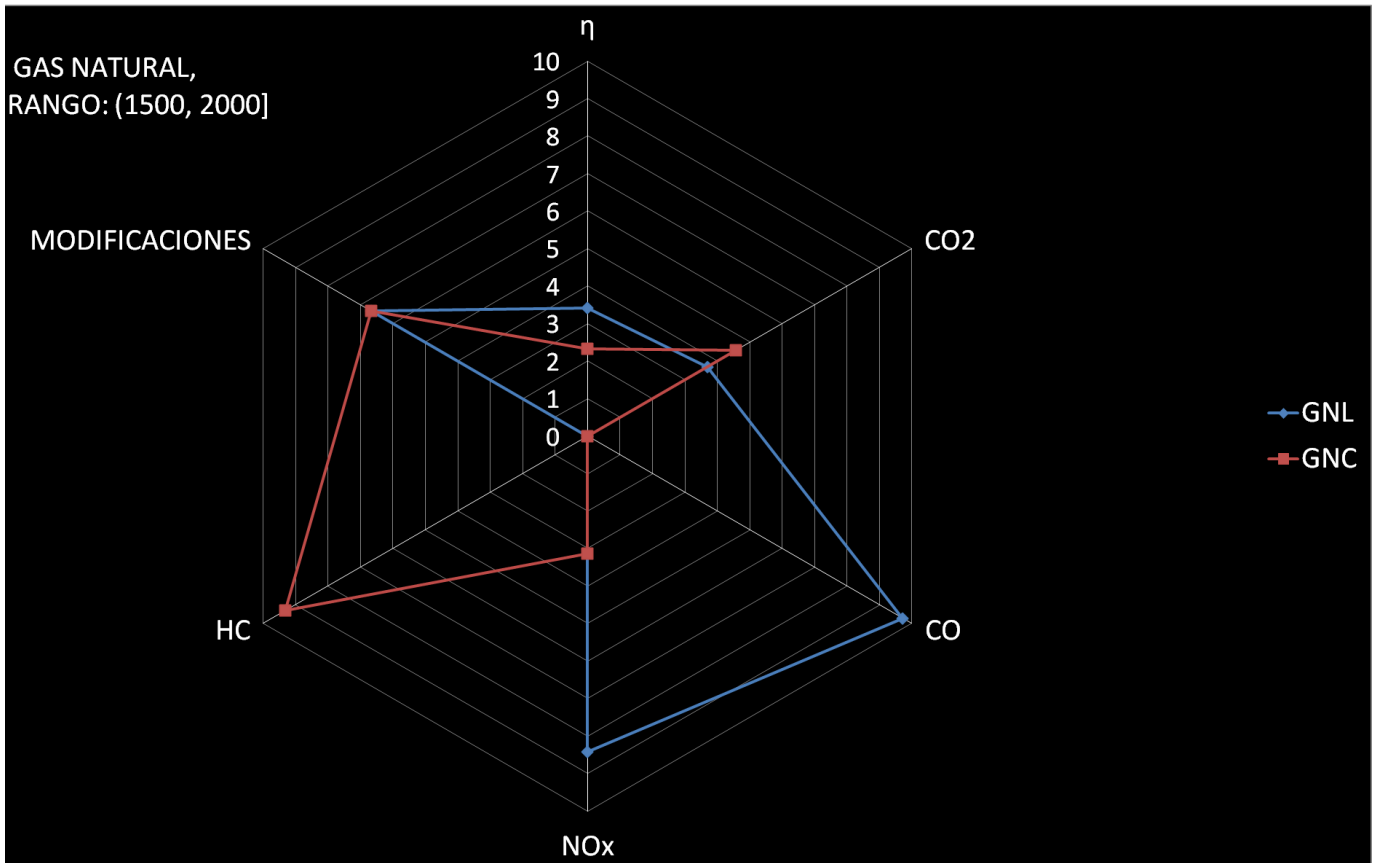


Fig.10 diagrama radial gas natural, rango (1500, 2000]

Las tendencias que se muestran en el diagrama son idénticas a las del apartado 3.1.1, excepto las emisiones de CO₂. En el caso anterior, tanto el GNL como el GNC tenían emisiones de CO₂ similares. En este caso, las emisiones de CO₂ del GNC son inferiores a las del GNL. La clave radica en que los combustibles gaseosos tienden a barrer el aire durante la fase de aspiración, favoreciendo una mezcla rica en el interior del cilindro, de esta manera se emite más CO y menos CO₂, dado que la cantidad de oxígeno no es suficiente para completar la reacción.

3.1.3 RANGO DE (2000, 2500] RPM

La Figura 11 y la Tabla 8 (anexo C) representan respectivamente el diagrama radial y los valores numéricos normalizados para el rango de regímenes de giro comprendido entre 2000 y 2500 rpm.

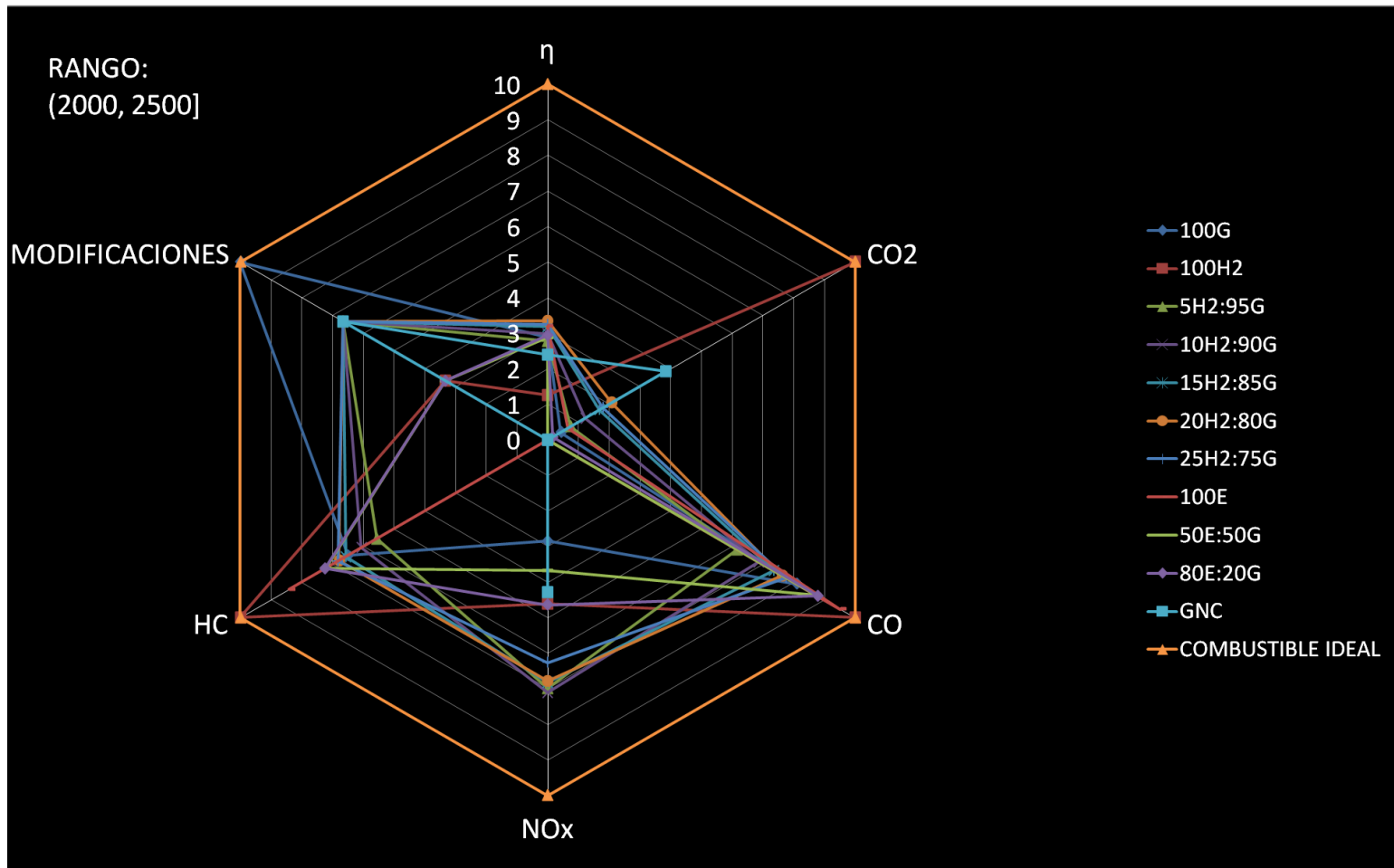


Fig.11 diagrama radial, rango (2000, 2500]

Al igual que los casos anteriores, el hidrógeno puro es el único combustible que implica emisiones cero de CO₂, CO y HC. No obstante, es el que peor rendimiento promueve.

Las menores emisiones de NO_x corresponden a una mezcla de hidrógeno con gasolina (10%H₂ + 90%gasolina). Las mezclas con bajo contenido de hidrógeno no conllevan elevadas temperaturas de combustión, con lo que las emisiones de NO_x están contenidas, además se mejora el rendimiento de la combustión. Las máximas emisiones de NO_x vienen de la mano del etanol puro, dado que el gran contenido de oxígeno en la molécula de etanol favorece su formación.

El mejor valor de rendimiento se corresponde al 20H₂:80G (20%H₂ + 80%gasolina). Las mezclas con reducido porcentaje de hidrógeno mejoran la calidad de la combustión, y aumentan el PCI de la mezcla sin reducir el rendimiento volumétrico ni aumentar los flujos de calor que escapan de los cilindros, por ende, el rendimiento efectivo mejora.

El peor valor de emisiones de CO₂ lo presenta el 50E:50G (50% de etanol + 50% de gasolina) una mezcla equilibrada tanto en contenido de oxígeno como en contenido en carbono que favorece la formación de CO₂.

Las máximas emisiones de CO se corresponden nuevamente al gas natural comprimido (GNC). Pero en esta situación, al no ser comparado el gas natural licuado, las peores emisiones de HC también las presenta el GNC, favorecidas por el barrido del aire durante la admisión, dando lugar a mezclas ricas, y por ende, combustiones incompletas. También el gas natural implica una combustión lenta que al mismo tiempo favorece una combustión incompleta.

El único de los combustibles comparados en este rango de regímenes de giro que no precisa modificaciones en el motor es la gasolina. El que más modificaciones precisa es el etanol puro.

La Figura 12 muestra la comparación entre mezclas con hidrógeno y gasolina.

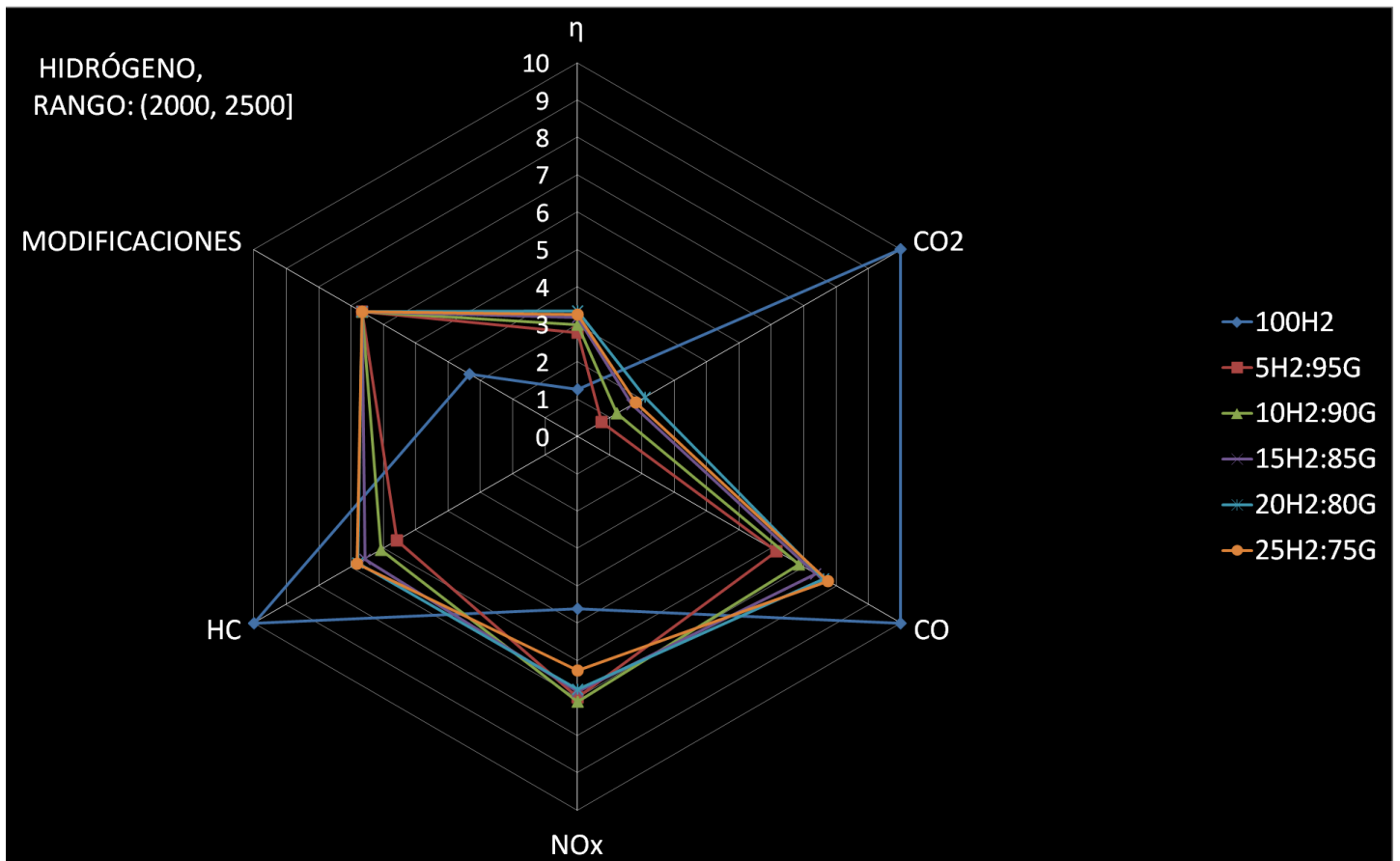


Fig.12 diagrama radial hidrógeno, rango (2000, 2500]

Se observan las mismas tendencias que en el apartado 3.1.2.

En la Figura 13 se comparan el etanol puro, distintas mezclas de etanol con gasolina y la gasolina pura.

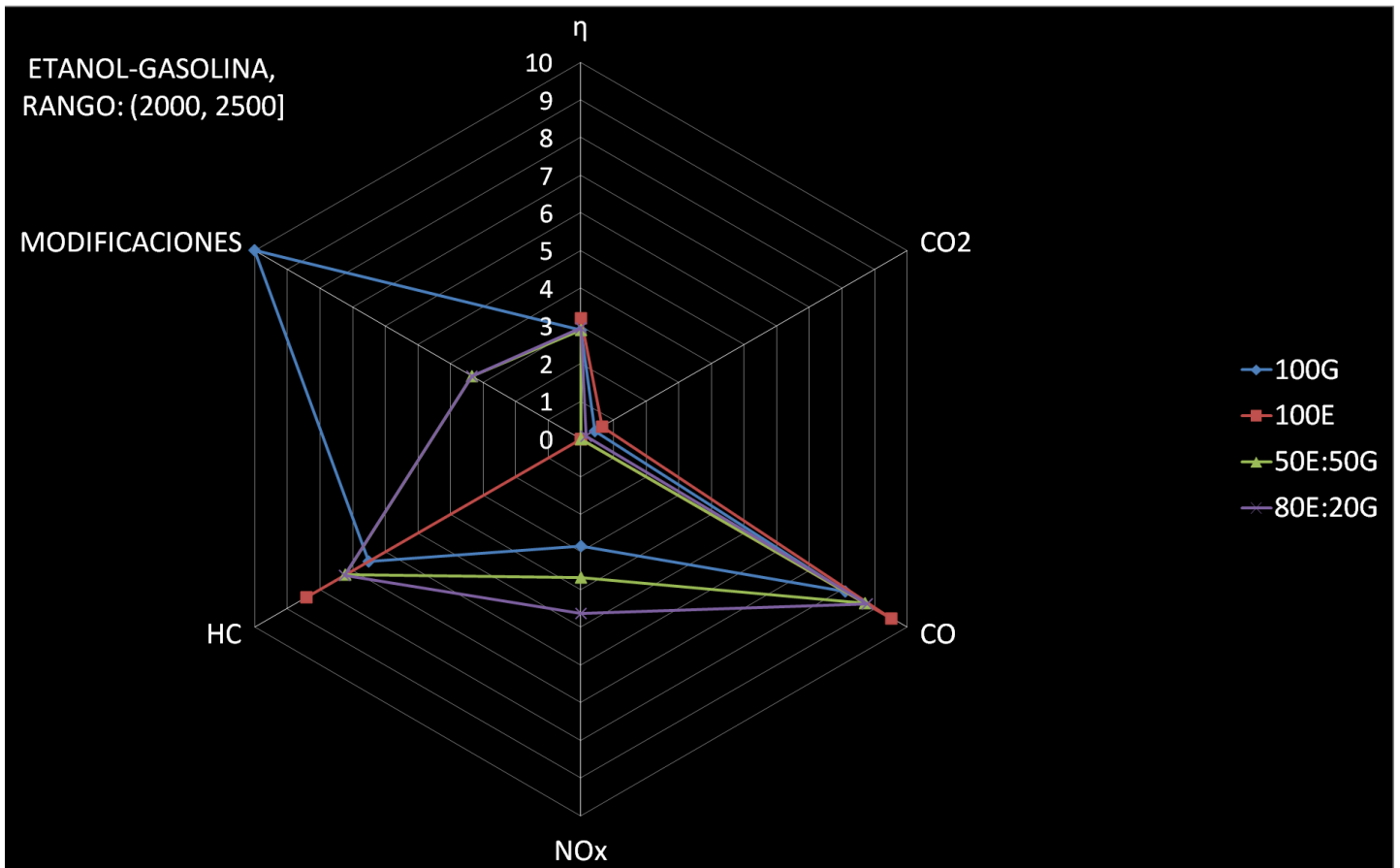


Fig.13 diagrama radial etanol, rango (2000, 2500]

Para mezclas con altas fracciones de etanol las emisiones de CO₂ son menores que para la gasolina, dado que el etanol implica menor cantidad de carbono que la gasolina pero para bajas fracciones de etanol las emisiones de CO₂ son superiores debido al alto contenido en oxígeno del etanol.

Para cualquier mezcla etanol-gasolina las emisiones de CO y HC son inferiores a la gasolina. El oxígeno contenido en el etanol facilita la oxidación de CO a CO₂ y de los HC. Y además el etanol implica un menor contenido en carbono del combustible.

Excepto para el etanol puro (cuya alto contenido de oxígeno favorece la formación de NO_x) todas las mezclas suponen menores emisiones de NO_x que la gasolina pura. Puesto que la adición de etanol (como se explica en 3.1.1) supone la disminución de la temperatura de combustión.

Los rendimientos térmicos de todas las mezclas y del etanol puro son similares al de la gasolina.

La gasolina no requiere modificaciones en el motor, las mezclas de etanol sí.

La Figura 14 compara el GNC con la gasolina.

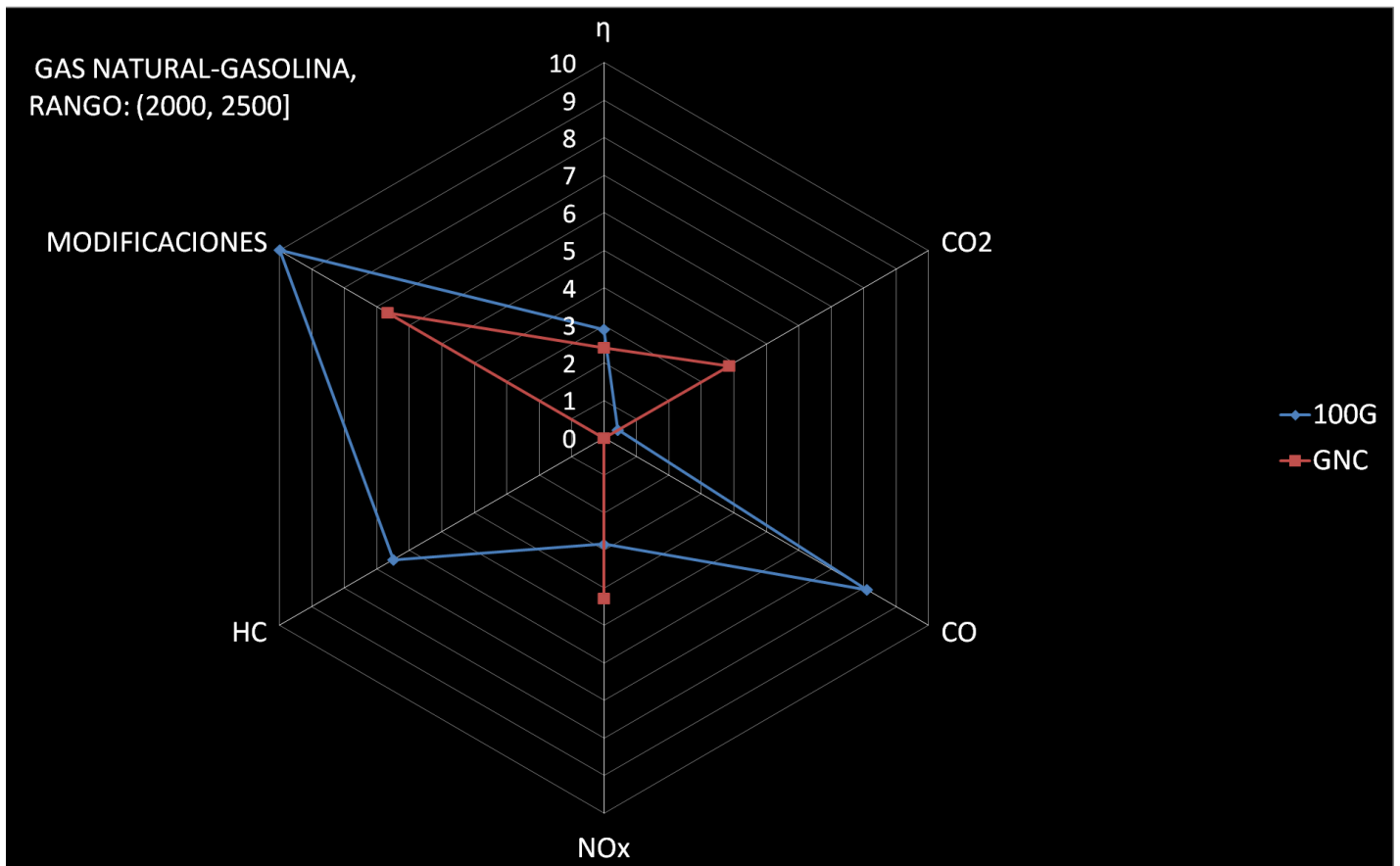


Fig.14 diagrama radial gas natural, rango (2000, 2500]

El gas natural emite menos CO₂ que la gasolina pero a cambio de emitir más HC y CO. Esto se debe a una peor eficiencia volumétrica de los combustibles gaseosos, desplazando al aire durante la fase de admisión, con lo que se favorece una mezcla rica. La mezcla rica da lugar a combustiones incompletas, emitiéndose más CO y HC y menos CO₂.

Aunque el gas natural posee un mayor PCI que la gasolina y favorece mezclas homogéneas aire-combustible, el peor rendimiento volumétrico del gas natural penaliza al rendimiento efectivo, de esta manera, el GNC promueve un rendimiento efectivo ligeramente inferior que la gasolina.

Dado que la gasolina presenta una reacción de combustión más completa se alcanzarán mayores temperaturas, lo que conlleva mayores emisiones de NO_x.

La utilización de gas natural implica modificaciones del motor.

3.1.4 RANGO DE (2500, 3000] RPM

La Figura 15 y la Tabla 9 muestran el diagrama radial y los valores numéricos normalizados en el rango de regímenes de giro comprendido entre 2500 y 3000 rpm.

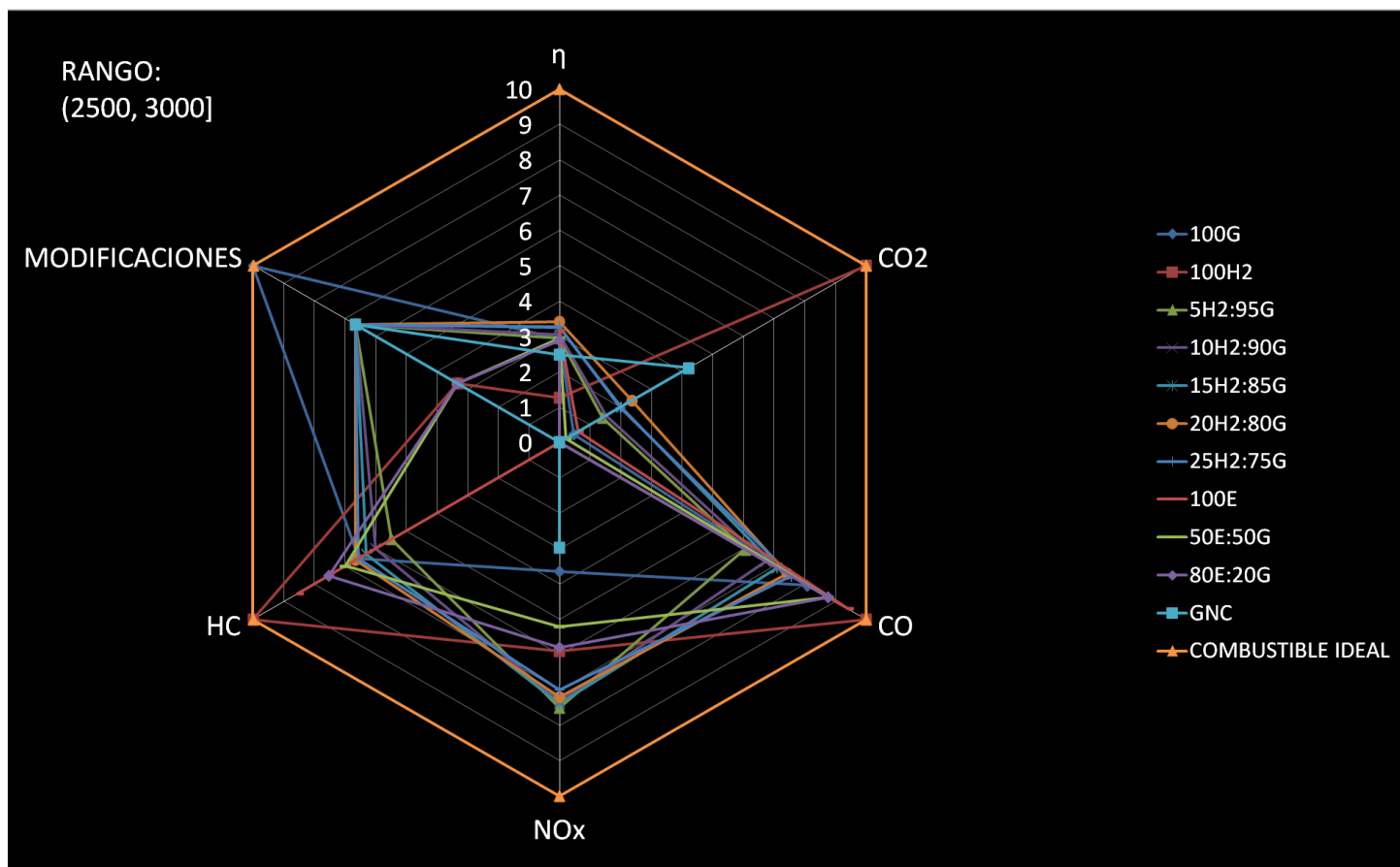


Fig.15 diagrama radial, rango (2500, 3000]

El hidrógeno puro presenta emisiones cero de HC CO y CO₂, pero el peor rendimiento del grupo.

Las menores emisiones de NO_x las presenta el 5H₂:95G (5%H₂ + 95%gasolina). Las mayores emisiones de NO_x vienen dadas por el etanol puro.

El mejor valor de rendimiento corresponde otra vez al 20H₂:80G.

Las máximas emisiones de CO₂ se corresponden de nuevo con una mezcla de etanol (80E:20G), mientras que las máximas emisiones de CO y HC vienen de la mano nuevamente del GNC.

De los combustibles comparados en este rango, la gasolina es el único que no requiere de modificaciones del motor, por el contrario, el etanol puro es el que más modificaciones requiere.

Las Figuras 16, 17 y 18 representan respectivamente los diagramas radiales para el hidrógeno, el etanol y el gas natural.

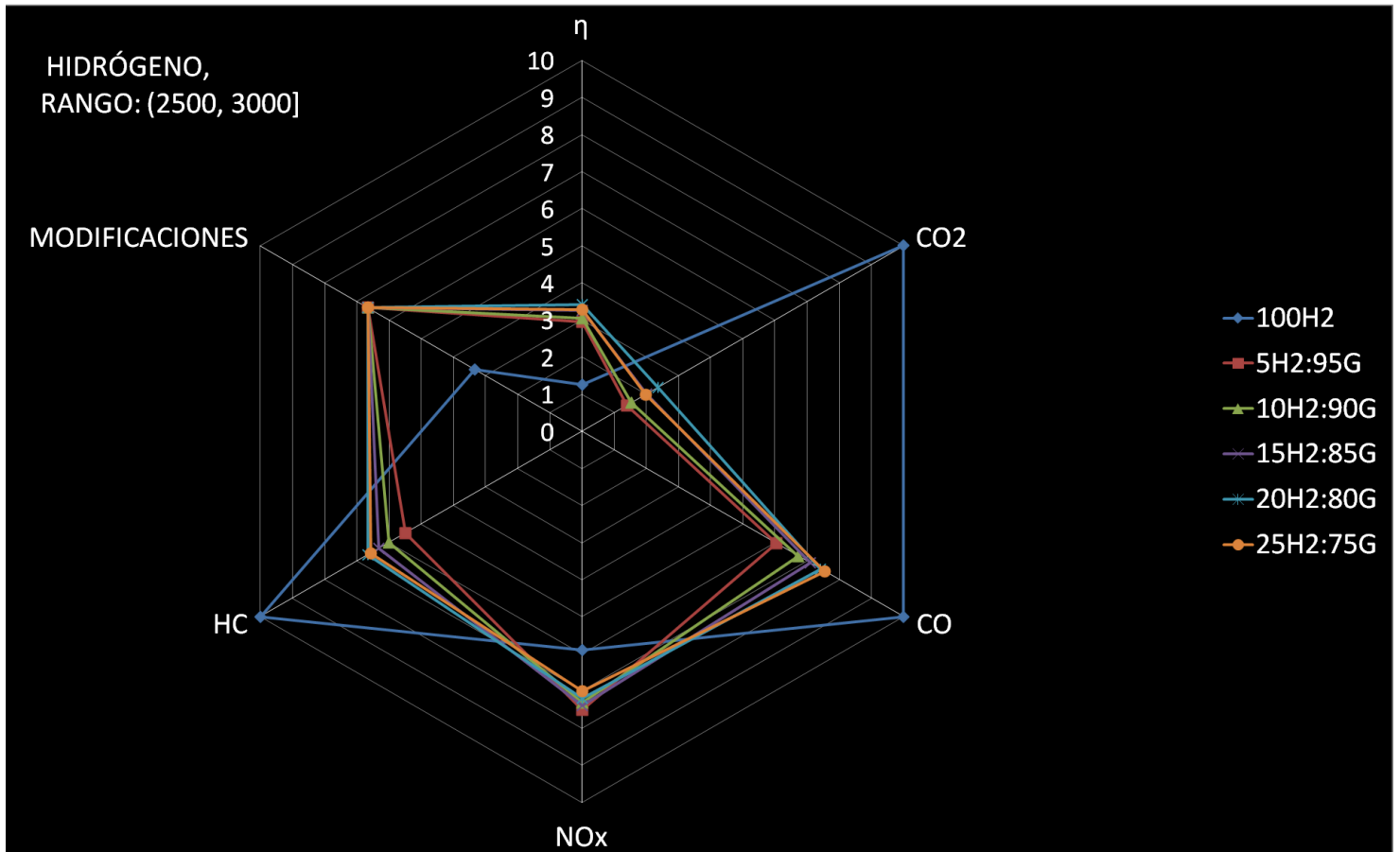


Fig.16 diagrama radial hidrógeno, rango (2500, 3000]

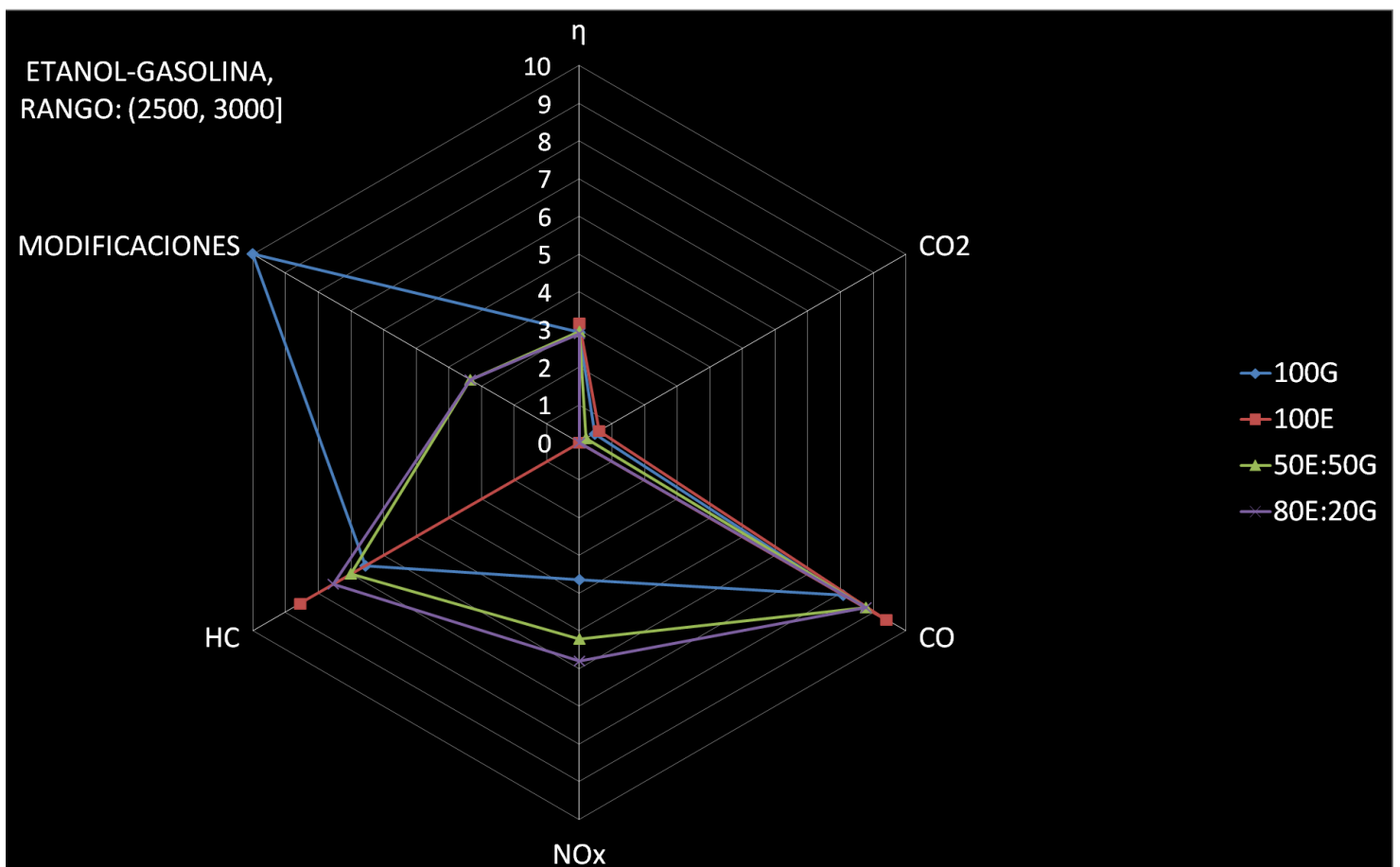


Fig.17 diagrama radial etanol, rango (2500, 3000]

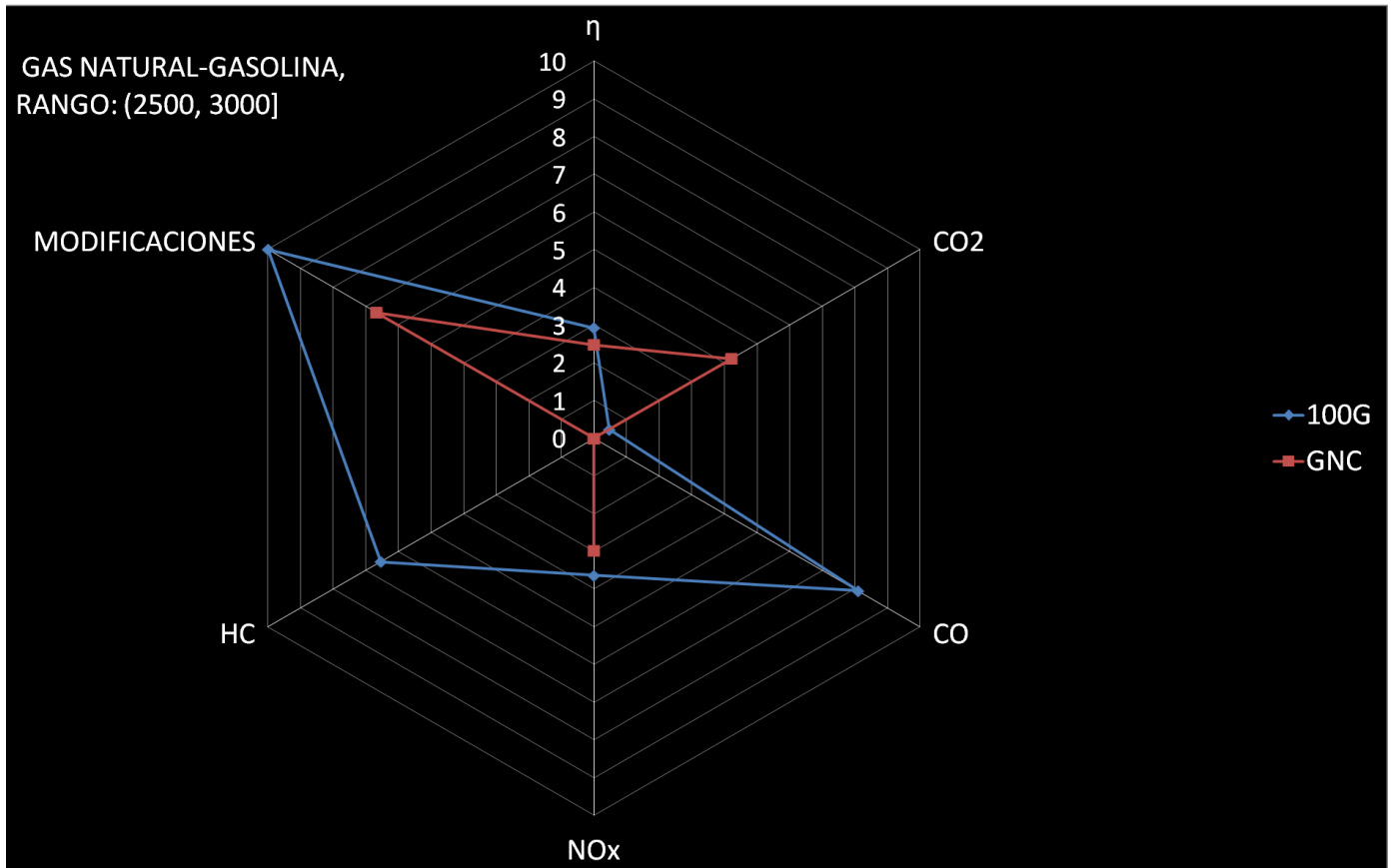


Fig.18 diagrama radial gas natural, rango (2500, 3000]

Muestran tendencias idénticas al anterior apartado, excepto para las emisiones de NO_x del GNC. En este caso, el GNC presenta peores emisiones de NO_x que la gasolina. El gas natural es un combustible con una alta tasa de liberación de calor en la premezcla o fase de combustión rápida y menor tasa de liberación de calor en la fase de combustión controlada, lo que conlleva mayores emisiones de NO_x.

3.1.5 RANGO DE (3000, 3500] RPM

La Figura 19 y la Tabla 10 (anexo C) representan el diagrama radial y los valores numéricos normalizados de los combustibles comparados en el rango de regímenes de giro de 3000 a 3500 rpm.

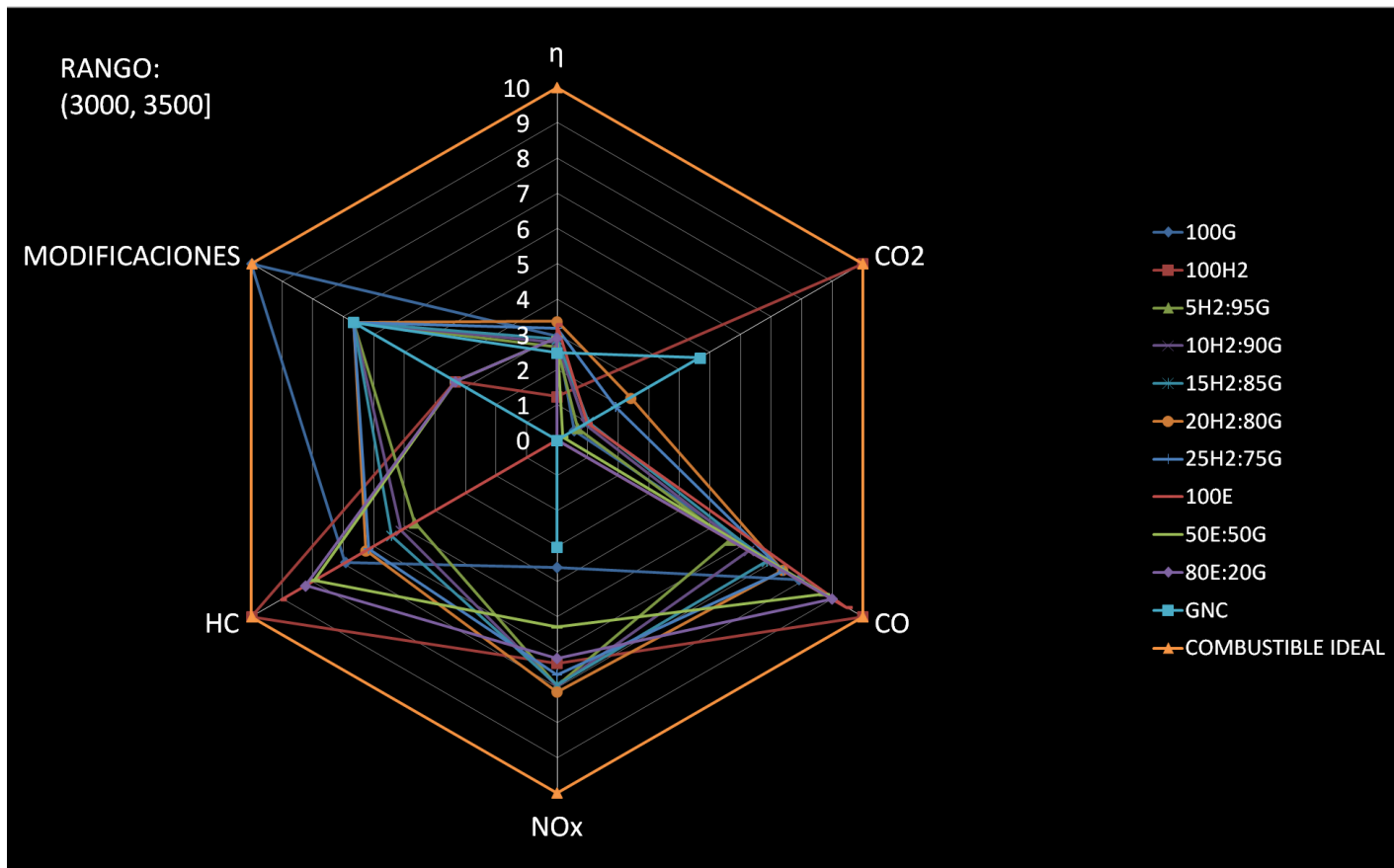


Fig.19 diagrama radial, rango (3000, 3500]

Los resultados son muy similares a los obtenidos en el anterior apartado.

Las Figuras 20, 21 y 22 representan los diagramas radiales para las distintas tecnologías comparadas, las tendencias que muestra cada tecnología es idéntica que en el apartado anterior.

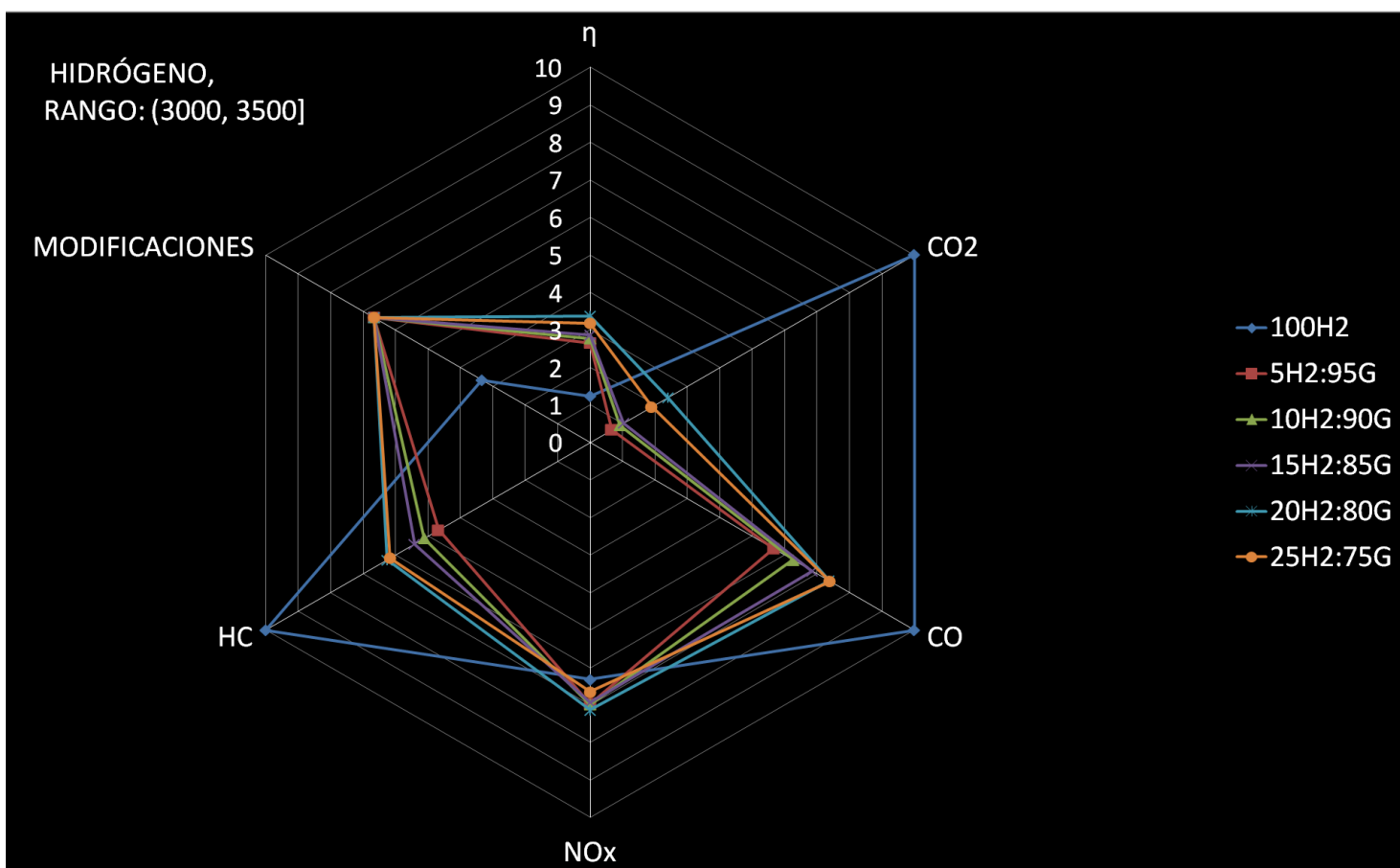


Fig.20 diagrama radial hidrógeno, rango (3000, 3500]

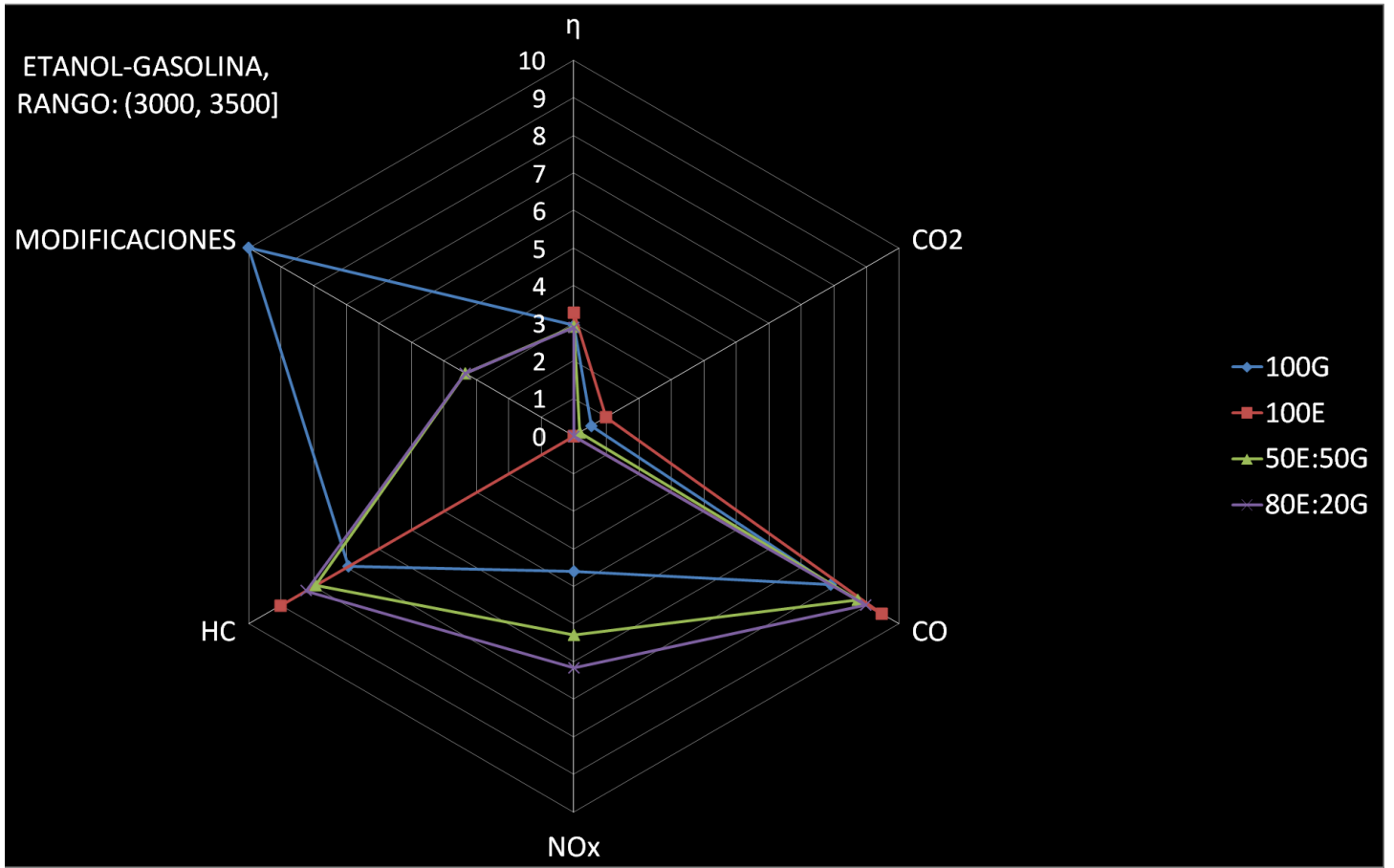


Fig.21 diagrama radial etanol, rango (3000, 3500]

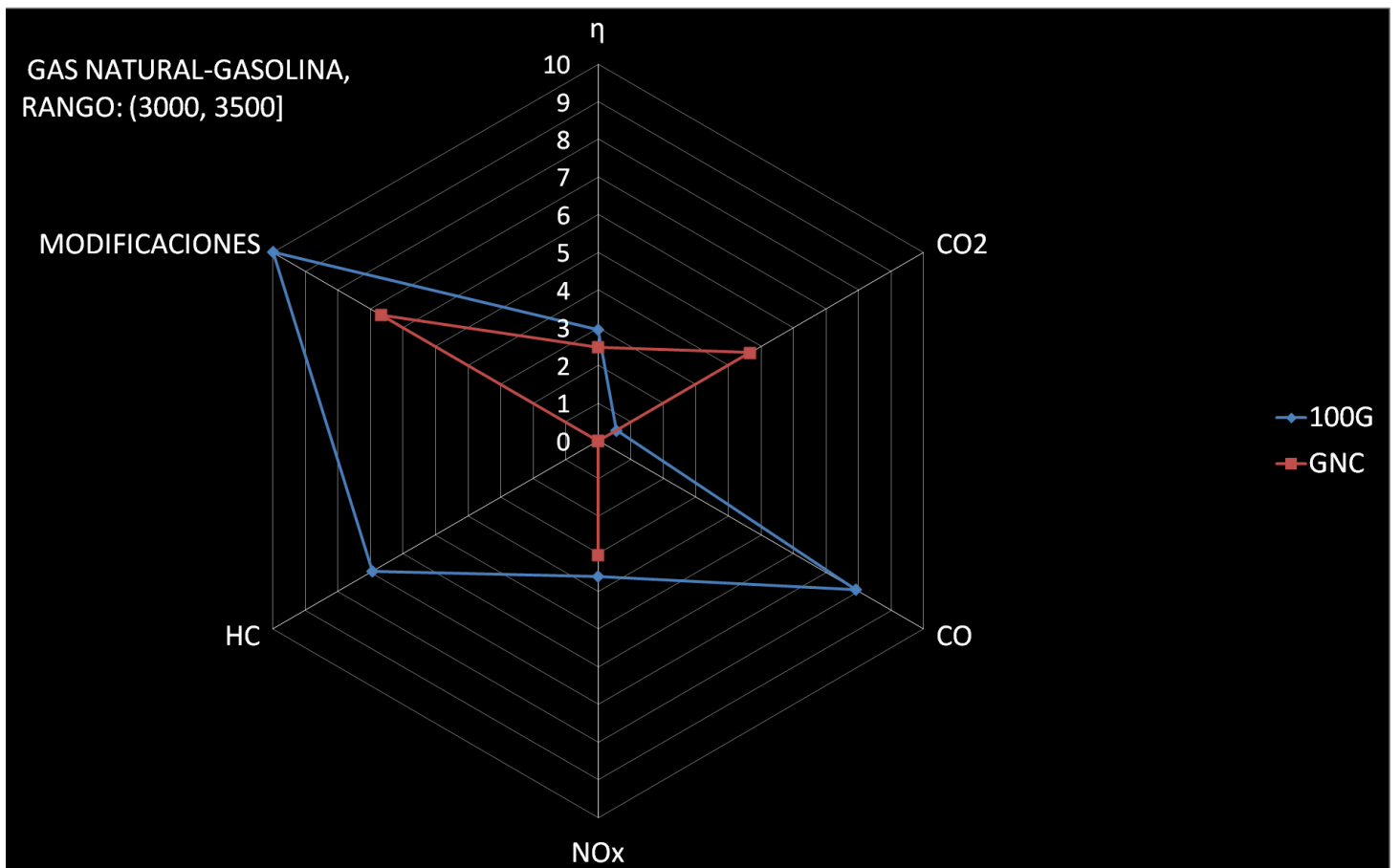


Fig.22 diagrama radial gas natural, rango (3000, 3500]

3.1.6 RANGO DE (3500, 4000] RPM

La Figura 23 y la Tabla 11 (anexo C) representan los resultados para este rango de regímenes de giro.

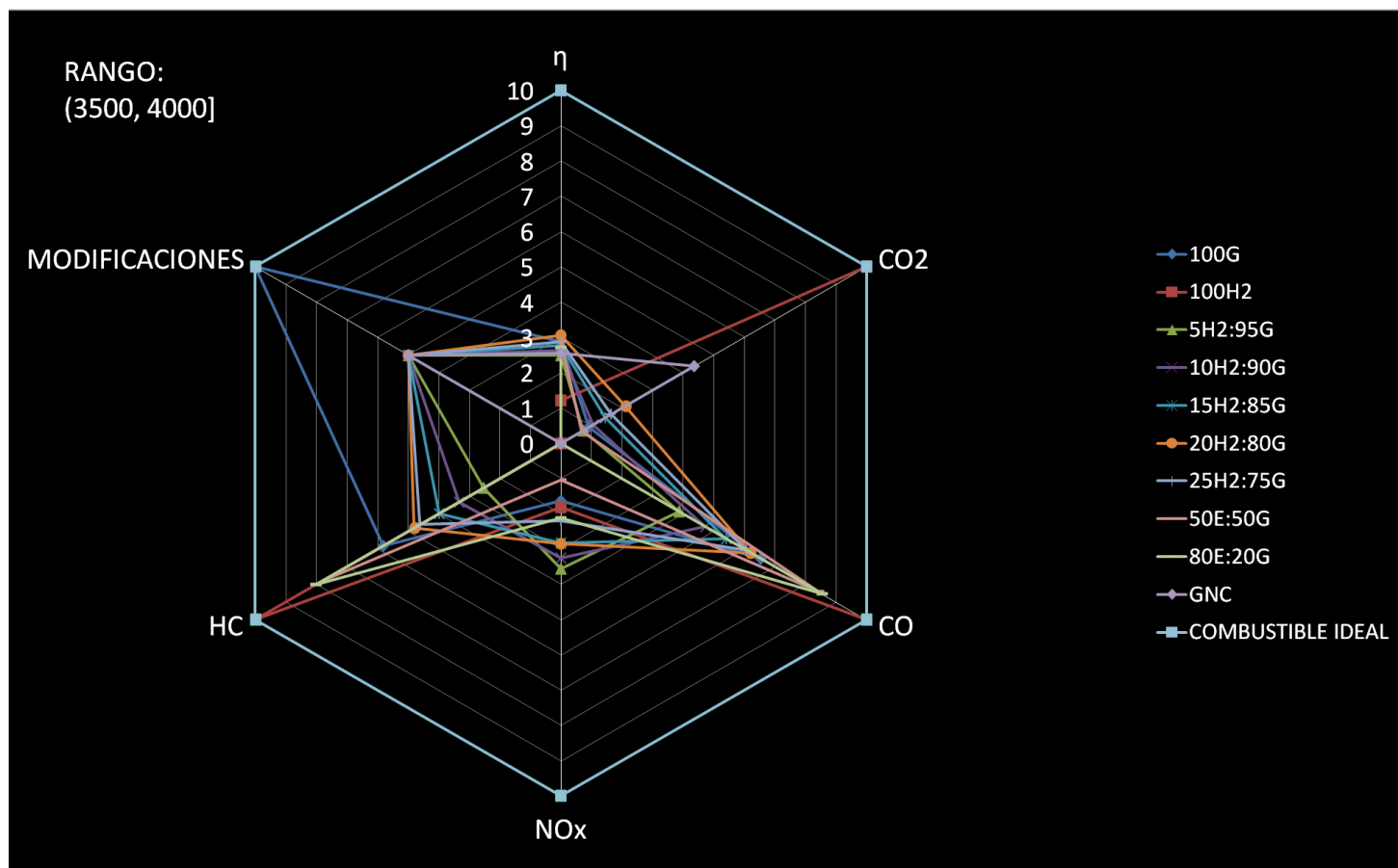


Fig.23 diagrama radial, rango (3500, 4000]

Los resultados son muy similares a los del anterior apartado. En este caso, al no encontrarse el etanol puro entre los combustibles comparados, las peores emisiones de NO_x corresponden al GNC.

Las Figuras 24, 25 y 26, muestran los diagramas radiales para cada tecnología. Se observan las mismas tendencias que en el anterior caso, excepto en la fig.25. Hasta aquí, cualquier mezcla de etanol-gasolina presentaba mejores emisiones de NO_x que la gasolina. En este caso, la mezcla con menor contenido de etanol (50E:50G) presenta peores emisiones de NO_x. Cuanto más bajo sea el contenido en etanol menor será el efecto de enfriamiento, y por lo tanto, mayores temperaturas de combustión. Al mismo tiempo, el etanol aporta una cantidad adicional de oxígeno que favorecerá la formación de NO_x.

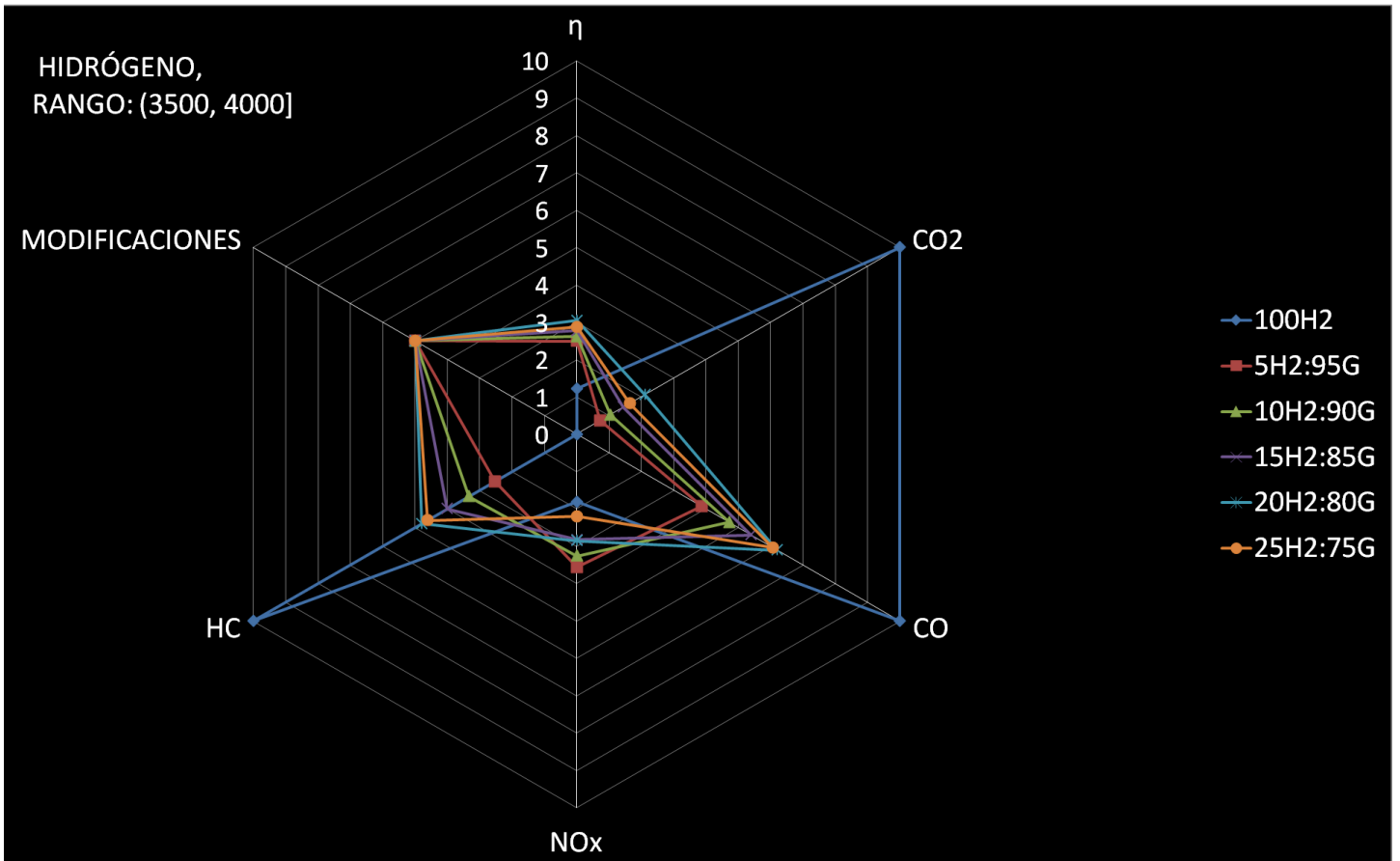


Fig.24 diagrama radial hidrógeno, rango (3500, 4000]

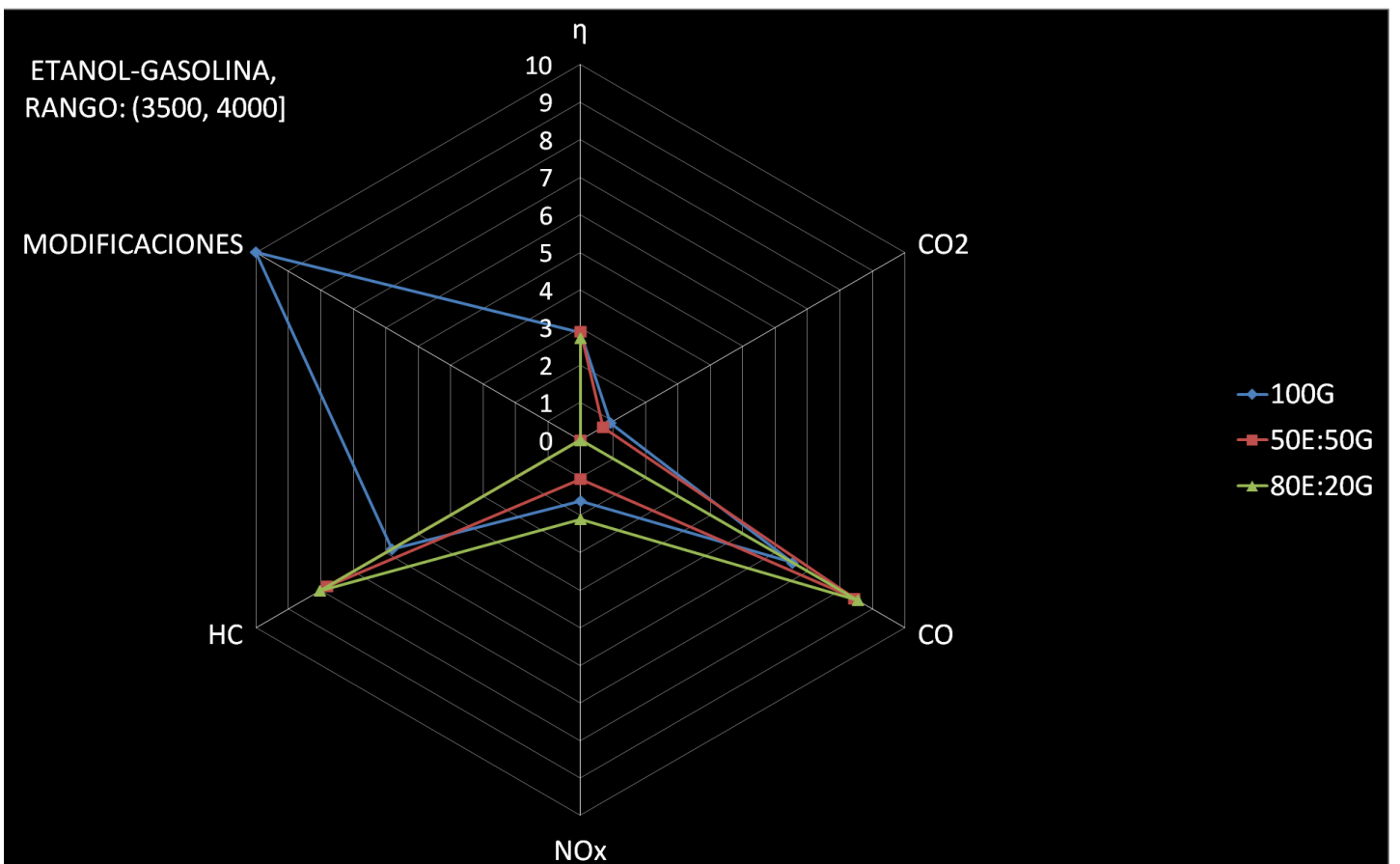


Fig.25 diagrama radial etanol, rango (3500, 4000]

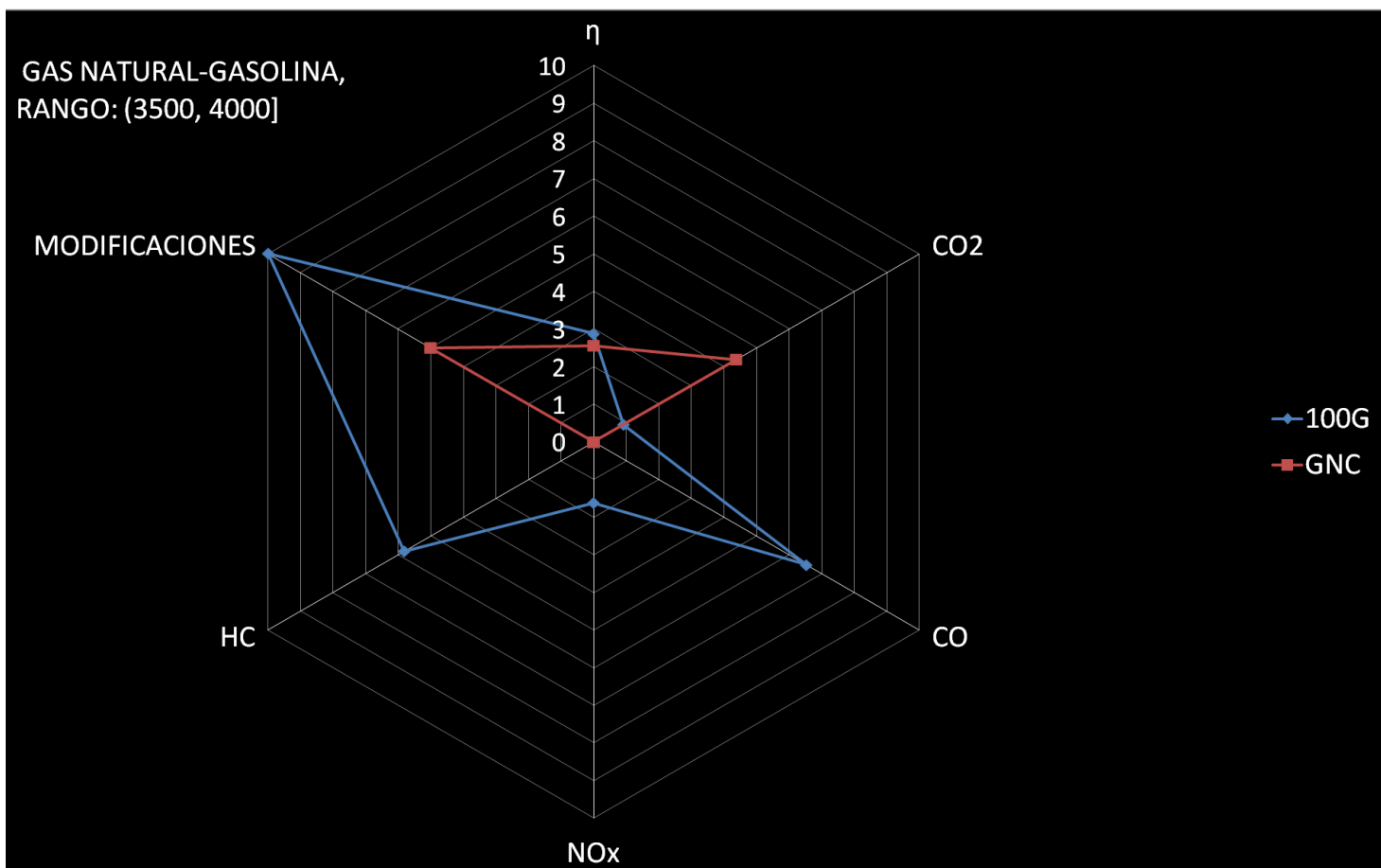


Fig.26 diagrama radial gas natural, rango (3500, 4000]

3.1.7 RANGO DE (4000, 4500] RPM

La fig.27 y la Tabla 12 (anexo C) representa el diagrama radial y los valores numéricos de los combustibles comparados en el rango comprendido entre 4000 y 4500 rpm.

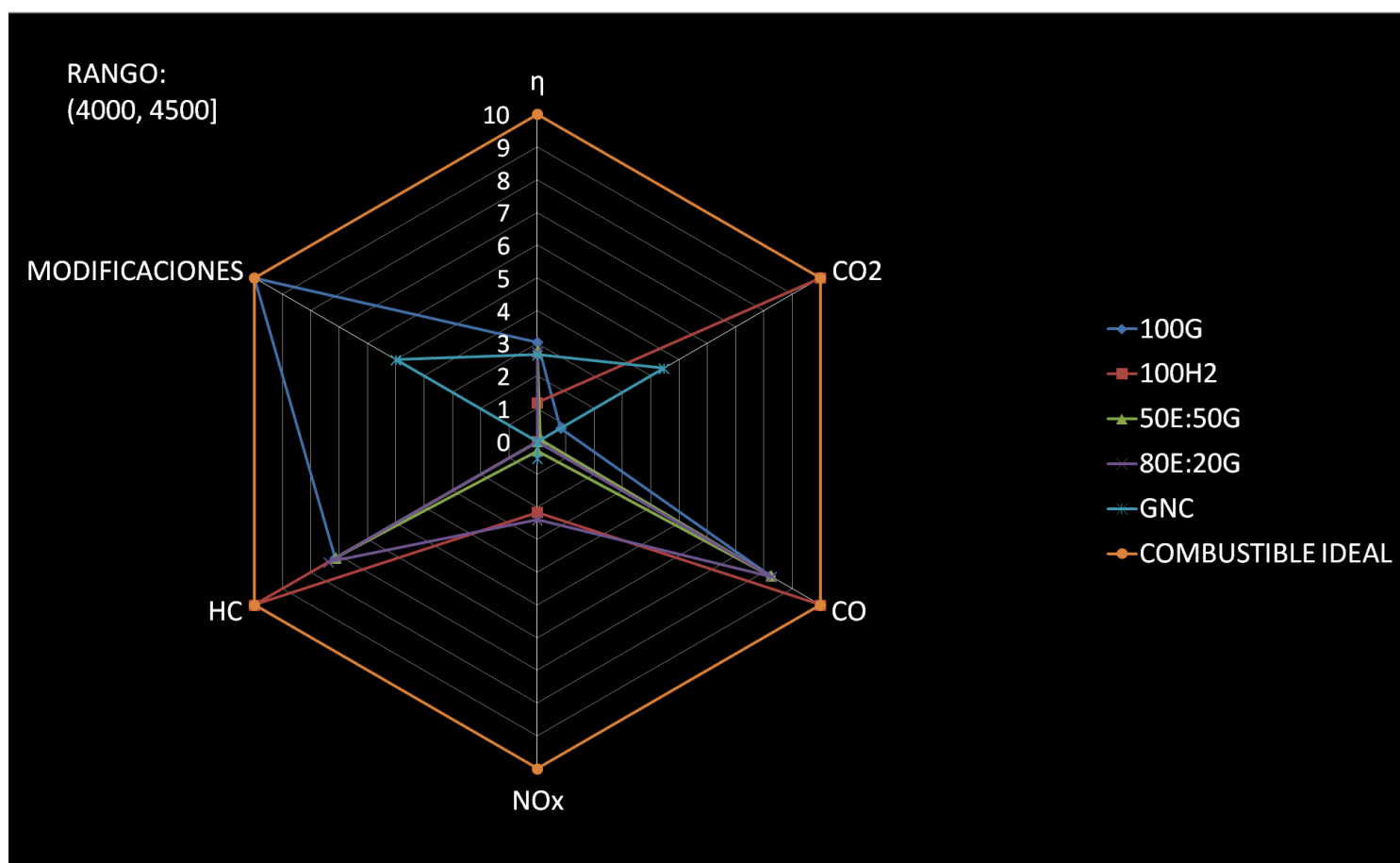


Fig.27 diagrama radial, rango (4000, 4500]

En este caso, al no compararse las mezclas de gasolina-hidrógeno, el mejor rendimiento efectivo lo promueve la gasolina, pero a cambio, presenta las peores emisiones de NOx. Los demás resultados son similares a los obtenidos en el anterior apartado.

3.1.8 RANGO DE (4500, 5000] RPM

En la Figura 28 y Tabla 13 (anexo C) se representan los resultados para este rango de regímenes de giro. Los resultados son idénticos a los obtenidos en el anterior apartado.

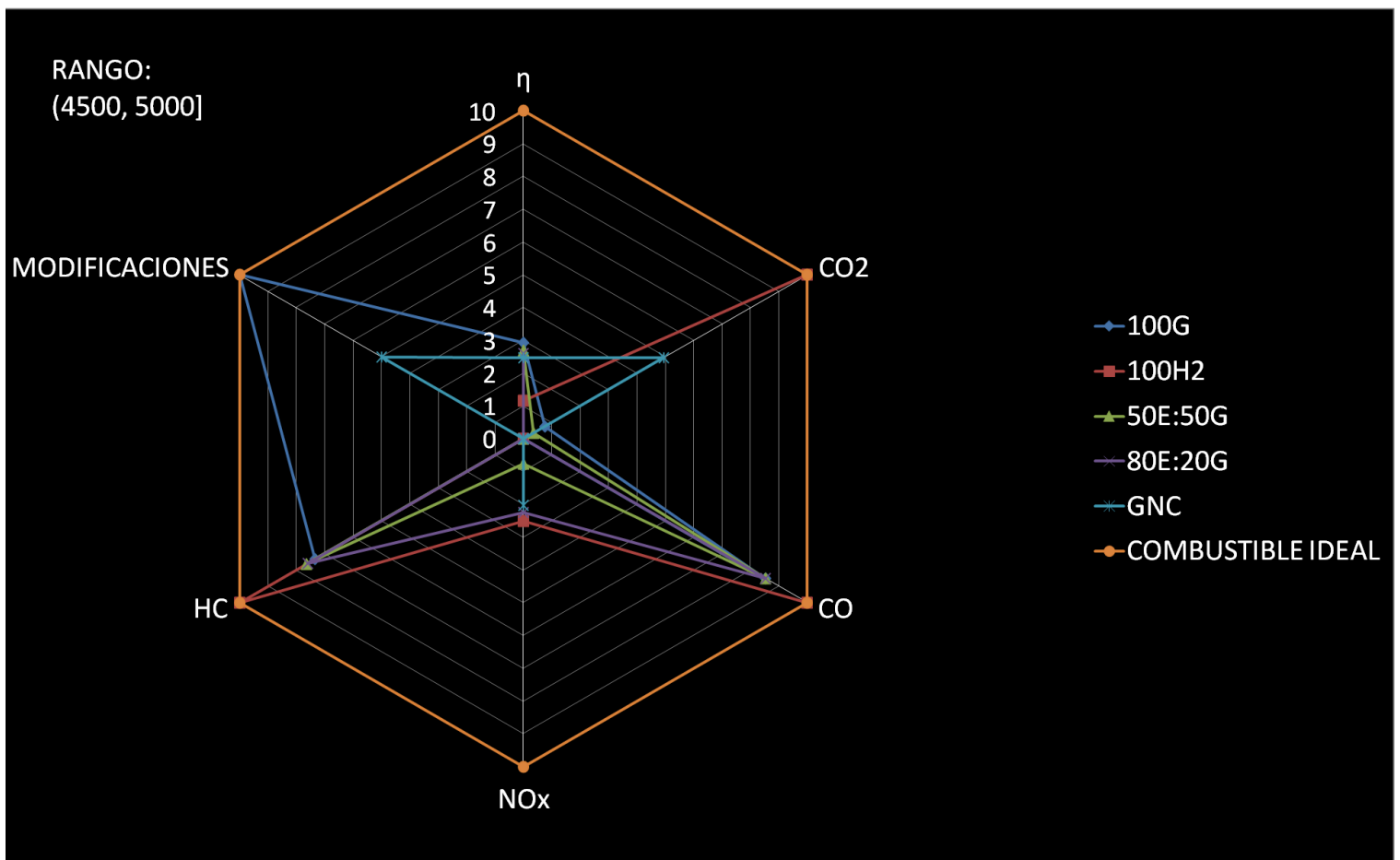


Fig.28 diagrama radial, rango (4500, 5000]

3.2 ANÁLISIS MULTICRITERIO

Las técnicas de decisión multicriterio están ganando popularidad en la gestión sostenible de la energía [39, 40] y también han sido aplicados al sector del transporte [41, 42, 43], ya que permiten tener en cuenta una gran cantidad de datos, las relaciones y los objetivos que se producen en una toma de decisiones de un problema real. Sin embargo, aparecen algunas limitaciones. Los resultados de un análisis multicriterio (MCA) dependen de la información disponible, la forma en que esta información se estructura, el método de agregación escogido, y además, de las preferencias del decisor. Una vez elegidos los criterios de evaluación, la siguiente fase es establecer la importancia relativa de cada criterio en la decisión final, es decir, el peso de cada uno de los componentes en el indicador único.

Se selecciona el método del proceso analítico-jerárquico (AHP) [44] con el fin de integrar en un único índice los diferentes indicadores medioambientales y económicos seleccionados y poder así categorizar los combustibles alternativos a estudio.

El problema que se analiza posee 2 criterios de evaluación, el medioambiental y el económico, con 2 y 4 subcriterios respectivamente. En la fig. 29 se puede observar el modelo jerárquico propuesto en este estudio.

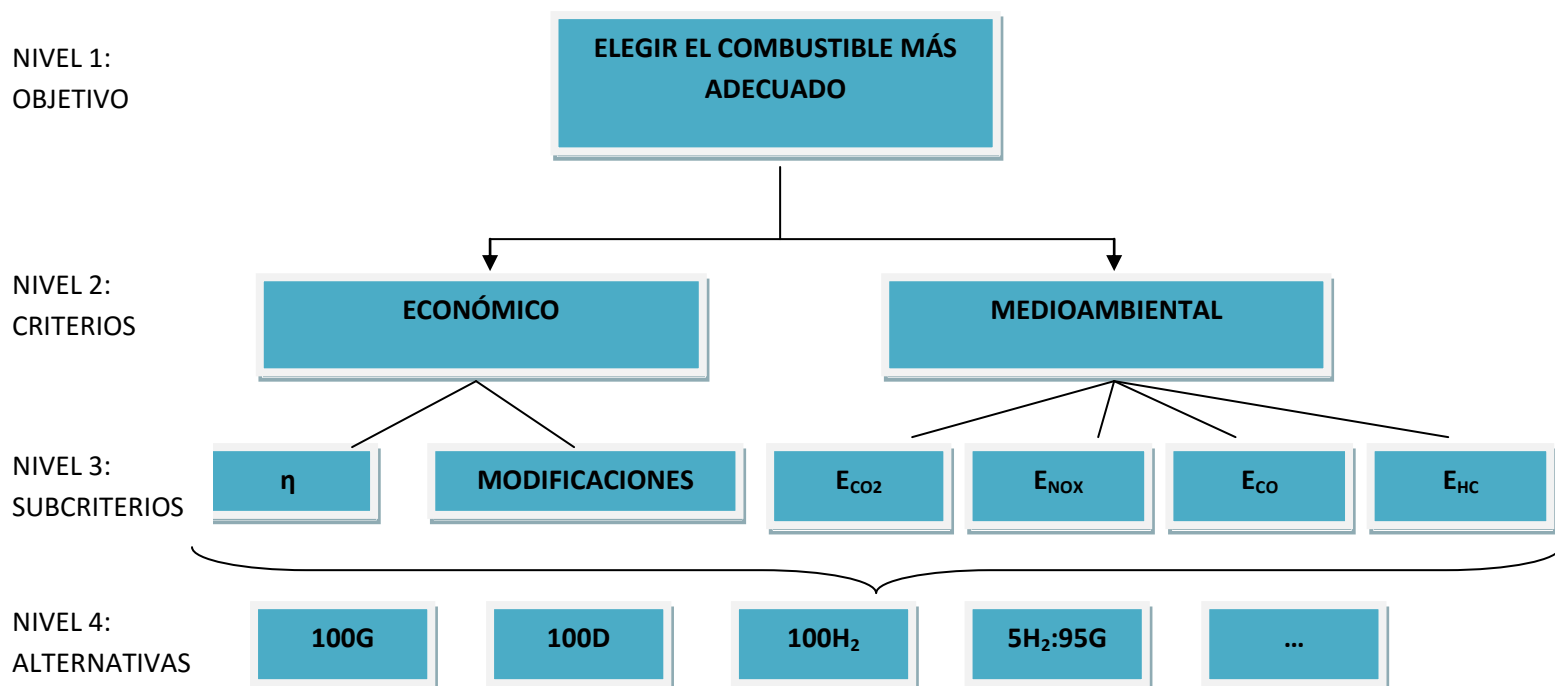


Fig.29 diagrama de jerarquías

No obstante, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos a partir de un análisis multicriterio son concluyentes únicamente para el escenario considerado al establecer la importancia relativa de cada criterio y subcriterio, pudiendo cambiar para otros escenarios. Por ende, la formulación del problema debe estar claramente definida, así como el procedimiento adoptado para establecer las estructuras de preferencia.

La idoneidad de los combustibles alternativos dependerá del escenario en el que aquella se plantee, p.ej. el subcriterio emisiones de NOx puede tener más peso en la decisión de promover estos combustibles en EE.UU. mientras que en Europa es el rendimiento de los motores (relacionado con el consumo de energía primaria y la dependencia energética) el prioritario.

Por ello se aplica el método de análisis propuesto a diferentes escenarios. Se plantean 8 escenarios en total. Los 6 primeros escenarios son escenarios extremos, donde un criterio va a tener mucha más importancia que el otro, va a existir un subcriterio con mucho mayor peso dentro del criterio más importante. En el criterio con menor peso todos los subcriterios tendrán la misma importancia. Estos escenarios extremos permiten identificar el combustible más adecuado en un ambiente donde únicamente se prioriza un objetivo. En los escenarios restantes se prefiere moderadamente un criterio frente al otro. Dentro de cada criterio hay varios subcriterios que tienen mayor prioridad frente al resto. Son escenarios más próximos a un ambiente realista, donde se debe llegar a un compromiso entre varios objetivos.

Como resultado del proceso AHP se obtendrá un ranking de los combustibles que mejor se adaptan a los requerimientos de cada escenario. Dicho ranking, va a presentarse como un diagrama de barras en el que la preferencia de cada combustible viene determinada por el valor de prioridad global obtenido en el proceso AHP. Con el objetivo de no saturar la información de los diagramas, únicamente van a mostrarse los carburantes mejor posicionados, es decir, el conjunto de los combustibles que mayores valores presenten de prioridad global. Dicho conjunto de combustibles abarcará el 50% del valor del vector de prioridad, esto es, la suma total de los valores de prioridad global de los combustibles representados es del 0,5. Para ver el ranking completo de cada escenario véase el Anexo D.

Los datos de los combustibles para llevar a cabo el proceso AHP pertenecen a un intervalo de regímenes de giro comprendido entre 1100 y 3000 rpm, es un rango típico que adoptan los motores de turismos en conducción por ciudad, de esta manera los resultados obtenidos en los distintos escenarios son aplicables al transporte urbano.

3.2.1 ESCENARIO 1

En este escenario el criterio económico es extremadamente prioritario, concretamente interesa que el combustible contribuya a la mejor eficiencia efectiva posible. Todas las emisiones tienen la misma importancia y no se prioriza disminuir un determinado tipo de emisión frente al resto. Este escenario representa un ambiente donde es imprescindible reducir al máximo el consumo de energía primaria y los costes de operación.

Tras aplicar el método AHP se obtiene el siguiente ranking de los 10 carburantes más adecuados en función de su vector de prioridad global:

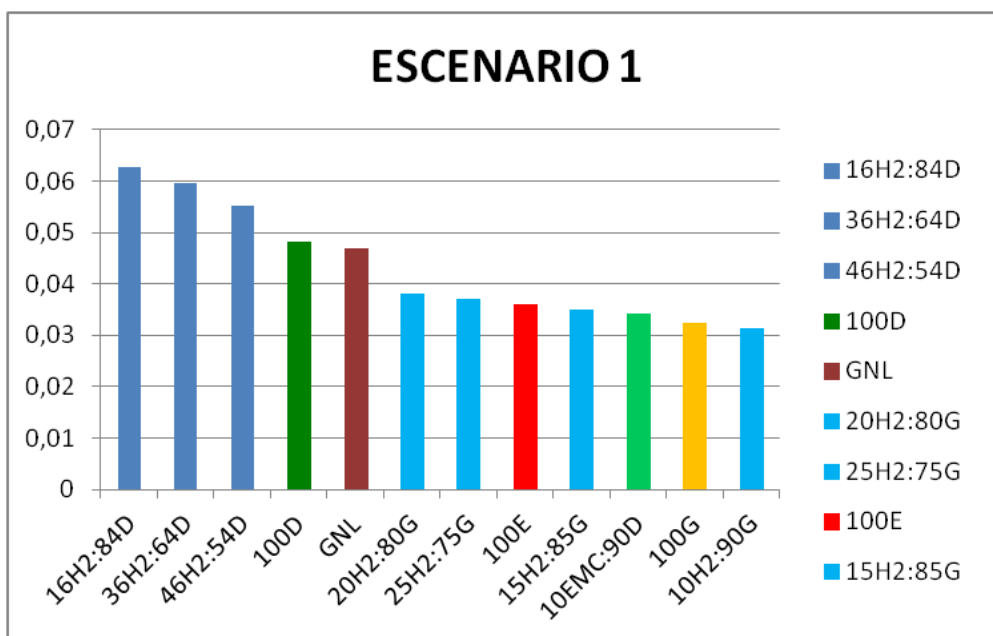


Fig.30 ranking de los mejores combustibles del escenario 1

El uso de combustible dual hidrógeno-diésel, concretamente el 16H2:84D (16% H₂ + 84% diésel), es el carburante que mejor se adapta a los requerimientos de este escenario.

3.2.2 ESCENARIO 2

Es extremadamente preferente el criterio económico, en este caso, es imprescindible que el combustible implique los mínimos cambios posibles en el motor. Este escenario modela un entorno donde la industria del automóvil no está dispuesta a invertir en grandes cambios en los motores convencionales. Todas las emisiones poseen la misma importancia y no se prioriza disminuir un determinado tipo de emisión frente al resto.

La fig. 31 muestra el ranking de los 10 combustibles que mejor se adaptan a este escenario:

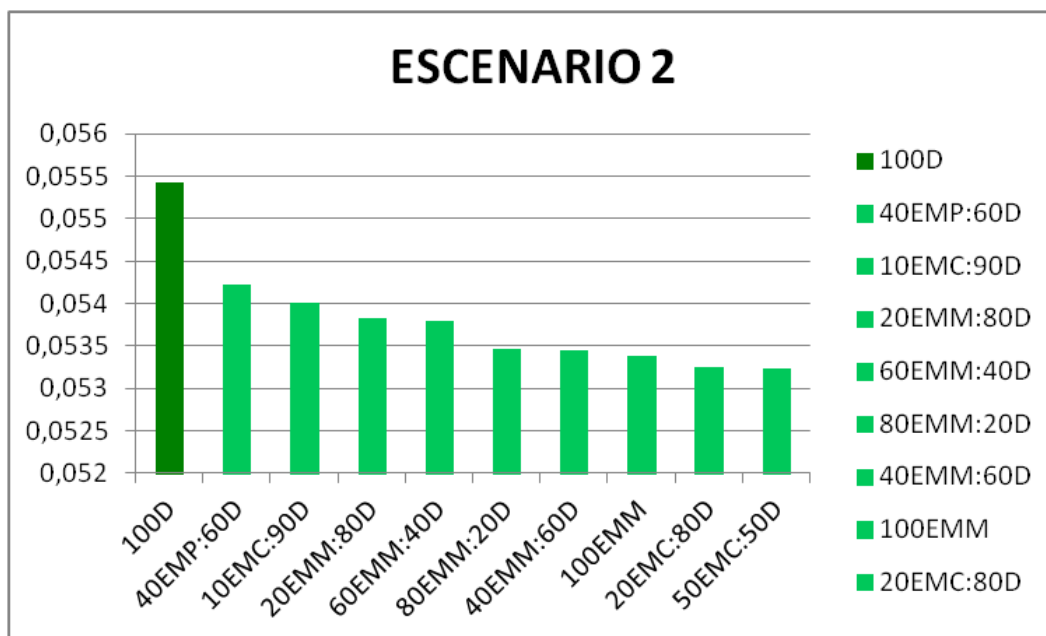


Fig.31 ranking de los mejores combustibles del escenario 2

El carburante que mejor se adapta a las exigencias de este escenario es el diesel seguido por distintas mezclas de biodiesel. Este escenario se encuentra totalmente dominado por las mezclas de biodiesel.

3.2.3 ESCENARIO 3

El criterio ambiental tiene la máxima prioridad, en concreto, se prima reducir al máximo las emisiones de CO₂. Este escenario representa un ambiente con normativas que implican importantes restricciones medioambientales, en concreto, en materia de emisiones de gases de efecto invernadero.

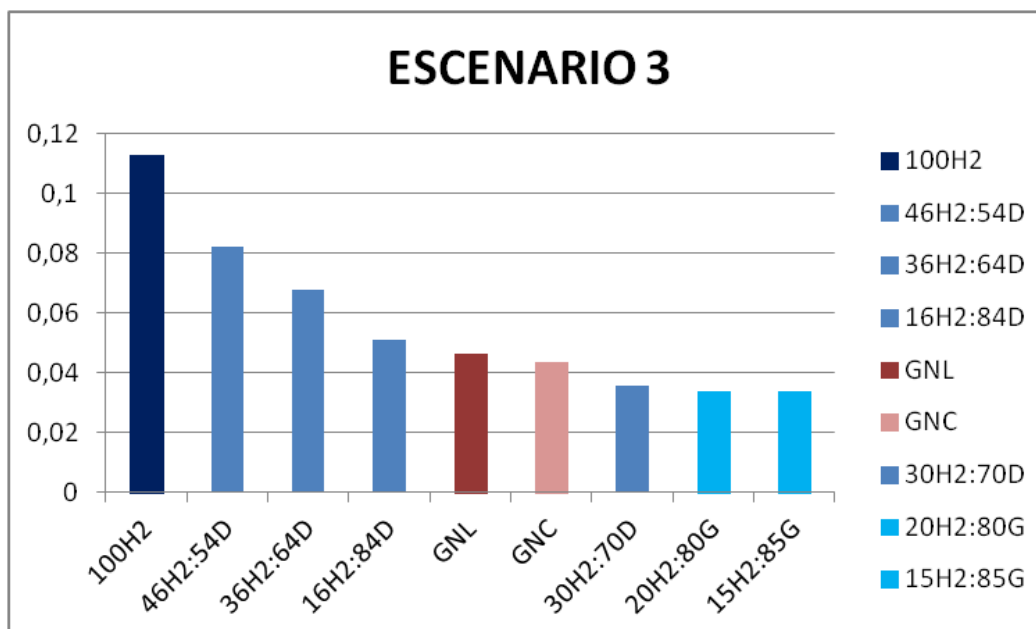


Fig.32 ranking de los mejores combustibles del escenario 3

El combustible que mejor se adapta a las condiciones de este escenario es el hidrógeno puro seguido por distintas proporciones de combustible dual hidrógeno-diesel.

3.2.4 ESCENARIO 4

La máxima preferencia recae sobre el criterio ambiental, concretamente se persigue reducir al máximo las emisiones de NOx. Este escenario representa un entorno donde existen importantes restricciones medioambientales encaminadas a mejorar la calidad del aire y reducir los problemas derivados de los NOx en el sistema cardio-respiratorio del ser humano. En la fig.33 se puede observar que las mezclas de biodiesel son los combustibles que mejor se adaptan a este escenario, concretamente el 40EMP:60D (40% éster metílico de aceite de palma + 60% diesel).

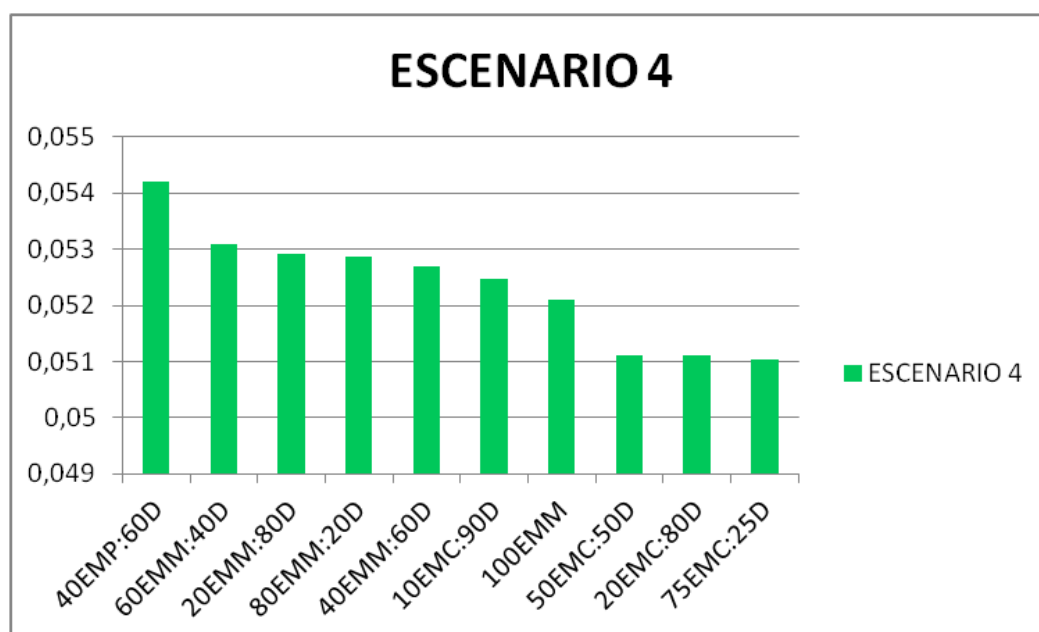


Fig.33 ranking de los mejores combustibles del escenario 4

3.2.5 ESCENARIO 5

Es extremadamente preferente el criterio ambiental, en particular, se prima reducir al máximo las emisiones de CO. Este escenario modela un ambiente con fuertes restricciones medioambientales encaminadas a reducir las emisiones de CO y con ello los efectos perjudiciales de este contaminante en el sistema cardiovascular del ser humano.

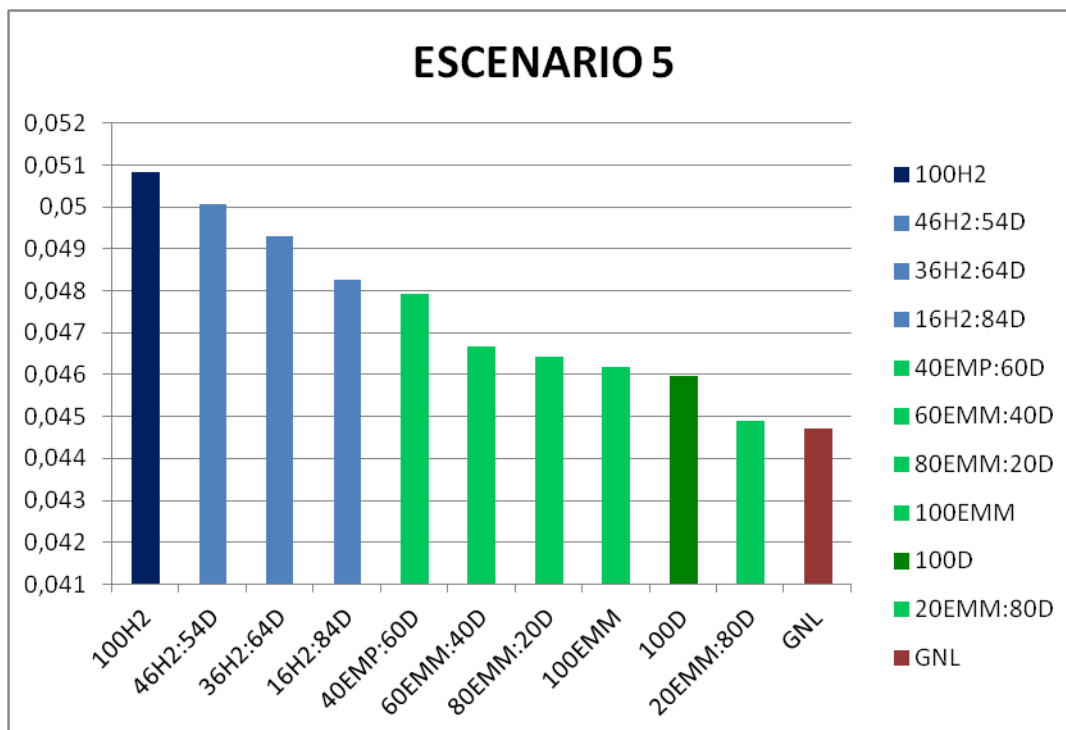


Fig.34 ranking de los mejores combustibles del escenario 5

El hidrógeno puro es el carburante que mejor se adapta a este escenario, seguido por distintas proporciones de combustible dual hidrógeno-diésel.

3.2.6 ESCENARIO 6

El criterio ambiental tiene preferencia extrema, concretamente se persigue reducir al máximo las emisiones de hidrocarburos inquemados. Este escenario representa un entorno con fuertes restricciones medioambientales dirigidas a mejorar la calidad del aire y reducir los problemas cancerígenos en el ser humano derivados de las emisiones de HC.

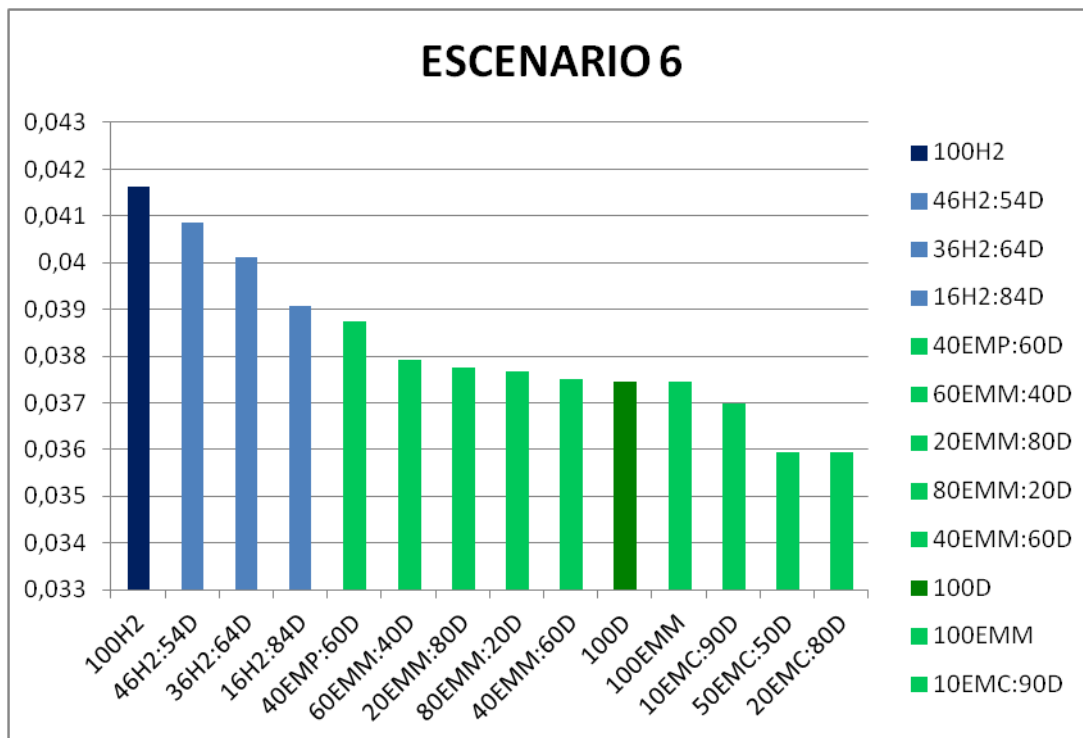


Fig.35 ranking de los mejores combustibles del escenario 6

El hidrógeno puro es el carburante que mejor se adapta a las imposiciones de este escenario, seguido por distintas proporciones de combustible dual hidrógeno-diesel.

3.2.7 ESCENARIO 7

El criterio ambiental es moderadamente prioritario frente al económico, dentro del criterio ambiental es extremadamente prioritario reducir las emisiones de NO_x y CO₂, teniendo a su vez mayor preferencia la reducción de las emisiones de CO₂ frente a las de NO_x. Dentro del criterio económico prima el rendimiento efectivo frente a las modificaciones del motor. Es un escenario que modela un entorno donde se prioriza el criterio ambiental pero sin descuidar el criterio económico. Las restricciones ambientales van dirigidas a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, teniendo una mayor importancia el calentamiento global frente a la salud humana.

La fig.36 muestra que el hidrógeno puro es el carburante que mejor se adapta a las exigencias de este escenario, seguido por distintas proporciones de combustible dual hidrógeno-diesel.

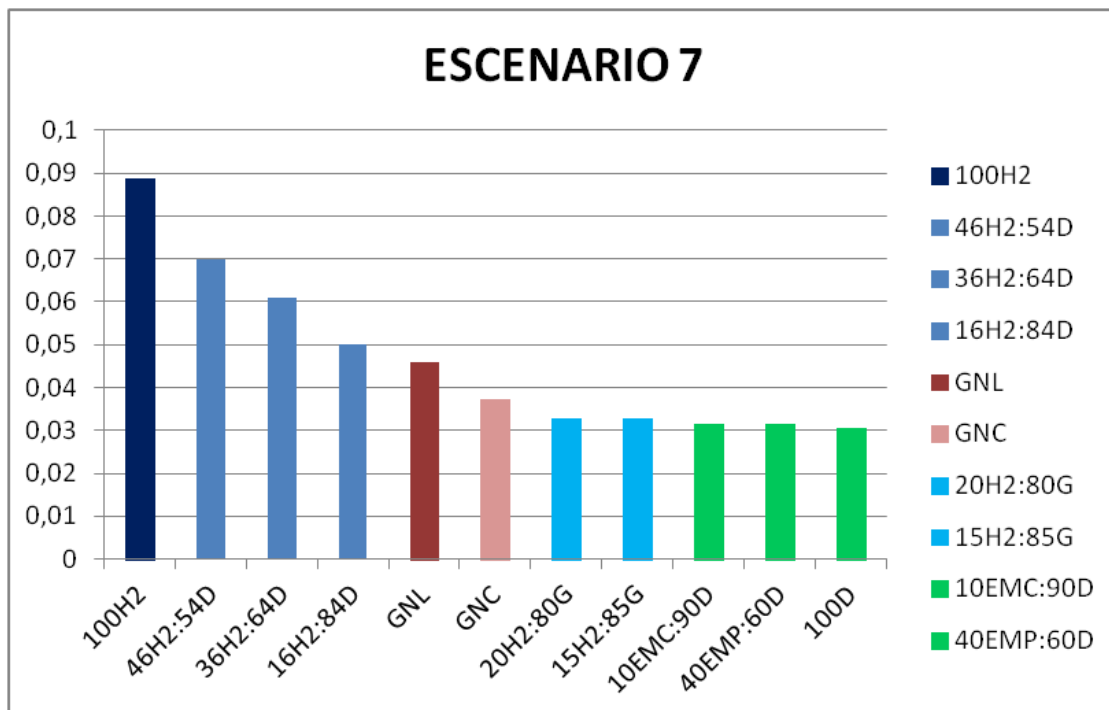


Fig.36 ranking de los mejores combustibles del escenario 7

3.2.8 ESCENARIO 8

El criterio ambiental tiene una preferencia moderadamente mayor al criterio económico, dentro del criterio ambiental es extremadamente prioritario reducir las emisiones de NO_x y CO₂, teniendo a su vez mayor preferencia la reducción de las emisiones de NO_x frente a las de CO₂. Dentro del criterio económico prima el rendimiento térmico frente a las modificaciones del motor. Es un escenario que representa un entorno donde se prioriza el criterio ambiental pero sin desatender el criterio económico. Las restricciones ambientales van dirigidas a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, teniendo una mayor importancia la salud humana frente al calentamiento global.

En la fig.37 se aprecia que los carburantes que mejor se adaptan a este escenario son las mezclas de biodiesel (concretamente 40% de éster metílico de aceite de palma + 60% diesel), en tercera posición se sitúa el hidrógeno puro.

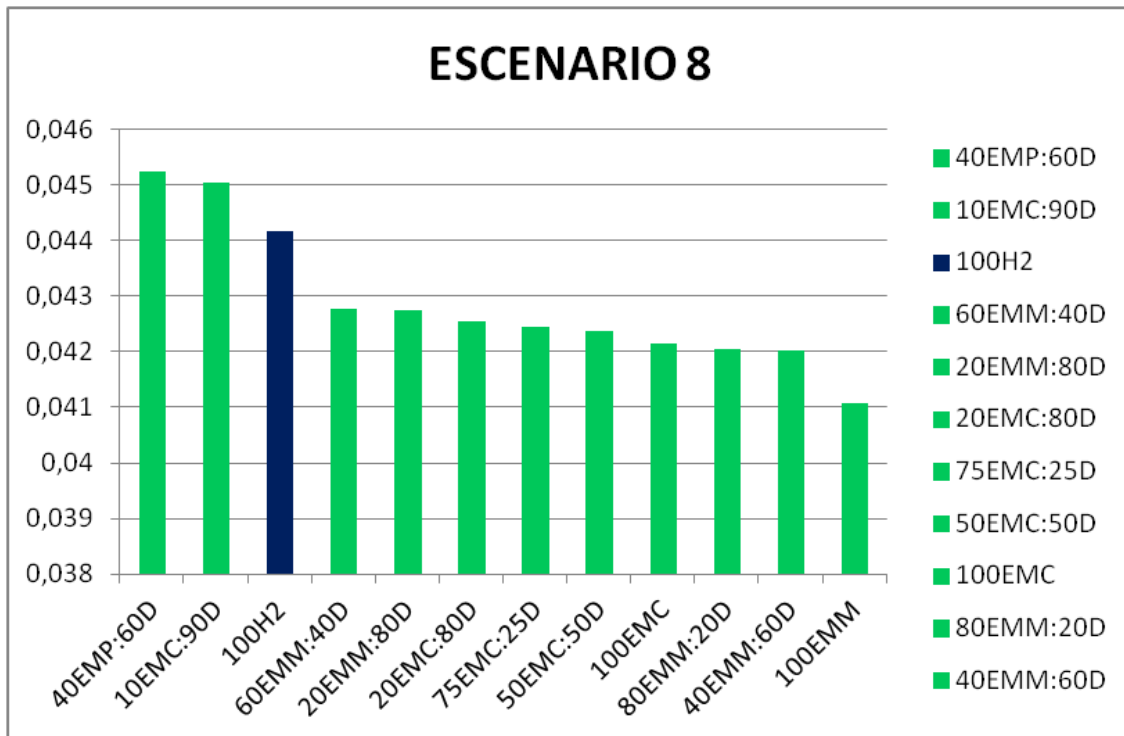


Fig.37 ranking de los mejores combustibles del escenario 8

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

1. No existe ningún combustible que sea idóneo para todas las variables de comparación (menores emisiones de CO, máximo rendimiento efectivo, etc.), la idoneidad de un combustible depende fuertemente del criterio de comparación.
2. El régimen de giro afecta poco al ranking de los combustibles para cualquier variable de comparación. Por ejemplo, el hidrógeno puro es el combustible que siempre contribuye al peor rendimiento efectivo, pero también es el que menos emisiones de CO genera, **independientemente del rango de regímenes de giro.**
3. Si se atiende al rendimiento efectivo, los combustibles que contribuyen a un mejor rendimiento son el GNL y el combustible dual hidrógeno-gasolina o hidrógeno-diésel con fracciones moderadas de hidrógeno. El peor rendimiento se corresponde al hidrógeno puro.
4. El uso de hidrógeno puro implica emisiones nulas de CO₂, CO y HC.

5. Las máximas emisiones de CO₂ vienen de la mano del biodiesel puro, de las mezclas del 40%biodiesel-60%diésel, 50%etanol-50%gasolina y sobre todo de la mezcla 80%etanol-20%gasolina.
6. Las peores emisiones de CO Y HC las presenta el gas natural, tanto licuado como comprimido.
7. Las mínimas emisiones de NO_x vienen de la mano del biodiesel puro y de sus mezclas con diesel y también de las mezclas hidrógeno-gasolina con bajo contenido de H₂. Las peores emisiones de NO_x corresponden al etanol puro y a las mezclas etanol-gasolina con elevado contenido en etanol.
8. Tanto el etanol puro como las mezclas etanol-gasolina con elevado contenido en etanol, implican el máximo número de modificaciones en el motor con respecto al resto de los combustibles comparados. En cambio, el biodiesel y sus mezclas con diesel no requieren de modificaciones.
9. Algunos de los anteriores puntos pueden resumirse de la siguiente manera:
 - El contenido de hasta un 66% de hidrógeno en un combustible favorece el rendimiento de la combustión, y con ello el rendimiento efectivo y reduce las emisiones de HC, CO y CO₂, sin afectar a las emisiones de NO_x
 - El combustible que incorpora un porcentaje de oxígeno de hasta un 11% favorece la reducción de las emisiones de HC y de CO, sin aumentar las emisiones de NO_x
 - Los combustibles gaseosos favorecen atomizaciones y mezclas aire-combustible homogéneas, pero a cambio se empeora el rendimiento volumétrico.
10. Del análisis multicriterio pueden obtenerse las siguientes conclusiones:
 - Cuando el criterio económico es el de mayor peso: Si lo prioritario es obtener la máxima eficiencia posible los combustibles duales hidrógeno-diesel son los más adecuados. En cambio, si lo que se busca son las mínimas modificaciones posibles del motor los carburantes más recomendables son el diesel y mezclas de biodiesel.
 - Cuando el criterio medioambiental es el de mayor peso: En los escenarios en los que se prioriza la disminución de las emisiones de CO₂, CO, y los hidrocarburos inquemados el hidrógeno puro es el carburante más adecuado, en segunda posición se sitúan los combustibles duales hidrógeno-diesel. En los escenarios cuya prioridad radica en la disminución de las emisiones de NO_x, son las mezclas de biodiesel las que mejor posicionamiento presentan.

ANEXO A: EJEMPLO DE CÁLCULOS DE COMBUSTIÓN

*****BALANCE DE MASA EN GAS NATURAL COMPRIMIDO*****

"DATOS"

gef=236
CO=0,03
ppm_NOx=912
ppm_HC=7,5

"REACCIÓN QUÍMICA ESTEQUIOMÉTRICA: (0,9442CH₄ + 0,0229C₂H₆ + 0,0003C₃H₈ + 0,0025C₄H₁₀ + 0,0057CO₂ + 0,0044N₂ + 0,02H₂O) + a_est(O₂ + 3,76N₂) --> b_estCO₂ + c_estH₂O + d_estN₂"

"C:" $0,9442*1+0,0229*2+0,0003*3+0,0025*4+0,0057*1=b_est$
"H:" $0,9442*4+0,0229*6+0,0003*8+0,0025*10+0,02*2=2*c_est$
"N:" $0,0044*2+a_est*2*3,76=2*d_est$
"O:" $0,0057*2+0,02*1+a_est*2=2*b_est+c_est$

"REACCIÓN QUÍMICA INCOMPLETA, CON AIRE DOSADO ESTEQUIOMÉTRICO:
(0,9442CH₄ + 0,0229C₂H₆ + 0,0003C₃H₈ + 0,0025C₄H₁₀ + 0,0057CO₂ + 0,0044N₂ + 0,02H₂O) + a_est(O₂ + 3,76N₂) --> bCO₂ + cH₂O + dN₂ + eO₂ + fCO"

"C:" $0,9442*1+0,0229*2+0,0003*3+0,0025*4+0,0057*1=b+f$
"H:" $0,9442*4+0,0229*6+0,0003*8+0,0025*10+0,02*2=c*2$
"N:" $0,0044*2+a_est*3,76*2=2*d$
"O:" $0,0057*2+0,02*1+2*a_est=2*b+c+2*e+f$

"FRACCIONES MOLARES"

gases_secos[1]='CO ₂ ':	gases_secos[1]=b
gases_secos[2]='N ₂ ':	gases_secos[2]=d
gases_secos[3]='O ₂ ':	gases_secos[3]=e
gases_secos[4]='CO':	gases_secos[4]=f
gases_secos_totales=SUM(gases_secos[i]; i=1;4)	

"PORCENTAJE EMISIONES"

CO₂=gases_secos[1]/gases_secos_totales*100
CO=gases_secos[4]/gases_secos_totales*100
O₂=gases_secos[3]/gases_secos_totales*100
N₂=gases_secos[2]/gases_secos_totales*100

"EMISIONES ESPECÍFICAS [g/kWh]"

PM_combutable=0,9442*(MolarMass(C)+4*MolarMass(H))+0,0229*(2*MolarMass(C)+6*MolarMass(H))+0,0003*(3*MolarMass(C)+8*MolarMass(H))+0,0025*(4*MolarMass(C)+10*MolarMass(H))+0,0057*MolarMass(CO₂)+0,0044*MolarMass(N₂)+0,02*MolarMass(H₂O)
E_CO₂=gases_secos[1]/PM_combutable*MolarMass(CO₂)*gef
E_CO=gases_secos[4]/PM_combutable*MolarMass(CO)*gef
E_NOx=ppm_NOx/1000000*gases_secos_totales/PM_combutable*MolarMass(NO₂)*gef
E_HC=ppm_HC/1000000*gases_secos_totales/PM_combutable*MolarMass(Benzene)*gef

ANEXO B: MODIFICACIONES EN LOS MACÍ'S

A continuación se exponen de manera resumida las modificaciones más importantes en los motores para el uso de distintos combustibles alternativos. En este estudio se tienen en cuenta únicamente modificaciones que afectan directamente a la máquina térmica. Se debe recalcar que en todos los casos van a precisarse dos modificaciones (que no implican directamente al motor):

- Depósito específicamente diseñado para el combustible alternativo.
- Modificación de la programación o sustitución de la unidad electrónica de control.

Debe recalcar que el único sistema de alimentación que admiten los combustibles alternativos es la inyección, puesto que los combustibles alternativos suelen implicar una pérdida de potencia (menor PCI). Los motores a inyección suelen obtener del 10 al 20% más de par y potencia máximos [45]. Por lo tanto, la carburación queda excluida.

Generalmente el sistema de inyección más utilizado es la inyección indirecta, ya que resulta más sencilla de llevar a cabo siendo al mismo tiempo más económica.

B.1 GAS NATURAL

Tanto el gas natural licuado como el comprimido precisan de las mismas modificaciones en el motor [47, 48]. En primer lugar debe practicarse un **pequeño taladro** que conecte el colector de admisión con los **tubos de conexión** del gas natural. Se trata de unos conductos rígidos capaces de soportar elevadas presiones que conectan la botella o el depósito de gas natural con el motor. Por otro lado, es necesario incorporar una **válvula de botella** en la salida del depósito de gas natural. Se trata de un dispositivo de seguridad para el exceso de presión y para la apertura y cierre rápido del circuito del gas natural. Por otro lado, los **inyectores** de gasolina o diesel deben ser sustituidos por otros específicos para gas natural, dado que cambia tanto la densidad como la viscosidad del combustible, y con ello las presiones en el inyector. De esta manera varían las necesidades de atomización precisándose un inyector específico para este cometido. El cambio de los inyectores implica modificar la dimensión de los agujeros o del **soporte** donde son alojados.

La inyección es, en la mayor parte de los casos, indirecta.

B.2 HIDRÓGENO

Las modificaciones que precisa el hidrógeno son muy similares a las requeridas por el gas natural. Básicamente existen tres métodos de alimentación del hidrógeno [11, 13]:

- Inyección de hidrógeno en el colector de admisión o lumbrera de admisión.
- Inyección directa en los cilindros.
- Introducción continua de hidrógeno en el colector de admisión, tal como el método de carburación.

La introducción continua de hidrógeno en el colector de admisión implica algunos problemas de combustión, tales como la pre-ignición o la detonación. Al mismo tiempo las eficiencias volumétricas de este sistema son muy reducidas, dando lugar a pobres potencias de salida. El hidrógeno ocupa más volumen que el aire, limitando la admisión del mismo, y por ende, dando lugar a mezclas ricas en el interior del combustible.

La inyección directa de hidrógeno en los cilindros es el método más eficiente, facilitando altas potencias de salida del motor y elevada eficiencia volumétrica, ya que no se obstaculiza la entrada de aire durante la fase de admisión. Sin embargo, requiere de inyectores especiales, han de ser resistentes a la alta presión y a la alta temperatura en los cilindros. Esto implica diseños más complejos y materiales más caros. Por otro lado, estos inyectores no cuentan con la experiencia en vehículos comerciales, por lo que su fiabilidad está en tela de juicio. Al mismo tiempo, implican modificaciones especiales en la culata para su instalación.

El método mayoritariamente elegido es la inyección indirecta de hidrógeno en el colector de admisión, dado que presenta un compromiso entre economía (costes de las modificaciones) y eficiencia.

B.3 ETANOL

[49, 50].

En este caso debe diferenciarse entre las mezclas de etanol-gasolina con reducido contenido de etanol (<85% de etanol) y mezclas con elevado contenido en etanol (≥85% de etanol).

Las mezclas con reducido contenido en etanol requieren únicamente sustituir el **inyector**, dado que la densidad y viscosidad del combustible cambian, y con ello las necesidades de atomización. El cambio de los inyectores puede implicar la

modificación del **soporte o el diámetro de los agujeros** en los que van alojados los inyectores.

Las mezclas ricas en etanol, o también, el etanol puro, además del cambio de **inyectores** precisan modificar el **colector de admisión**, la **pipa de admisión** y un **sistema de arranque en frío**.

El uso de mezclas ricas en etanol, o el etanol puro implican mayores caudales máxicos de combustible por el efecto de enfriamiento del etanol (véase el capítulo 3). Por lo tanto, se precisa un aumento en la sección del 30 al 40% en el colector de admisión y en la pipa de admisión.

Por otro lado, se precisa de un sistema de arranque en frío para facilitar la evaporación del combustible a temperaturas por debajo de 15 °C.

Hay que recalcar que las mezclas ricas en etanol presentan gran facilidad para corroer y degradar los materiales convencionales empleados en los motores. Es por tanto, aconsejable que los motores alimentados por mezclas ricas en etanol o etanol puro estén dotados de **materiales más resistentes y versátiles**, especialmente en puntos críticos del motor tales como **válvulas, cilindros, pistones y bombas de combustible**.

Las mezclas ricas en etanol o el etanol puro son los combustibles alternativos que mayores modificaciones del motor precisan.

ANEXO C: TABLAS DE INDICADORES NORMALIZADOS

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: [1100, 1500]						
COMBUSTIBLE	η	CO ₂	CO	NO _x	HC	MODIFICACIONES
100G	2,81	4,06	7,74	1,61	9,02	10,00
100D	3,30	3,68	9,45	7,19	9,98	10,00
100H2	1,21	10,00	10,00	0,06	10,00	3,33
16H2:84D	4,20	6,14	9,98	6,86	9,99	6,67
30H2:70D	2,69	5,17	9,97	2,14	9,99	6,67
36H2:64D	4,07	7,39	9,98	5,43	9,99	6,67
46H2:54D	3,89	8,26	9,98	2,43	9,99	6,67
100E	3,25	4,21	9,81	4,03	9,92	0,00
50E:50G	2,79	3,53	8,91	3,59	9,59	3,33
80E:20G	2,79	3,46	9,02	3,96	9,64	3,33
85E:15G	2,89	5,26	4,26	0,00	8,19	0,00
40EMP:60D	2,72	3,31	9,95	9,74	9,99	10,00
100AC	2,00	0,36	7,45	9,60	9,98	3,33
10EMC:90D	2,80	3,29	8,59	9,72	9,99	10,00
20EMC:80D	2,60	2,61	8,24	9,69	9,98	10,00
50EMC:50D	2,50	2,27	8,33	9,68	9,98	10,00
75EMC:25D	2,50	2,59	8,15	9,69	9,98	10,00
100EMC	2,40	2,31	8,20	9,67	9,98	10,00
20EMM:80D	2,50	1,55	9,56	9,67	9,98	10,00
40EMM:60D	2,30	1,37	9,56	9,66	9,98	10,00
60EMM:40D	2,40	1,74	9,77	9,68	9,98	10,00
80EMM:20D	2,20	1,28	9,80	9,67	9,98	10,00
100EMM	2,20	0,00	9,84	9,59	9,98	10,00
GNL	3,86	6,11	9,86	7,40	0,00	6,67
GNC	2,26	6,21	0,00	6,97	8,93	6,67
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 5 valores numéricos normalizados de las variables, rango [1100, 1500]

BIODIÉSEL, RANGO: [1100, 1500]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
40EMP:60D	2,72	3,31	9,95	9,74	9,99	10,00
100AC	2,00	0,36	7,45	9,60	9,98	3,33
10EMC:90D	2,80	3,29	8,59	9,72	9,99	10,00
20EMC:80D	2,60	2,61	8,24	9,69	9,98	10,00
50EMC:50D	2,50	2,27	8,33	9,68	9,98	10,00
75EMC:25D	2,50	2,59	8,15	9,69	9,98	10,00
100EMC	2,40	2,31	8,20	9,67	9,98	10,00
20EMM:80D	2,50	1,55	9,56	9,67	9,98	10,00
40EMM:60D	2,30	1,37	9,56	9,66	9,98	10,00
60EMM:40D	2,40	1,74	9,77	9,68	9,98	10,00
80EMM:20D	2,20	1,28	9,80	9,67	9,98	10,00
100EMM	2,20	0,00	9,84	9,59	9,98	10,00

Tabla 6 valores numéricos normalizados de las variables para el biodiésel, rango [1100, 1500]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (1500, 2000]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
100G	2,83	1,52	7,40	1,64	9,38	10,00
100D	3,68	2,40	9,97	6,24	9,96	10,00
100H2	1,24	10,00	10,00	2,37	10,00	3,33
5H2:95G	2,55	0,71	6,93	6,63	9,58	6,67
10H2:90G	2,75	1,32	7,40	6,54	9,62	6,67
15H2:85G	2,88	2,94	8,20	6,95	9,71	6,67
20H2:80G	3,13	2,25	8,15	6,20	9,68	6,67
25H2:75G	3,05	1,97	8,43	5,91	9,69	6,67
100E	3,18	1,60	9,63	0,67	9,91	0,00
50E:50G	2,90	1,11	8,85	3,08	9,71	3,33
80E:20G	2,82	0,77	8,96	3,85	9,72	3,33
85E:15G	2,87	3,20	3,72	0,00	8,63	0,00
40EMP:60D	2,55	0,00	9,97	9,75	9,99	10,00
GNL	3,42	3,70	9,72	8,43	0,00	6,67
GNC	2,33	4,58	0,00	3,14	9,31	6,67
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 7 valores numéricos normalizados de las variables, rango (1500, 2000]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (2000, 2500]						
COMBUSTIBLE	η	CO ₂	CO	NO _x	HC	MODIFICACIONES
100G	2,89	0,43	8,10	2,84	6,50	10,00
100H2	1,26	10,00	10,00	4,61	10,00	3,33
5H2:95G	2,78	0,75	6,16	6,99	5,57	6,67
10H2:90G	2,98	1,22	6,86	7,10	6,06	6,67
15H2:85G	3,18	1,69	7,36	6,82	6,57	6,67
20H2:80G	3,35	2,09	7,62	6,78	6,79	6,67
25H2:75G	3,25	1,80	7,75	6,26	6,82	6,67
100E	3,20	0,66	9,52	0,00	8,41	0,00
50E:50G	2,89	0,00	8,71	3,67	7,22	3,33
80E:20G	2,94	0,15	8,78	4,64	7,24	3,33
GNC	2,40	3,85	0,00	4,28	0,00	6,67
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 8 valores numéricos normalizados de las variables, rango (2000, 2500]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (2500, 3000]						
COMBUSTIBLE	η	CO ₂	CO	NO _x	HC	MODIFICACIONES
100G	2,92	0,46	8,09	3,64	6,55	10,00
100H2	1,26	10,00	10,00	5,89	10,00	3,33
5H2:95G	2,94	1,40	6,06	7,51	5,48	6,67
10H2:90G	3,05	1,53	6,72	7,31	6,00	6,67
15H2:85G	3,25	2,01	7,09	7,39	6,31	6,67
20H2:80G	3,42	2,37	7,42	7,20	6,66	6,67
25H2:75G	3,28	1,98	7,56	7,00	6,57	6,67
100E	3,16	0,61	9,41	0,00	8,55	0,00
50E:50G	2,95	0,20	8,77	5,21	6,99	3,33
80E:20G	2,89	0,00	8,77	5,80	7,53	3,33
GNC	2,48	4,21	0,00	2,98	0,00	6,67
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 9 valores numéricos normalizados de las variables, rango (2500, 3000]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (3000, 3500]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
100G	2,94	0,55	7,91	3,60	6,93	10,00
100H2	1,24	10,00	10,00	6,32	10,00	3,33
5H2:95G	2,65	0,67	5,66	6,97	4,67	6,67
10H2:90G	2,77	0,92	6,26	6,98	5,11	6,67
15H2:85G	2,86	1,03	6,85	6,93	5,41	6,67
20H2:80G	3,37	2,40	7,37	7,13	6,25	6,67
25H2:75G	3,18	1,91	7,40	6,65	6,16	6,67
100E	3,28	0,98	9,48	0,00	9,03	0,00
50E:50G	2,91	0,18	8,74	5,29	7,95	3,33
80E:20G	2,90	0,00	8,99	6,18	8,23	3,33
GNC	2,48	4,67	0,00	3,04	0,00	6,67
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 10 valores numéricos normalizados de las variables, rango (3000, 3500]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (3500, 4000]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
100G	2,87	0,91	6,53	1,63	5,81	10,00
100H2	1,22	10,00	10,00	1,82	10,00	0,00
5H2:95G	2,49	0,72	3,86	3,56	2,53	5,00
10H2:90G	2,63	1,05	4,72	3,26	3,33	5,00
15H2:85G	2,78	1,45	5,39	2,82	4,00	5,00
20H2:80G	3,05	2,11	6,21	2,85	4,80	5,00
25H2:75G	2,88	1,64	6,07	2,19	4,61	5,00
50E:50G	2,89	0,69	8,43	1,03	7,81	0,00
80E:20G	2,72	0,00	8,54	2,11	8,02	0,00
GNC	2,56	4,36	0,00	0,00	0,00	5,00
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 11 valores numéricos normalizados de las variables, rango (3500, 4000]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (4000, 4500]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
100G	3,04	0,82	8,21	0,00	7,15	10,00
100H2	1,19	10,00	10,00	2,17	10,00	0,00
50E:50G	2,76	0,11	8,24	0,28	7,12	0,00
80E:20G	2,74	0,00	8,27	2,40	7,38	0,00
GNC	2,65	4,47	0,00	0,52	0,00	5,00
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 12 valores numéricos normalizados de las variables, rango (4000, 4500]

TODAS LAS TECNOLOGÍAS, RANGO: (4500, 5000]						
COMBUSTIBLE	η	CO2	CO	NOx	HC	MODIFICACIONES
100G	3,04	0,82	8,21	0,00	7,15	10,00
100H2	1,19	10,00	10,00	2,17	10,00	0,00
50E:50G	2,76	0,11	8,24	0,28	7,12	0,00
80E:20G	2,74	0,00	8,27	2,40	7,38	0,00
GNC	2,65	4,47	0,00	0,52	0,00	5,00
COMBUSTIBLE IDEAL	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Tabla 13 valores numéricos normalizados de las variables, rango (4500, 5000]

ANEXO D: RANKINGS COMPLETOS

RANKING DE COMBUSTIBLES	
16H2:84D	0,062554902
36H2:64D	0,059489944
46H2:54D	0,055241355
100D	0,048174542
GNL	0,046998336
20H2:80G	0,037982746
25H2:75G	0,037031989
100E	0,036033603
15H2:85G	0,035115786
10EMC:90D	0,03424484
100G	0,032512903
10H2:90G	0,03138184
40EMP:60D	0,030979603
20EMM:80D	0,029881781
20EMC:80D	0,029572156
50EMC:50D	0,029282515
75EMC:25D	0,029250381
60EMM:40D	0,029035612
50E:50G	0,029009888
80E:20G	0,028410105
100EMC	0,028322722
5H2:95G	0,02827935
85E:15G	0,028049263
40EMM:60D	0,026572664
30H2:70D	0,026489633
80EMM:20D	0,026239641
100EMM	0,026158288
GNC	0,022566768
100AC	0,018261195
100H2	0,016875648

Tabla 14 ranking completo y vector de prioridad del escenario 1

RANKING DE COMBUSTIBLES	
100D	0,055430346
40EMP:60D	0,054225317
10EMC:90D	0,054001168
20EMM:80D	0,053823826
60EMM:40D	0,053799279
80EMM:20D	0,053468971
40EMM:60D	0,053447314
100EMM	0,053387618
20EMC:80D	0,053249008
50EMC:50D	0,05322456
75EMC:25D	0,053192426
100EMC	0,053086389
100G	0,052269231
36H2:64D	0,025308496
16H2:84D	0,025274572
46H2:54D	0,025141533
GNL	0,02289799
20H2:80G	0,021216688
25H2:75G	0,020975291
15H2:85G	0,020932415
30H2:70D	0,020469486
10H2:90G	0,020176354
5H2:95G	0,019748763
GNC	0,019062155
100H2	0,012867914
50E:50G	0,010762183
80E:20G	0,010701726
100AC	0,01006848
100E	0,009883501
85E:15G	0,007907

Tabla 15 ranking completo y vector de prioridad del escenario 2

RANKING DE COMBUSTIBLES	
100H2	0,112798179
46H2:54D	0,082112355
36H2:64D	0,06772892
16H2:84D	0,051216708
GNL	0,046388082
GNC	0,043640874
30H2:70D	0,035893494
20H2:80G	0,033809511
15H2:85G	0,033745847
85E:15G	0,031501365
100D	0,03115072
25H2:75G	0,030975141
40EMP:60D	0,02714942
10H2:90G	0,026457723
100E	0,026433508
10EMC:90D	0,025898896
5H2:95G	0,024606101
100G	0,024444862
50E:50G	0,021734441
20EMC:80D	0,02159421
75EMC:25D	0,021505497
60EMM:40D	0,021414776
50EMC:50D	0,021185813
100EMC	0,021022351
20EMM:80D	0,020976471
80E:20G	0,020858398
80EMM:20D	0,020646846
40EMM:60D	0,020504544
100EMM	0,018956031
100AC	0,013648918

Tabla 16 ranking completo y vector de prioridad del escenario 3

RANKING DE COMBUSTIBLES	
40EMP:60D	0,054217301
60EMM:40D	0,053095639
20EMM:80D	0,05291823
80EMM:20D	0,052858112
40EMM:60D	0,052684768
10EMC:90D	0,052478652
100EMM	0,05210834
50EMC:50D	0,051120432
20EMC:80D	0,051112743
75EMC:25D	0,05102403
100EMC	0,05095697
100AC	0,0467566
GNL	0,03357625
16H2:84D	0,032401786
100D	0,029325845
36H2:64D	0,028097675
15H2:85G	0,024010942
100H2	0,023950839
46H2:54D	0,023444576
20H2:80G	0,02270382
10H2:90G	0,022572817
5H2:95G	0,022187225
25H2:75G	0,020636181
30H2:70D	0,01645639
80E:20G	0,015090326
GNC	0,014125693
50E:50G	0,014080417
100E	0,01336693
100G	0,013129595
85E:15G	0,009510875

Tabla 17 ranking completo y vector de prioridad del escenario 4

RANKING DE COMBUSTIBLES	
100H2	0,050821327
46H2:54D	0,050062662
36H2:64D	0,049316385
16H2:84D	0,048267735
40EMP:60D	0,047931762
60EMM:40D	0,046674117
80EMM:20D	0,046436589
100EMM	0,046192531
100D	0,045960705
20EMM:80D	0,044881868
GNL	0,044721856
40EMM:60D	0,044648406
30H2:70D	0,043404198
100E	0,040616532
10EMC:90D	0,02985725
50E:50G	0,027188508
80E:20G	0,027171932
50EMC:50D	0,026694553
20EMC:80D	0,026061931
100EMC	0,02567985
75EMC:25D	0,025410842
20H2:80G	0,022505643
25H2:75G	0,022219876
15H2:85G	0,021996708
100G	0,021140612
100AC	0,018392326
10H2:90G	0,017816451
5H2:95G	0,016419874
GNC	0,011166697
85E:15G	0,010340272

Tabla 18 ranking completo y vector de prioridad del escenario 5

RANKING DE COMBUSTIBLES	
100H2	0,041626139
46H2:54D	0,040867474
36H2:64D	0,040121197
16H2:84D	0,039072547
40EMP:60D	0,038736574
60EMM:40D	0,037922278
20EMM:80D	0,037744869
80EMM:20D	0,037684751
40EMM:60D	0,037511407
100D	0,037465854
100EMM	0,037440692
10EMC:90D	0,036997926
50EMC:50D	0,035947071
20EMC:80D	0,035939382
75EMC:25D	0,035850668
100EMC	0,035783609
30H2:70D	0,03420901
20H2:80G	0,03247179
15H2:85G	0,032408126
100E	0,032053287
25H2:75G	0,031964348
100AC	0,031949093
10H2:90G	0,030669703
50E:50G	0,030262491
80E:20G	0,030245915
5H2:95G	0,030204262
100G	0,024167906
GNC	0,020987058
GNL	0,016364451
85E:15G	0,01533012

Tabla 19 ranking completo y vector de prioridad del escenario 6

RANKING DE COMBUSTIBLES	
100H2	0,088884663
46H2:54D	0,070018452
36H2:64D	0,060913807
16H2:84D	0,049982203
GNL	0,04597345
GNC	0,037258329
20H2:80G	0,032793059
15H2:85G	0,03273957
10EMC:90D	0,031666238
40EMP:60D	0,031611958
100D	0,030660799
30H2:70D	0,030119393
25H2:75G	0,030030029
85E:15G	0,028470178
20EMC:80D	0,027697396
75EMC:25D	0,027604225
50EMC:50D	0,027318704
100EMC	0,027090133
60EMM:40D	0,026827305
10H2:90G	0,026663175
20EMM:80D	0,026660356
80EMM:20D	0,0258476
40EMM:60D	0,025839875
5H2:95G	0,024855161
100EMM	0,0243866
100E	0,024200092
100AC	0,021804101
100G	0,021380434
50E:50G	0,020592439
80E:20G	0,020110277

Tabla 20 ranking completo y vector de prioridad del escenario 7

RANKING DE COMBUSTIBLES	
40EMP:60D	0,045233074
10EMC:90D	0,04504172
100H2	0,04417485
60EMM:40D	0,042769768
20EMM:80D	0,042734107
20EMC:80D	0,04255173
75EMC:25D	0,04245856
50EMC:50D	0,042382422
100EMC	0,04215385
80EMM:20D	0,042056973
40EMM:60D	0,042033627
100EMM	0,041069525
36H2:64D	0,040970548
16H2:84D	0,040514147
46H2:54D	0,040495616
GNL	0,039526272
100AC	0,038464569
100D	0,029742484
15H2:85G	0,027840765
20H2:80G	0,027204446
25H2:75G	0,024827251
10H2:90G	0,024708211
5H2:95G	0,023637933
GNC	0,022405682
30H2:70D	0,020338242
100E	0,017624721
85E:15G	0,01740411
80E:20G	0,017207664
50E:50G	0,016740776
100G	0,015686358

Tabla 21 ranking completo y vector de prioridad del escenario 8

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Foro Nuclear, Energía en el 2015, <http://www.foronuclear.org/es/energia/2015>, revised: 20/01/2016
- [2] Lucie. Coniglio, *Combustion chemical kinetics of biodiesel and related compounds (methyl and ethyl esters): advances and future refinements*, Progr. Energy Combust. 39 (4) (2013) 340–382.
- [3] European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment>, revised: 20/01/2016
- [4] IDAE, <http://www.idae.es/index.php/idpag.802/relcategoria.1368/relmenu.363/mod.pags/mem.detalle>, revised: 2/12/2015
- [5] Observatorio del transporte en España, <http://observatoriodeltransporte.fomento.es/NR/rdonlyres/775612E3-0CDE-43C3-8A6A-13853CCF3919/127878/INFORMEOTLE2013v02.pdf>, revised: 2/12/2015
- [6] Libro blanco del transporte, http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white-paper-illustrated-brochure_es.pdf, revised: 2/12/2015
- [7] Libro verde sobre seguridad del abastecimiento energético, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=URISERV:l27037&from=ES>, revised: 2/12/2015
- [8] Zhenxia Zhu, Fujun Zhang, Changjiang Li, Taotao Wu, Kai Han, Jianguo Lv, Yunlong, Xuelian Xiao, *Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau*, Applied Energy 157 (2015) 789-797
- [9] Ocktaeck Lim, Nguyen Ba Hung, Seokyoung Oh, Gangchul Kim, Hanho Song, Norimasa Iida. *A study of operating parameters on the linear spark ignition engine*, Applied Energy 160 (2015) 746-760
- [10] Madhujit Deb, G.R.K. Sastry, P.K. Bose, Rahul Banerjee. *An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation*. Hydrogen energy 40 (2015) 8586-8598

- [11] C. Sopena, P.M. Diéguez, D. Sáinz, J.C. Urroz, E. Guelbenzu, L.M. Gandía. *Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline*. Hydrogen energy 35 (2010) 1420 – 1429
- [12] Y. Karagöz , T. Sandalçı, L. Yüksek, A.S. Dalkılıç. *Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads*. Hydrogen energy 40 (2015) 6702-6713
- [13] Tarkan Sandalçı, Yasin Karagöz. *Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine*. International journal of hydrogen energy 39(2014) 18480-18489
- [14] Shivaprasad K Va, *, Raviteja Sa, Parashuram Chitragara Kumar G N. *Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine*. Procedia Technology 14 (2014) 141 – 148
- [15] Probir Kumar Bose, Dines Maji. *An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel and diesel as injected fuel with exhaust gas recirculation*. International journal of hydrogen energy 34 (2009) 4847 – 4854
- [16] Changwei Ji, Shuofeng Wang. *Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition*. international journal of hydrogen energy 34 (2009) 3546 – 3556
- [17] Y. Karagöz, N. Yuca, T. Sandalçı, A.S. Dalkılıç. *Effect of hydrogen and oxygen addition as a mixture on emissions and performance characteristics of a gasoline engine*. international journal of hydrogen energy 40 (2015) 8750-8760
- [18] Changwei Ji, Shuofeng Wang, Bo Zhang. *Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions*. Applied Energy 97 (2012) 584–589
- [19] R.J. Crookes. *Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines*. Biomass and Bioenergy 30 (2006) 461–468
- [20] S. Senthilkumar, G. Sivakumar, Siddarth Manoharan. *Investigation of palm methyl-ester bio-diesel with additive on performance and emission characteristics of a diesel engine under 8-mode testing cycle*. Alexandria Engineering Journal (2015) 54, 423–428
- [21] A.S. Ramadhas, C. Muraleedharan, S. Jayaraj. *Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil*. Renewable Energy 30 (2005) 1789–1800
- [22] H. Raheman, S.V. Ghadge. *Performance of compression ignition engine with mahua (Madhuca indica) biodiesel*. Fuel 86 (2007) 2568–2573

- [23] A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian. *Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 653–662
- [24] E. Sadeghinezhad, S.N. Kazi, Foad Sadeghinejad, A. Badarudin, Mohammad Mehrali, RaSadri, Mohammad Reza Safaei. *A comprehensive literature review of bio-fuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30 (2014) 29–44
- [25] S.A. Shahir, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, A.I mran, I.M. Rizwanul Fattah, A. Sanjid. *Feasibility of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blends existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compatibility, safety and combustion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014) 379–395
- [26] Seung Hyun Yoon, Chang Sik Lee. *Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air conditions*. Fuel 97 (2012) 887–890
- [27] Cheolwoong Park, Young Choi, Changgi Kim, Seungmook Oh, Gihun Lim, Yasuo Moriyoshi. *Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas*. Fuel 89 (2010) 2118–2125
- [28] Mustafa Koç, Yakup Sekmen, Tolga Topgül, Hüseyin Serdar Yücesu. *The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine*. Renewable Energy 34 (2009) 2101–2106
- [29] Su Han Park a,c, Seung Hyun Yoon b, Chang Sik Lee. *Bioethanol and gasoline premixing effect on combustion and emission characteristics in biodiesel dual-fuel combustion engine*. Applied Energy 135 (2014) 286–298
- [30] Dale Turner, Hongming Xu, Roger F. Cracknell, Vinod Natarajan, Xiangdong Chen. *Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine*. Fuel 90 (2011) 1999–2006
- [31] Rodrigo C. Costa, José R. Sodré. *Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance*. Applied Thermal Engineering 31 (2011) 278–283
- [32] M.I. Jahirul, H.H. Masjuki, R. Saidur, M.A. Kalam, M.H. Jayed, M.A. Wazed. *Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasolina in a retrofitted car engine*. Applied Thermal Engineering 30 (2010) 2219–2226
- [33] Kraipat Cheenkachorn, Chedthawut Poornpipatpong, Choi Gyeong Ho. *Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas)*. Energy 53 (2013) 52–57

- [34] Yanuandri Putrasari, Achmad Praptijanto, Arifin Nur, Bambang Wahonoa, Wihono, Budi Santoso. *Evaluation of performance and emission of SI engine fuelled with CNG at low and high load condition*. Energy Procedia 68 (2015) 147 – 156
- [35] Jiehui Li, Bingbing Wu, Gongping Mao. *Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine*. Journal of Natural Gas Science & Engineering (2015),doi: 10.1016/j.jngse.2015.09.036.
- [36] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España), <http://www.prtr-es.es>, revised: 30/12/2015
- [37] Analizadores de gases testo, <http://analizadores-gases.es/test-3-2/>, revised: 30/12/2015
- [38] Canan Acar, Ibrahim Dincer. *Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources*. International journal of hydrogen energy 39 (2014) 1-12
- [39] Pohehar SD, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2004; 8:365-381.
- [40] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009; 13 (9): 2263-78
- [41] Tudela A, Akiki N, Cisternas R. Comparing the output of cost-benefit and multicriteria analysis. An application to urban transport investment. Transportation Research Part A 2006; 40:414-423.
- [42] Awasthi A, Chauhan SS. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluation sustainable transport solutions. Environmental Modelling and Software 2011; 26:787-796.
- [43] Yedla S, Shrestha RM. Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi. Transportation Research Part A 2003; 37(8):717-729
- [44] Saaty R.W., The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, Mathematical Modelling 1987, 9(3–5): 161-176
- [45] Mariano Muñoz Rodríguez, Francisco Moreno Gómez, Jesús F. Morea Roy. *Motores alternativos de combustión interna*. 2ª edición, 2008.
- [46] J. R. Sodr , S. M. C. Soares, *Comparison of Engine Power Correction Factors for Varying Atmospheric Conditions*.

[47] L.E. Gettel, G.C. Perry, *Natural Gas Conversion Systems for Heavy Duty Truck Engines*. 1991, SAE Technical Paper Series 911663

[48] Juan José Moreno León. *Gas natural como combustible alternativo para vehículos*. PFC Ingeniería Técnica Industrial, Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, 2011.

[49] Eleder Antuñano García. *Modelización termodinámica de un motor turboalimentado y propulsado por bietanol*. PFC Ingeniería Técnica Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior.

[50] Marriott CD, Wiles MA, Gwidt JM, Parrish SE. *Development of a naturally aspirated spark ignition direct-injection flex-fuel engine*. SAE technical paper; 2008[2008-01-0319].