

**EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR
DIÉSEL KOHLER KDI 2504M EMPLEANDO MEZCLAS BIODIESEL-DIÉSEL
EN ASPEN HYSYS**



Autor:

OSCAR JESÚS BARRERA FLOREZ

.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA CÓRDOBA
NOVIEMBRE DE 2016**

**EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR
DIÉSEL KOHLER KDI 2504M EMPLEANDO MEZCLAS BIODIESEL-DIÉSEL
EN ASPEN HYSYS**

OSCAR JESÚS BARRERA FLOREZ

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de Investigación, como
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director (s):

ING. JAIRO LUIS DURANGO PADILLA, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA CÓRDOBA
NOVIEMBRE DE 2016**

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto,
serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

JAIRO LUIS DURANGO PADILLA
Director

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO
Jurado

ALONSO RAFAEL PERDOMO JIMÉNEZ
Jurado

DEDICADO A:

Dios por haberme dado la vida, sabiduría y fuerza para poder sobrepasar cada uno de los obstáculos que se presentaron en mi camino.

Mis madres Dani Flórez y Martha Polo por apoyarme siempre en toda mi vida

Familiares que aportaron su granito de arena para que fuese un hombre correcto.

Ese ángel que me cuida desde el cielo y vela siempre por mí en cada paso que doy.

Mi novia por haber estado a mi lado apoyándome en las adversidades.

Mis amigos que se convirtieron en hermanos.

Alguien muy especial que respeto y quiero con el corazón, Emirson Dilicio gracias por todo.

Agradecimientos:

A los miembros del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba por la formación académica recibida, los valores adquiridos y por el sentido de pertenencia y hermandad que pregonan.

Al Ingeniero Jairo Durango Padilla por haber brindado su conocimiento apoyo y comprensión para la realización de este proyecto.

A todos las personas que compartieron conmigo durante esta maravillosa etapa de la vida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
GENERAL.....	15
ESPECÍFICOS.....	15
1. REVISION LITERARIA	16
1.1. Combustibles de motores Diésel.....	16
1.1.1. Biodiesel.....	16
1.1.2. Antecedentes del Biodiesel	16
1.1.3. Propiedades del Biodiesel	17
1.1.4. Producción de Biodiesel.....	19
1.1.5. Ventajas y Desventajas.....	20
1.1.6. Biodiesel de Palma Africana.....	20
1.2. DIESEL.....	22
1.2.1. Propiedades del Diésel	22
1.3. Mezclas Biodiesel-Diésel	24
1.3.1. Legislación en Colombia.....	24
1.4. Ciclo Diésel.....	25
1.4.1. Motores Diésel	26
1.5. Análisis exergético.....	27
1.5.1. Calculo de la exergía	28
1.5.2. Balance Exergético.....	29
2. MATERIALES Y METODOS	30
2.1. Caracterización de las mezclas Biodiesel-Diésel en el simulador.....	30
2.1.1. Identificación de los principales compuestos constituyentes de los combustibles. 31	
2.1.1.1. Composición del Diésel.....	31
2.1.1.2. Composición del Biodiesel.....	31
2.1.2. Selección del paquete termodinámico.....	32
2.1.3. Elección de la mezcla con mejores propiedades.....	32
2.2. Simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.....	33

2.3.	Evaluación de las prestaciones mecánicas del motor Diésel operando con mezclas Biodiesel-Diésel.	36
2.3.1.	Programación las ecuaciones para el cálculo de los parámetros de operación de los motores Diésel.	36
2.3.2.	Obtención de las curvas de potencia del motor para cada mezcla.	38
2.4.	Análisis de segunda ley del ciclo Diésel para las Biodiesel- Diésel.....	38
2.4.1.	Cálculo de las exergías de cada línea de flujo	38
2.4.2.	Balance de exergía: cálculo de la exergía destruida y la eficiencia exergética. .	41
2.4.3.	Impacto de las RPMs sobre la exergía destruida y la eficiencia del motor.....	42
3.	RESULTADOS Y ANALISIS	43
3.1.	Caracterización de las mezclas Biodiesel-Diésel en el simulador	43
3.1.1.	Impacto de la mezcla sobre la densidad.	43
3.1.2.	Impacto de la mezcla sobre el poder calorífico.....	44
3.1.3.	Impacto de la mezcla sobre la viscosidad cinemática.	45
3.1.4.	Impacto de la mezcla sobre el índice de Cetano.	47
3.1.5.	Elección de la mezcla con mejores propiedades.	48
3.2.	Simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.....	49
3.2.1.	Validación del modelo de simulación del motor.....	51
3.3.	Evaluación de las prestaciones mecánicas del motor Diésel operando con mezclas Biodiesel-Diésel.	52
3.3.1.	Comportamiento del Diésel puro (B0) en el motor de combustión interna.	52
3.3.2.	Comportamiento de la mezcla B10 en el motor de combustión interna.	53
3.3.3.	Comportamiento de la mezcla B20 en el motor de combustión interna.	53
3.3.4.	Comportamiento de la mezcla B50 en el motor de combustión interna.	54
3.3.5.	Comportamiento de la mezcla B70 en el motor de combustión interna.	54
3.3.6.	Comportamiento del Biodiesel puro (B100) en el motor de combustión interna.	55
3.3.7.	Comparación de la potencia obtenida para cada mezcla.....	55
3.3.8.	Comparación del torque obtenido en el motor para cada mezcla.	58
3.3.9.	Evaluación de la mezcla óptima.....	62
3.4.	Análisis de segunda ley del ciclo Diésel para las Biodiesel- Diésel.....	62
3.4.1.	Influencia del porcentaje de Biodiesel y las RPMs sobre las eficiencias de primera y segunda ley.....	63
3.4.2.	Impacto del porcentaje de Biodiesel y las RPMs sobre la exergía destruida en el motor.	65
4.	CONCLUSIONES.....	68

5.	RECOMENDACIONES	70
	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	74
	ANEXO A: Resumen de la optimización multi-objetivo	74
	ANEXO B: Catálogo del motor de Diésel KOHLER KDI 2504M.....	78
	ANEXO C: Programación de las ecuaciones en el software Aspen HYSYS v.8.0.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del Biodiesel	17
Tabla 2. Principales ventajas y desventajas del Biodiesel.....	20
Tabla 3. Propiedades del Biodiesel de Palma Africana.....	22
Tabla 4. Propiedades del combustible Diésel.....	23
Tabla 5. Rango adecuado de propiedades calculadas.....	30
Tabla 6. Composición simplificada para el Diésel.....	31
Tabla 7. Composición del Biodiesel de aceite de Palma.....	32
Tabla 8. Especificaciones de para la optimización de múltiples respuestas.....	33
Tabla 9. Parámetros reales del motor KOHLER KDI 2504M.	34
Tabla 10. Modelo del ciclo Diésel incluido en la simulación	35
Tabla 11. Factor de exergía química del Diésel y el Biodiesel.	40
Tabla 12. Exergía química de los componentes en el estado de referencia.....	41
Tabla 13. Propiedades de las mezclas usadas.....	43
Tabla 14. Propiedades de la mezcla B69	49
Tabla 15. Elementos presentes en el modelo simulado en Aspen HYSYS.....	50
Tabla 16. Correlación entre las curvas para la potencia y el torque	52
Tabla 17. Parámetros de operación del motor funcionando con la mezcla B69.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Poder calorífico de combustibles líquidos y biocombustibles.	18
Figura 2. Producción mundial de Biodiesel.....	19
Figura 3. Ciclo Diésel.....	25
Figura 4. Diagrama P-V del Ciclo Diésel.....	25
Figura 5. Cámara de combustión de un motor Diésel	26
Figura 6. División energética.....	28
Figura 7. División exergética.....	28
Figura 8. Curva de potencia y torque del motor Kohler KDI 2504M	34
Figura 9. Esquema del ciclo Diésel	35
Figura 10. Diagrama del proceso global en el MCI	42
Figura 11. Modelo de simulación del motor Diésel en Aspen HYSYS.	50
Figura B 1. Catálogo del motor KOHLER KDI 2504M Pag1.	78
Figura B 2. Catálogo del motor KOHLER KDI 2504M Pag2.	79
Figura B 3. Catálogo de motor KOHLER KDI 2504M Pag3.	80
Figura C 1. Programación de las ecuaciones de los parámetros de funcionamiento del motor KOHLER 2504M	81
Figura C 2. Programación del cálculo de las exergías.....	82

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Densidad vs porcentaje de Biodiesel.....	44
Gráfico 2. Densidad vs porcentaje de Biodiesel obtenidos por Delgado, et al (Influencia del porcentaje de mezcla del aceite de higuera en la obtención de combustible alternativo para motores diesel, 2011).....	44
Gráfico 3. Comportamiento del poder calorífico respecto al porcentaje de Biodiesel.....	45
Gráfico 4. Comportamiento del poder calorífico respecto a el porcentaje de Biodiesel obtenido por Cuellar (Características del biodiesel de palma y las mezclas, 2010).....	45
Gráfico 5. Comportamiento de la viscosidad cinemática respecto al porcentaje de Biodiesel.....	46
Gráfico 6. Viscosidad cinemática vs fracción volumétrica de Biodiesel obtenido por Benjumea, et al. (Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional, 2006).....	47
Gráfico 7. Influencia del porcentaje de Biodiesel sobre el Índice de Cetano.....	47
Gráfico 8. Influencia del porcentaje de Biodiesel sobre el Número de Cetano encontrada por Cuellar (Características del biodiesel de palma y las mezclas, 2010).....	48
Gráfico 9. Función de deseabilidad optimizada	49
Gráfico 10. Comparación de la curva de potencia.....	51
Gráfico 11. Comparación de las curvas de torque.....	51
Gráfico 12. Curva de potencia para el combustible B0.....	52
Gráfico 13. Curva de potencia para la mezcla B10.....	53
Gráfico 14. Curva de potencia para la mezcla B20.....	53

Gráfico 15. Curva de potencia para la mezcla B50.....	54
Gráfico 16. Curva de potencia para la mezcla B70.....	54
Gráfico 17. Curva de potencia para el combustible B100.....	55
Gráfico 18. Potencia vs torque para cada mezcla evaluada.....	56
Gráfico 19. Comparativa de la potencia máxima en el motor para cada mezcla.	57
Gráfico 20. Potencia vs RPM obtenido por Piloto, et al. (2010).....	58
Gráfico 21. Comparación de la graficas de torque para todas las mezclas evaluadas vs RPM	58
Gráfico 22. Comparativa del torque máximo en el motor para cada mezcla.	59
Gráfico 23. Torque vs RPM obtenido por Piloto, et al. (2010).....	60
Gráfico 24. Emisiones de CO ₂ para cada mezcla.....	60
Gráfico 25. Emisiones de CO para cada mezcla.....	60
Gráfico 26. Emisiones promedio de HC.....	61
Gráfico 27. Curva de potencia para la mezcla B69	621
Gráfico 28. Eficiencia de primera y segunda ley para las mezclas (a). B0, (b). B10, (c). B20, (d). B50, (e). B70 y (f). B100	63
Gráfico 29. Eficiencia de segunda ley para todas las mezclas evaluadas vs RPM.....	64
Gráfico 30. Exergía destruida para cada mezcla vs RPM	65
Gráfico 31. Eficiencia energética y exergética del motor funcionando con la mezcla B69 vs RPM.....	66
Gráfico 32. Exergía destruida en el motor para la mezcla B69 vs RPM.....	67

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el rendimiento de Biocombustibles en este caso el Biodiesel generado de Palma Africana mezclado con Diésel en diferentes concentraciones empleados en un motor de combustión interna, para analizar la viabilidad que presenta el uso de este recurso como fuente de energía alternativa. Para tal propósito se caracterizaron las mezclas de distintas concentraciones y se introdujeron los parámetros en el programa de simulación ASPEN HYSYS v.8.0.

El fin de este trabajo está basado en describir cómo se comporta un motor en condiciones simuladas usando mezclas de Biodiesel-Diésel para poder identificar la mezcla más óptima en cuanto a potencia y rendimiento. Se caracterizaron las mezclas B0, B10, B20, B50 y B100 en el software de simulación usando para ello el modelo PRSV, obteniendo que todas las mezclas presentaron buenas propiedades respecto a la normativa que rige los combustibles para motores Diésel, luego se procedió a encontrar la mezcla más óptima encontrando que la mezcla más adecuada según las restricciones consideradas fue la B69, se simuló el motor de combustión interna de acuerdo a los parámetros de operación del motor KOHLER KDI 2504 M, por medio de un modelo simplificado compresor-reactor-turbina; este modelo se validó de acuerdo a las curvas de torque y potencia especificadas en el catálogo del motor obteniendo un gran nivel de ajuste combinado de aproximadamente el 95,8%.

Se realizaron las curvas de potencia del motor funcionando con cada una de las mezclas evaluadas obteniendo comportamientos parecidos a los encontrados en los estudios de referencia, encontrándose que la potencia y el torque disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de Biodiesel un valor máximo del 10% aproximadamente, donde se observó que las velocidades a las que se dan el torque máximo y la potencia máxima es la misma para

todas las mezclas evaluadas, también se evaluó la mezcla más óptima obtenida de en la optimización multi-objetivo en el modelo del motor simulado ratificando que esta mezcla (B69) por sus buenas propiedades garantiza un buen comportamiento en el motor de combustión interna.

ABSTRACT

The purpose of this project is evaluate the performance of biofuels, in this case the Biodiesel generated from Palm oil mixed with Diesel in differents concentrations used in an internal combustion engine in order to analyze the viability presented by the use of this resources as a source of alternative energy. For that aim were characterized the blends of different concentrations and the parameters were introduced in the simulation program Aspen HYSYS

The purpose of this study is base on describe how is the behavior of a engine in simulated conditions using blends of Biodiesel-Diesel to identify the optimal blend referring to mechanical engine performance analized. Initially were characterized blends B0, B10, B20, B50, Y B100 in the software of simulation using a model PRSV, getting that all the blends presented good properties respecting with the regulation of fuels to Diesel engines, then proceeded to find the most optimal blend through the multiples response optimization obtaning that the most appropriate blend according to the considered restrictions was the B69

Then, the internal combustion engine was simulated according to operation parameters of engine KOHLER KDI 2504 M, trough a simplified model compressor-reactor-turbina introducing in the simulator the equations governing the behavior of the operating parameter of a Diesel engine; this model is valid according to torque and power curves specified in the catalog of the engine getting a high level of combinated settings of approximately 95,8%

Subsequently were realized the power curves of the engine, working with each of the blends evaluated obtaining behaviors similars to those that were found in the references studies, finding that the power and torque decrease as increasing the percentage of Biodiesel a maximum value of 10% approximately where it was observed that the revolutions at which

the maximum torque is given and the maximum power is the same for all the evaluated blends and it was evaluated the maximum blend obtained of the multi-objective optimization in the model of the simulated engine validating this blend for its good properties guarantees a good behavior in the internal combustion engine .

INTRODUCCIÓN

La alta dependencia de los combustibles fósiles en cuanto a fuente de energía desde hace mucho tiempo ha creado la necesidad de orientar en otra dirección la búsqueda de nuevas alternativas energéticas que sean competitivas industrial y ambientalmente. Actualmente el impacto ambiental como consecuencia de la explotación y uso desmesurado de estos combustibles ha llegado a un punto crítico generando una problemática mundial, el proceso de combustión genera contaminación atmosférica, lluvias ácidas y emisiones de gases de efecto invernadero entre otros. (Clauss, et al., 2005) Además el hecho que sean recursos naturales no renovables conlleva a contemplar una inminente escasez y optar por otras fuentes energéticas como los biocombustibles obtenidos de biomasa. (Gustavsson, et al., 1995)

El Diésel fósil según estadísticas, está emitiendo en un automóvil aproximadamente 190 g de CO₂ (Dióxido de Carbono) por kilómetro recorrido. (Fontalvo, et al., 2014). Actualmente en Colombia según Ecopetrol el Diésel fósil usado presenta un contenido de Azufre de 50 ppm y comparado con Estados Unidos y Europa en los cuales es de 15 ppm.

El azufre es uno de los principales contaminantes presentes en ellos por lo cual la calidad del combustible depende de la reducción de las trazas de este contaminante. El Biodiesel es un combustible no sulfonado (sin azufre), por lo cual se mezcla con el Diésel para reducir las concentraciones de Azufre. (Ramírez D., 2012). Según Piloto et al. (2010) este beneficio trae consigo que a medida que aumenta la concentración de Biodiesel en los motores se observa una leve pérdida de potencia. Sería interesante analizar las prestaciones mecánicas de un motor Diésel usando mezclas Biodiesel-Diésel en diferentes concentraciones.

Para el estudio del efecto de las mezclas Biodiesel-Diésel en un motor de combustión interna se necesita un banco de pruebas el cual no se tiene en la Universidad de Córdoba. Si se tiene en cuenta que el Biodiesel puede causar averías en el motor puesto que puede llegar a actuar como solvente dañar empaques y sellos. (Cardona A., 2009).

Es recomendable realizar primero estudios previos de simulación donde se pueda realizar el análisis de las mezclas teniendo en cuenta parámetros reales de operación con el fin de tener validez en los resultados de tal forma que estos estudios justifiquen una futura adquisición de un banco de pruebas para un estudio más profundo.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar termodinámicamente la operación de un motor Diésel KOHLER KDI 2504M empleando mezclas Biodiesel-Diésel en ASPEN HYSYS.

ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterizar las mezclas Biodiesel-Diésel en el software de simulación con el fin de conocer el comportamiento fluido-energético de los combustibles.
- ❖ Simular el motor Diésel KOHLER KDI 2504M en el software ASPEN HYSYS de acuerdo con los parámetros reales (Cilindros, diámetro, carrera, relación de compresión, cilindrada, potencia, torque máximo, y torque mínimo)
- ❖ Evaluar las prestaciones mecánicas del motor Diésel operando con mezclas Biodiesel-Diésel como combustible.
- ❖ Realizar un análisis de segunda ley del ciclo Diésel con parámetros reales del motor para cada una de las mezclas Biodiesel- Diésel evaluadas.

1. REVISION LITERARIA

1.1. Combustibles de motores Diésel

La mayoría de combustibles utilizados en estos motores provienen del fraccionamiento de aceites pesados, por lo cual estos motores también suelen conocerse como “motores de aceite pesado” (Kates & Luck, 2003).

1.1.1. Biodiesel

“El Biodiesel es un combustible renovable compuesto por ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales”. (National Biodiesel Board, 2016).

Es un combustible amigable con el medio ambiente, está hecho de recursos renovables y tiene menores emisiones contaminantes en comparación con el Diésel de petróleo. Es menos tóxico que la sal de mesa (NaCl) y se biodegrada tan rápido como el azúcar. (Castro, et al., 2007). Su uso disminuye nuestra dependencia de los combustibles fósiles y puede ser mezclado con gasóleo procedente del refino de petróleo en diferentes cantidades. El contenido energético del Biodiesel es ligeramente menor que el del Diésel (12% en peso u 8% en volumen), y por lo tanto su uso implicará un consumo ligeramente mayor, así como ciertas pérdidas en potencia y torque. (Castro, et al., 2007)

1.1.2. Antecedentes del Biodiesel

La transesterificación de aceites vegetales fue una idea desarrollada por los científicos E. Duffy y J. Patrick, mucho antes de aparecer en marcha el primer motor Diésel. El Ingeniero Rudolf Diésel en el año 1885 desarrollaba un motor que llevo su nombre, para tal fecha ya surgía la idea de usar aceites vegetales como combustible para motores de combustión interna

(MCI). En el año de 1900 el Ingeniero ya usaría aceite de maní como combustible para su motor en la Exposición Mundial de París. Hacia 1912 afirmaría “*el uso de los aceites vegetales como combustibles para los motores puede parecer insignificante hoy en día, pero con el transcurso del tiempo puede ser tan importante como los derivados del petróleo y el carbón en la actualidad*” (Castro, et al., 2007)

1.1.3. Propiedades del Biodiesel

Tabla 1. Propiedades del Biodiesel

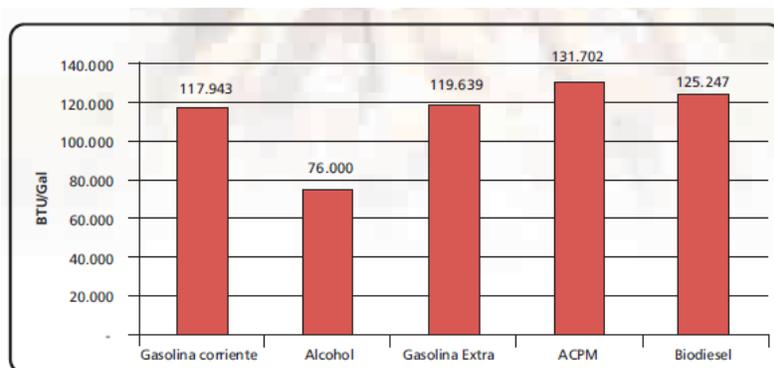
Parámetro	Unidad de medida	Norma Estadounidense (ASTM D6751-07)	Norma Europea (EN 14214)	Norma Colombiana (NTC 5444)
Densidad a 15°C	Kg/m ³	----- ----	860-900	860-900
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1,9-6,0	3,5-5,0	1,9-6,0
Número de centano	Cetanos	47 min	51 min	47 min

Fuente: (Castro, et al., 2007)

- I) Densidad:** La densidad de un combustible es frecuentemente expresada mediante la gravedad específica la cual se obtiene del cociente entre la densidad del combustible y la densidad del agua en condiciones normales.
- II) Viscosidad:** La viscosidad es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos. La viscosidad es la propiedad física que más efecto tiene en la operación de un motor, un combustible que posea una alta viscosidad puede provocar fallas en el sistema de alimentación además es posible que se formen residuos en la cámara de combustión, al igual que en los canales de alimentación y los filtros. (Corsini, et al., 2015)

- III) Número de Cetano:** Mide la calidad de ignición de un combustible, un alto Número de Cetano indica un menor retraso en la ignición, ayuda a un mejor arranque del motor y minimiza la emisión de humo. El Biodiesel tiene por su propia naturaleza un número de Cetano mayor al del Diésel. Aceites o grasas altamente saturadas tendrán un Numero de Cetano muy alto (70 o más); aceites poliinsaturados como soya, girasol, maíz, y colza tendrán un menor Número de Cetano (alrededor de 47); aceites de mayor longitud de cadena tendrán un Cetano mayor. (Castro, et al., 2007)
- IV) Índice de Cetano:** Indicador del Número de Cetano basado en un cálculo a partir de la gravedad específica y la curva de destilación del combustible. (Castro, et al., 2007)
- V) Poder calorífico:** El poder calorífico expresa la energía por unidad de masa que libera la unión química entre un combustible y el comburente. El poder calorífico del Biodiesel de Palma Africana es menor al del combustible Diésel por lo cual presenta una reducción de 6% a 7% en cuanto a la potencia transferida y al torque generado. (Cuellar & Augusto, 2007)

Figura 1. Poder calorífico de combustibles líquidos y biocombustibles.



Fuente: *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*

1.1.4. Producción de Biodiesel

La mayor parte del Biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semirrefinados, grasas animales, aceites vegetales crudos hasta aceites usados o residuales. El problema de procesar estas materias primas es que suelen tener gran cantidad de ácidos grasos libres e impurezas. (Castro, 2015). Los aceites vegetales al igual que las grasas animales están constituidas por moléculas (ésteres) de ácidos grasos y glicerol. El proceso de fabricación de Biodiesel más comúnmente usado y simple es el de transesterificación que consiste en remplazar el glicerol, que inicialmente es un alcohol trivalente por uno monovalente más ligero usualmente metanol o etanol, formando moléculas más pequeñas (esteres monoalquilícos) con una viscosidad similar a la del combustible Diésel derivado del petróleo. (Castro, et al., 2007)

Figura 2. Producción mundial de Biodiesel

	2014	2015
EU	11.800	10.800
U.S.A.	5.000	3.600
Brasil	3.000	3.600
Indonesia	2.700	1.800
Argentina	2.550	1.550
Tailandia	1.000	900
Malasia	650	800
Singapur	800	800
Colombia	540	520
Canada	300	300
Filipinas	100	120
Peru	10	10
Otros	800	700
TOTAL	29.250	25.500

Fuente: (Castro, 2015)

1.1.5. Ventajas y Desventajas

Tabla 2. Principales ventajas y desventajas del Biodiesel

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Reducción de la mayoría de emisiones contaminantes	Mayor viscosidad
Alta biodegradabilidad y baja toxicidad	Desempeño mecánico
Posible producción local	Emisiones de NO _x
Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles	Comportamiento a bajas temperaturas
Es un recurso renovable	Dilución del lubricante

Fuente: (Uparela, 2013)

1.1.6. Biodiesel de Palma Africana

Los biocombustibles producidos de Palma Africana pueden convertirse en una alternativa energética que ayude a reducir la dependencia del petróleo y disminuir el impacto ambiental por su baja emisión de gases contaminantes. En Colombia se estima que un vehículo que use Biodiesel producido a partir de palma africana genera aproximadamente una reducción del 50% en emisiones de gases de efecto invernadero (Fontalvo, et al., 2014)

El cultivo de la Palma Africana llegó a Colombia hace cerca de seis décadas, pero se ha consolidado a partir de 1980. El territorio nacional cuenta con un estimado de 483.733 hectáreas sembradas de Palma Africana distribuidas en 124 municipios de 20 departamentos. Colombia es el cuarto productor mundial de aceite de palma en el mundo, y participa con 1,4% del volumen mundial. Esta actividad es responsable de 6% del PIB agropecuario, (Fedepalma, 2016).

El aceite de Palma Africana es el más saturado de los aceites que se usan en la producción de Biodiesel en comparación con el aceite de soya, colsa y girasol. Entre mayor sea la concentración de ácidos grasos saturados menor serán las emisiones de NOx, principalmente cuando la concentración en la mezcla Biodiesel-Diésel es superior al 20%. (Cuellar & Augusto, 2007).

La adición de Biodiesel de Palma Africana al combustible Diésel solo disminuye en 2,5% el poder calorífico de la mezcla. El combustible Diésel al ser mezclado con Biodiesel de Palma Africana mejora algunas propiedades como la viscosidad, la lubricidad y el número de Cetano que incrementa proporcionalmente al porcentaje de Biodiesel en la mezcla. Las curvas de torque y potencia para un motor utilizando mezclas de combustibles Biodiesel-Diésel presentan un comportamiento similar a las de uno usando Diésel puro (Cuellar & Augusto, 2007)

En el año 2008 se inició la producción industrial de Biodiesel en Colombia y se contempló como materia prima la utilización de aceite de Palma Africana debido a los avances alcanzados en este sector y a la posición privilegiada que tiene el territorio Colombiano respecto a la producción de esta materia prima. El país es el principal productor de aceite de Palma en Latinoamérica y el quinto en el mundo. (UPME, 2009)

Tabla 3. Propiedades del Biodiesel de Palma Africana

Parámetro	Unidades	Valor
Densidad a 15°C	Kg/m^3	875
Viscosidad cinemática a 40°C	mm^2/s	4,49
Número de Cetano	Cetanos	68
Poder Calorífico	Mj/Kg	40

Fuente: (Cuellar & Augusto, 2007)

1.2. DIESEL

El petróleo es un hidrocarburo en estado líquido que básicamente está compuesto de Carbono (84%-87%), Hidrogeno (11%-14%), Azufre (0%-2%), y Nitrógeno (0-0,2%). El Diésel es un combustible derivado del petróleo que se obtiene mediante un proceso de refinación. Es el combustible usado en los motores Diésel que operan comúnmente en camiones, buses y en pequeñas plantas de generación eléctrica, también suele conocerse como ACPM (Aceite Combustible Para Motores). (ECOPETROL, 2014)

1.2.1. Propiedades del Diésel

I) Número de Cetano: En las gasolinas el octano mide la capacidad de ignición, en el Diésel esta capacidad esta medida por el número de Cetano. La escala de medición de esta propiedad está basada en la característica de ignición de dos hidrocarburos: el Cetano (n-Hexadecano) y el Metilnaftaleno ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_3$). El primero tiene un periodo corto de retardo en la ignición y se le asigna un Número de Cetano igual a 100. El segundo tiene un periodo largo de retardo en la ignición y se le asigna un Número de Cetano de cero. (Muñoz R., et al., 1999).

Los motores Diésel regularmente se diseñan para utilizar combustibles con números de Cetano entre 40 y 55. (Poma & Karim, 2004).

II) Viscosidad: Esta es una magnitud que caracteriza la fluidez del combustible. Se mide a 20°C para un fuel de utilización doméstica y entre el rango de 50 a 100 °C para los pesados. Se trata de un parámetro de particular importancia en el trasiego y pulverización, indicando cual es la resistencia al movimiento que opone el fluido (cuando este no se encuentra en estado pastoso). Debe ser bastante baja la atomización del combustible para la fácil pulverización en la cámara de combustión. (Torrela, 2014)

III) Densidad: La densidad es una prueba física fundamental que puede ser usada en conjunción con otras propiedades para caracterizar a los combustibles en productos ligeros y pesados. Su determinación es necesaria para la conversión de volúmenes medidos a volúmenes a la temperatura estándar de 15 °C; sin embargo, las variaciones en la densidad del combustible resultan en variaciones en la potencia del motor y, consecuentemente, en las emisiones y el consumo. Se ha encontrado, que la densidad influye en el tiempo de inyección de los equipos de inyección controlados mecánicamente. (Poma & Karim, 2004)

IV) Poder Calorífico: El aporte energético en un motor de combustión interna lo realiza el combustible, por lo cual es importante conocer la cantidad de energía que aporta la unidad de masa o de volumen cuando se efectúa el proceso de combustión. La forma habitual de representar esto es mediante el Poder Calorífico El combustible Diésel posee un Poder calorífico mayor al del Biodiesel. (Muñoz R., et al., 1999)

Tabla 4. Propiedades del combustible Diésel

Parámetro	Unidades	Valor
Densidad a 15°C	Kg/m^3	825-845
Viscosidad cinemática a 40°C	mm^2/s	1,9-5
Número de Cetano	Cetanos	48-51,5
Poder Calorífico	Mj/Kg	44

Fuente: (Muñoz R., et al., 1999)

1.3. Mezclas Biodiesel-Diésel

De acuerdo a la ASTM (American Society Testing Materials) es una mezcla de un combustible Diésel a base de petróleo con un biocombustible en este caso Biodiesel, esta mezcla esta designada como “BXX” donde “XX” representa el porcentaje en volumen del combustible Biodiesel en la mezcla; así por ejemplo una mezcla B10 indica que el 10% del volumen corresponde al combustible Biodiesel y el 90% restante corresponde al Diésel. (National Biodiesel Board, 2016)

1.3.1. Legislación en Colombia

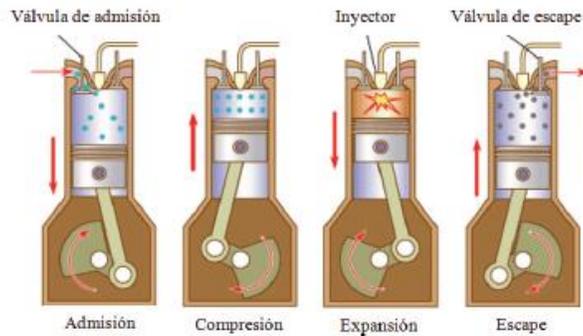
El Biodiesel puede ser usado puro (B100) o formando mezclas con Diésel. La aprobación de la Ley 693 de 2001 fue la apertura en Colombia de la nueva era mundial de los combustibles de origen vegetal, mediante la reglamentación de esta ley se buscó incentivar y estimular a la población para la producción, comercialización y uso de los biocombustibles. La ley 939 de 2004 amplió el espectro en el uso de los biocombustibles no solo de origen vegetal sino también de origen animal para uso en motores Diésel, esta nueva reglamentación de ley excluía a los biocombustibles de pago de impuestos, medida tomada para incentivar los proyectos de producción de Biodiesel. (UPME, 2009)

La resolución 18 2087 de 2007 emitida por el Ministerio de Minas y Energía en conjunto con el Ministerio de Ambiente establece en relación a la calidad del biocombustible para uso en motores, del Diésel y sus mezclas que a partir del año 2013 en Colombia se puede usar Biodiesel B10, cumpliendo con las normas internacionales.

1.4.Ciclo Diésel

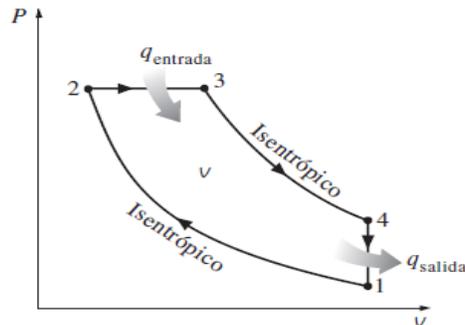
Es un ciclo termodinámico ideal para maquinas reciprocantes (cilindro-émbolo) de encendido por compresión que comprende 4 etapas, admisión, compresión, expansión y escape. (Cengel & Boles, 2011). El ciclo inicia cuando la válvula de admisión se abre para succionar el aire y llenar el cilindro. Luego, la válvula se cierra para llevar el pistón al punto muerto inferior. El pistón se eleva comprimiendo el aire para calentarlo hasta tener una temperatura de ignición. Seguidamente, se inyecta combustible el cual se inflama al contactar el aire caliente, debido a la expansión el pistón es impulsado hacia abajo. Por último, se abre la válvula de escape y el pistón se eleva expulsando los gases de combustión. (Heywood, 1988)

Figura 3. Ciclo Diésel



Fuente: (Perez S., et al., 2015)

Figura 4. Diagrama P-V del Ciclo Diésel



Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

1.4.1. Motores Diésel

El motor Diésel por primera vez fue propuesto por Rudolph Diésel en la década de 1890, es muy similar al motor de encendido por chispa, diferenciados únicamente por el método de inicio de la combustión. En estos motores el aire se comprime hasta llegar a una temperatura superior a la de autoencendido del combustible que luego se inyecta a la cámara de combustión, el contacto de aire caliente-combustible inicia la combustión. (Cengel & Boles, 2011)

Figura 5. Cámara de combustión de un motor Diésel



Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

Estos motores no presentan problemas de autoencendido como los de encendido por chispa, puesto que solo se comprime aire durante la carrera de compresión, esta característica brinda beneficios como la posibilidad de que puedan ser diseñados para operar en relaciones de compresión de 12 hasta 24; además pueden utilizar combustibles menos refinados que conllevan un menor costo. (Cengel & Boles, 2011)

Las eficiencias térmicas de los motores Diésel varían aproximadamente entre 35 y 40 por ciento; la alta eficiencia en relación al bajo costo de combustible los convierte en la opción más indicada para aplicaciones donde se requieran cantidades grandes de potencia. (Cengel & Boles, 2011)

El Biodiesel tiene un poder calorífico inferior al Diésel derivado del petróleo, esto como consecuencia trae consigo una disminución en la potencia transmitida, aunque esto se ve compensado con el hecho de que es un recurso renovable y amigable con el medio ambiente. (Piloto, et al., 2010).

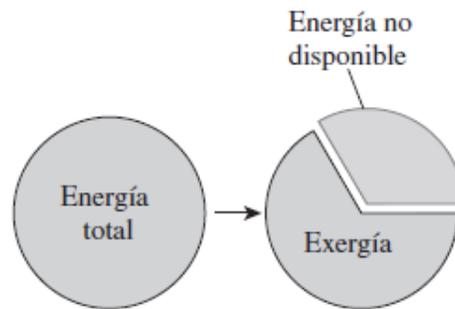
Estos motores pueden trabajar con combustible Biodiesel sin necesidad de realizar modificaciones debido a las propiedades que posee este Biocombustible las cuales son muy similares a las del Diésel. (Muñoz R., et al., 1999)

1.5. Análisis exergético

La exergía es una propiedad que permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado específico, es decir la cantidad de energía que se puede aprovechar como trabajo, la cantidad de energía desaprovechada que no puede convertirse en trabajo se conoce como energía no disponible (Cengel & Boles, 2011).

En un análisis exergético se especifica el estado inicial, un proceso y un estado final. Es un método que permite estudiar la eficiencia energética real de cualquier sistema, mediante la aplicación de las leyes termodinámicas, además permite calcular la magnitud de la destrucción de exergía en cada componente durante el proceso. (Molina, 2015)

Figura 6. División energética

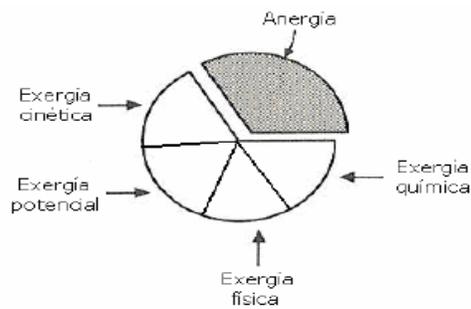


Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

1.5.1. Cálculo de la exergía

La exergía consta de cuatro componentes: exergía cinética, potencial, física y química. Las dos primeras coinciden totalmente con su energía puesto que pueden transformarse completamente en trabajo. (Jiménez & Andrés, 2007)

Figura 7. División exergética



Fuente: (Jiménez & Andrés, 2007)

La componente física y química se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$B = B_f + B_q \quad (1)$$

$$B = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + B_q \quad (2)$$

$$B_q = \sum \mu_i(N_i - N_0) \quad (3)$$

Donde H : Entalpía

S : Entropía

N_i : Número de moles de componente química

μ_i : Potencial químico (Jiménez & Andrés, 2007)

1.5.2. Balance Exergético

El balance exergético es la combinación del balance de energía y de entropía, que se deriva de la primera y segunda ley termodinámica; en el balance exergético se debe tener en cuenta que la exergía no posee la misma propiedad de conservación sino que dependiendo del proceso la energía se puede crear o destruir, es por ello que debido a dicha propiedad deben existir unas pérdidas asociadas a los procesos. (Jiménez & Andrés, 2007)

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Caracterización de las mezclas Biodiesel-Diésel en el simulador

Por medio del simulador se predijeron las propiedades de las mezclas que inciden en el funcionamiento de un motor de combustión interna, las propiedades consideradas fueron:

- Poder calorífico.
- Viscosidad cinemática a 40 °C (Según la norma ASTM D 445).
- Densidad a 15 °C (Según la norma ASTM D4052).
- Índice de Cetano según la norma ASTM D4737.

Las mezclas evaluadas son: B0, B10, B20, B50, B70 y B100.

Además se compararon los resultados según los estándares para combustibles de motores Diésel que se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla 5. Rango adecuado de propiedades calculadas.

Propiedad	Rango	Norma
Poder calorífico [MJ/kg]	>39	ASTM D240
Viscosidad cinemática 40 °C [cSt]	1,9 – 6	ASTM D 445
Densidad a 15 °C [kg/m ³]	810 – 900	ASTM D4052
Índice de Cetano	>47	ASTM D613

2.1.1. Identificación de los principales compuestos constituyentes de los combustibles.

2.1.1.1. Composición del Diésel.

La composición del Diésel se aproximó de acuerdo con el Número de Cetano, considerando que este número indica el porcentaje de volumen de Hexadecano (con Número de Cetano de 100) y el volumen restante es ocupado por el α – metil – naftaleno (con Número de Cetano de 0) esta es una composición simplificada que permite el modelamiento aproximado del Diésel que posee en la realidad una composición muy compleja y variante dependiendo de las características del petróleo con el que se extrajo y a el proceso de extracción. (Wuithier, 1973).

Para el caso del Diésel colombiano según Ecopetrol tiene un Número de Cetano promedio de 51 así se consideró que la siguiente composición simplificada para el Diésel:

Tabla 6. Composición simplificada para el Diésel

Componente	% volumen
Hexadecano	51%
α – metil – naftaleno	49%

2.1.1.2. Composición del Biodiesel.

Para el caso de la composición del Biodiesel se consideró Biodiesel de aceite de Palma de origen metílico por tanto sabemos que está compuesto de varios esterés metílicos de ácidos grasos; de la literatura se obtuvo la composición que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Composición del Biodiesel de aceite de Palma.

Compuesto	%peso
M-Palmitato	52,84%
M-Linoleato	7,84%
M-Oleato	37,54%

Fuente: (Sierra & Casas, 2011)

2.1.2. Selección del paquete termodinámico.

El paquete termodinámico seleccionado fue PRSV (Peng-Robinson-Stryjek-Vera) debido a que este modelo predice adecuadamente las propiedades de hidrocarburos apolares en un rango amplio de condiciones logrando así predecir las propiedades consideradas para cada una de las mezclas Biodiesel-Diésel.

2.1.3. Elección de la mezcla con mejores propiedades.

La optimización de múltiples respuestas realizada en Design expert v.6.0.8 (versión de prueba) permitió obtener la mezcla con mejores propiedades para lo que fue necesario definir la importancia de cada variable de salida y el requerimiento los cuales se establecieron según se muestra a continuación.

Tabla 8. Especificaciones de para la optimización de múltiples respuestas.

Propiedad	Especificación	Requerimiento	Importancia
%Diésel	Entrada	Minimizar	++++
%Biodiesel	Entrada	Maximizar	++++
Densidad	Salida	De 840 a 900 kg/m ³	+++
LHV	Salida	Maximizar	+++++
Viscosidad	Salida	Minimizar	+++
Cetanos	Salida	Maximizar	+++++

Las especificaciones de la tabla anterior se establecieron de acuerdo a los resultados obtenidos de las propiedades de las mezclas evaluadas previamente y además teniendo en cuenta los requerimientos técnicos y la normatividad existente.

2.2. Simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.

Para la simulación del motor inicialmente se consideraron los parámetros reales de operación del motor que son necesarios para la simulación en Aspen HYSYS, para ello del catálogo del fabricante del motor se obtuvo la siguiente información:

Tabla 9. Parámetros reales del motor KOHLER KDI 2504M.

Parámetros	Valor
Cilindros	4
Diámetro(mm)	88
Carrera(mm)	102
Relación de compresión	20,7
Cilindrada(cm ³)	2482
Potencia Max(KW)	36,4
Par Max(N-m)	170
Par min(N-m)	110

La figura de a continuación muestra la curva de potencia del motor seleccionado, obtenida de la ficha técnica del fabricante.

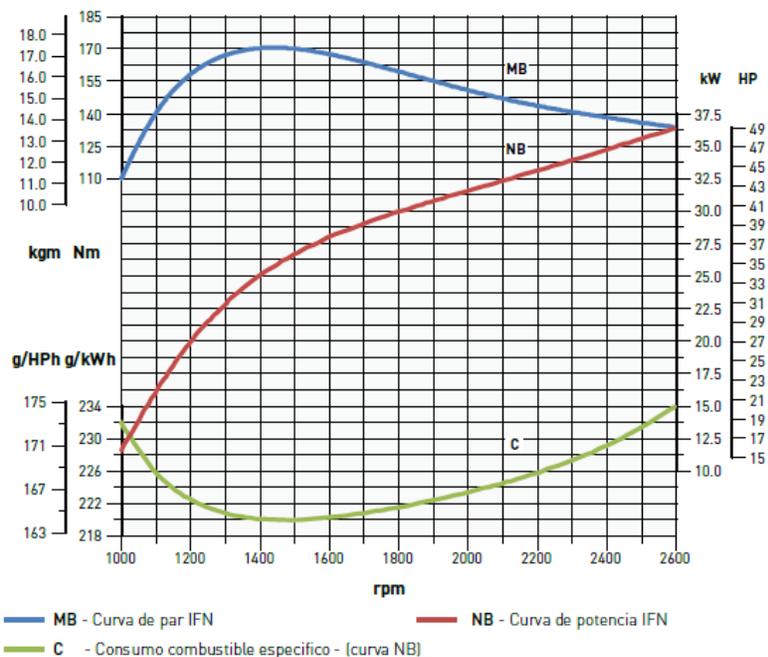


Figura 8. Curva de potencia y torque del motor Kohler KDI 2504M

Posteriormente se simuló el motor con sus parámetros reales de operación por medio de un modelo simplificado que sustituye los elementos reales del motor por elementos que sigan el mismo proceso termodinámico.

Para el ciclo Diésel en el modelado y posterior simulación el motor está integrado por:

- Un compresor que describe la compresión del aire en el motor.
- Un reactor que define la combustión de la mezcla.
- Una turbina que describe la expansión de los gases producto de la combustión.

En la figura 9 se observa el diagrama P-v del ciclo Diésel.

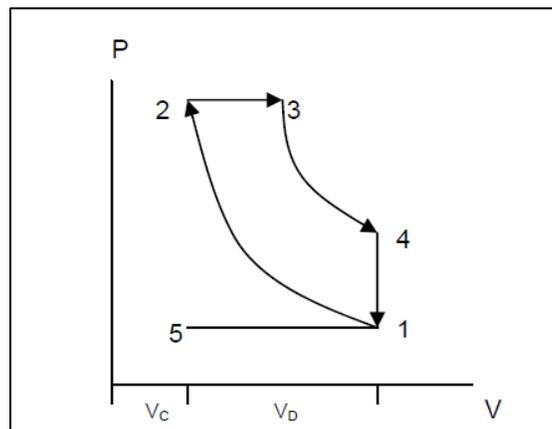


Figura 9. Esquema del ciclo Diésel

La tabla a continuación contrasta los procesos ilustrados en la figura anterior con los elementos que se consideraron en el modelo de simulación.

Tabla 10. Modelo del ciclo Diésel incluido en la simulación

Segmento	Proceso	Elemento simulación
1-2	Compresión isentrópica	Compresor
2-3	Combustión a P Cte.	Reactor de Gibbs
3-4	Expansión isentrópica	Turbina
4-1	Cesión de calor a V cte.	Salida de la turbina

2.3. Evaluación de las prestaciones mecánicas del motor Diésel operando con mezclas Biodiesel-Diésel.

2.3.1. Programación las ecuaciones para el cálculo de los parámetros de operación de los motores Diésel.

Para considerar los efectos de los parámetros reales de operación en la simulación del motor fue necesario la programación de las ecuaciones que se ven influenciadas por estos parámetros. La relación de compresión se introdujo en el simulador como un multiplicador de la presión de entrada al compresor por medio de un SET.

El flujo de aire que entra al motor depende de la cilindrada y de las RPM del motor de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_{aire} = \frac{1}{2} * \frac{cc}{100^3} * \frac{RPM}{60} * \frac{P_i}{R * T_i} \quad (4)$$

Donde:

cc: es la cilindrada en centímetros cúbicos.

RPM: son las revoluciones por minuto del motor.

Pi: es la presión de admisión del aire.

R: constante particular del aire.

Ti: es la temperatura de admisión.

A su vez este flujo másico está relacionado con la potencia producida en el motor por medio de la siguiente ecuación.

$$\dot{W} = \eta_n * \frac{\dot{m}_{aire}}{AC} * LHV_{combustible} \quad (5)$$

Donde:

η_n : es la eficiencia neta (producto de la eficiencia térmica y la eficiencia volumétrica).

AC: la relación aire combustible de la mezcla.

$LHV_{combustible}$: es el poder calorífico inferior del combustible.

La eficiencia neta depende de las RPMs y de las propiedades de del combustible; para este caso se despreciaron los efectos de las propiedades del combustible (consideración del modelo de Euler simplificado), obteniendo una parametrización para esta eficiencia como función solo de las RPMs, con la ayuda de la curva de potencia característica del motor, obtenida de la ficha técnica del fabricante, dicha parametrización es introducida posteriormente en el simulador para poder calcular la potencia del motor y luego con esta es posible calcular el torque por medio de la siguiente ecuación.

$$\dot{W} = \vec{T} * \frac{\pi * RPM}{30} \quad (6)$$

Donde \vec{T} es el torque del motor.

Además la potencia del motor se calcula en el simulador como la diferencia entre la potencia producida en la turbina y la consumida en el compresor, así

$$\dot{W} = \dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{compresor} \quad (7)$$

Para la eficiencia del motor se introduce al simulador la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{combustible} * LHV_{combustible}} \quad (8)$$

Donde:

$\dot{m}_{combustible}$: Flujo másico del combustible.

2.3.2. Obtención de las curvas de potencia del motor para cada mezcla.

Se realizó un análisis de sensibilidad tomando como variables de salida potencia y el torque para cada mezcla, con las RPMs como variable de entrada, las cuales se variaron en el rango de 1000 a 2600 RPM que es el rango admitido por el motor, adicional a esto se realizaron comparaciones entre los resultados de cada mezcla, con el fin de conocer la influencia del porcentaje de Biodiesel sobre las prestaciones del motor.

2.3.3. Análisis de emisiones para cada mezcla.

Se calcularon las emisiones de CO, CO₂ y HC en términos de la potencia producida en el motor para cada mezcla, esto se realizó con el fin de establecer si la pérdida de potencia en el motor estaba justificada por la reducción de la carga contaminante de los gases de escape; para ello se utilizó un factor que representa los kilogramos de contaminante por unidad de potencia producida.

2.4. Análisis de segunda ley del ciclo Diésel para las Biodiesel- Diésel.

2.4.1. Cálculo de las exergías de cada línea de flujo

Usando la herramienta Spreadsheet de Aspen HYSYS que permite la programación de ecuaciones, se calculan las exergías totales en cada línea de flujo de materia o energía, teniendo en cuenta que esta es la adición de las exergías química y física. En el cálculo se consideró como estado de referencia 25 °C de temperatura y 100 kPa de presión; la exergía física de los flujos de materia fue calculada por medio de la ecuación:

$$b^{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (9)$$

Donde:

b^{ph} : Exergía física específica del flujo de materia.

h : Entalpía específica del flujo de materia.

h_0 : Entalpía específica en condiciones de referencia.

T_0 : Temperatura de referencia.

s : Entropía específica del flujo de materia.

s_0 : Entropía específica en condiciones de referencia.

Para el caso de la exergías se utilizaron las ecuaciones que se muestran a continuación:

- Para un flujo de calor:

$$B^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q \quad (10)$$

Donde:

B^Q : Exergía de flujo del calor.

T : Temperatura a la que se transfiere el calor.

Q : Flujo de calor.

- Para el caso de flujo de trabajo o cualquier otra manifestación de energía mecánica se tiene que la exergía es igual a la energía y/o trabajo.

Para el cálculo de la exergía química se utilizaron las siguientes ecuaciones con base al método propuesto por Morris & Szargut (1986)

- **Para las mezclas Biodiesel-Diésel:**

$$b_{mezcla}^{ch} = \phi_{mezcla} * LHV_{mezcla} \quad (11)$$

Donde:

b_{mezcla}^{ch} : Exergía química de la mezcla Biodiesel-Diésel.

ϕ_{mezcla} : Factor de exergía química para la mezcla Biodiesel-Diésel.

LHV_{mezcla} : Poder calorífico inferior de la mezcla Biodiesel-Diésel.

Para el cálculo del factor de exergía química de cada mezcla se utilizó la siguiente ecuación:

$$\phi_{mezcla} = y_{diésel} * \phi_{diésel} + y_{biodiesel} * \phi_{biodiesel} \quad (12)$$

Donde:

$y_{diésel}$: Fracción másica de Diésel en la mezcla.

$\phi_{diésel}$: Factor de exergía química del Diésel.

$y_{biodiésel}$: Fracción másica de Biodiesel en la mezcla.

$\phi_{biodiésel}$: Factor de exergía química del Biodiesel.

La tabla 11 muestra los factores de exergía química para el Diésel y el Biodiesel que se ingresaron al simulador:

Tabla 11. Factor de exergía química del Diésel y el Biodiesel.

Sustancia	Factor de exergía química
Diésel	1,07
Biodiesel	1,052

Fuente: (Agudelo, et al., 2006)

- **Para los gases de escape:**

$$b_{sustancia}^{ch} = \sum_i x_i b_{i0}^{ch} + \bar{R}T_0 \sum_i x_i \ln(x_i) \quad (13)$$

Donde:

$b_{sustancia}^{ch}$: Exergía química específica de la sustancia.

x_i : Fracción molar del componente i.

b_{i0}^{ch} : Exergía química del componente i en el estado de referencia.

\bar{R} : Constante universal de los gases (8,31447 kJ/kmol-K).

La Tabla 12 muestra las exergía química en condiciones de referencia utilizadas para el cálculo de la exergía en cada línea del motor.

Tabla 12. Exergía química de los componentes en el estado de referencia.

Componente	$b_{i0}^{ch} [kJ/kmol]$
N_2	668
O_2	3970
$H_2O(g)$	9500
CO	275100
CO_2	19870

Fuente: (Morris & Szargut, 1986).

2.4.2. Balance de exergía: cálculo de la exergía destruida y la eficiencia exergética.

El balance de exergía en el motor permitió el cálculo de la exergía destruida, para ello se despreció la exergía contenida en el aire que entra al motor ya que este es un componente atmosférico que entra en condiciones de referencia, por lo que la única entrada al motor fue la línea de combustible y como salidas se tuvo la línea de trabajo y la línea de salida de gases de escape, el diagrama de la figura 10 ilustra lo antes descrito.

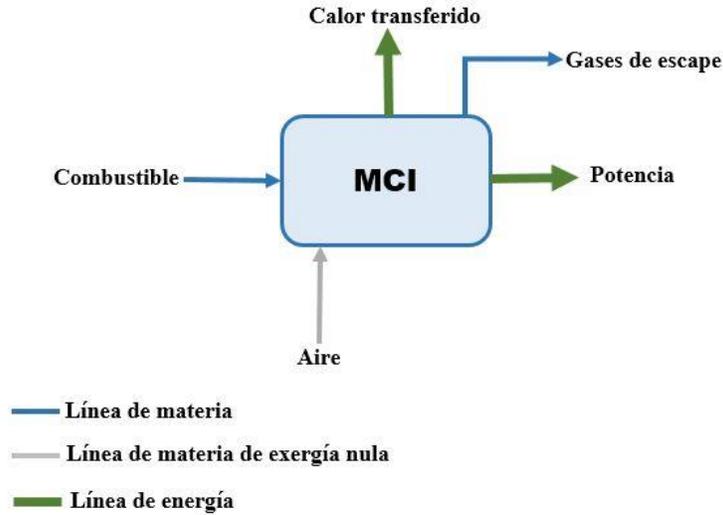


Figura 10. Diagrama del proceso global en el MCI

De acuerdo al diagrama anterior el balance de exergías sería:

$$\dot{m}_{combustible} * b_{combustible} = \dot{m}_{gases} * b_{gases} + B^Q + B^W + B_d \quad (14)$$

Donde B_d es la exergía destruida y puede ser calculada de la ecuación anterior.

Finalmente, se determina la eficiencia exergética del motor a través de la ecuación siguiente, que establece una relación entre la potencia neta del motor y el contenido total de exergía del combustible.

$$\eta_2 = \frac{W}{\dot{m}_{combustible} * b_{combustible}} \quad (15)$$

2.4.3. Impacto de las RPMs sobre la exergía destruida y la eficiencia del motor.

Se realizó un análisis de sensibilidad con las RPMs variando en el rango antes indicado tomando como variables de salida la exergía destruida en el motor y las eficiencias de primera y segunda ley; este proceso se hizo para cada una de las mezclas evaluadas para así poder establecer comparaciones entre ellas.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1. Caracterización de las mezclas Biodiesel-Diésel en el simulador

Las propiedades de las mezclas Biodiesel-Diésel calculadas por medio de Aspen HYSYS se muestran a continuación en la tabla 13.

Tabla 13. Propiedades de las mezclas usadas

Mezcla	Densidad [Kg/m³]	Poder calorífico [MJ/Kg]	Viscosidad cinemática a 40°C[cSt]	Índice de Cetano
B0	810,1	42,28	2,988	50,12
B10	818,9	42,04	2,984	50,78
B20	827,1	41,63	2,984	50,52
B50	849,3	40,61	3,001	50,81
B70	862,4	40,05	3,02	51,31
B100	880,1	39,33	3,052	50,59

En los resultados anteriores se evidencia que cualquier mezcla considerada de Biodiesel de aceite de Palma y Diésel cumplen los requisitos normativos citados en la tabla 5 por lo que se corrobora que el Biodiesel de aceite de palma posee buenas características para ser implementado en motores Diésel.

3.1.1. Impacto de la mezcla sobre la densidad.

En el grafico 1 se evidencia que a medida que aumenta al porcentaje de Biodiesel de la mezcla también aumenta la densidad; este resultado es de esperarse debido a que el Biodiesel es más denso que el Diésel fósil (Cuellar, 2010).

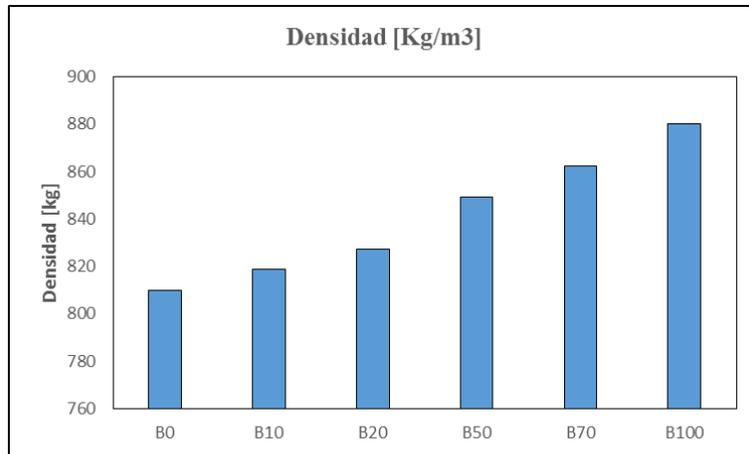


Gráfico 1. Densidad vs porcentaje de Biodiesel.

Los resultados antes ilustrados concuerdan con los de Delgado, et al (2011) para Biodiesel de aceite de higuera teniendo la densidad igual tendencia casi lineal al aumento respecto al porcentaje de Biodiesel, como se muestra en el grafico siguiente.

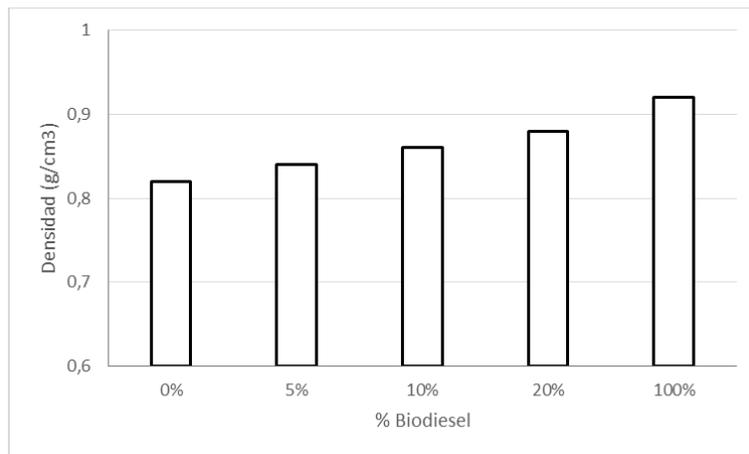


Gráfico 2. Densidad vs porcentaje de Biodiesel obtenidos por Delgado, et al (2011)

3.1.2. Impacto de la mezcla sobre el poder calorífico.

En cuanto a los resultados para el poder calorífico de las mezclas Biodiesel-Diésel en el grafico 3 se puede observar que este disminuye a medida que la fracción de Biodiesel en la mezcla aumenta.

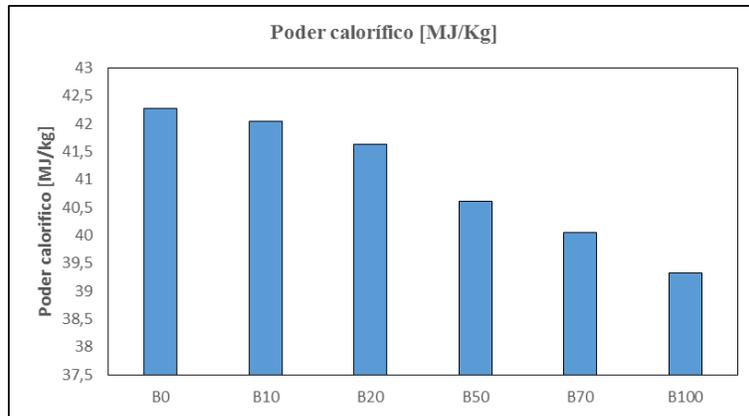


Gráfico 3. Comportamiento del poder calorífico respecto al porcentaje de Biodiesel

Este comportamiento había sido registrado anteriormente en la literatura por varios autores entre ellos Cuellar (2010) que registró el mismo comportamiento con mezclas hasta del 30% de Biodiesel, como se observa en el grafico 4.

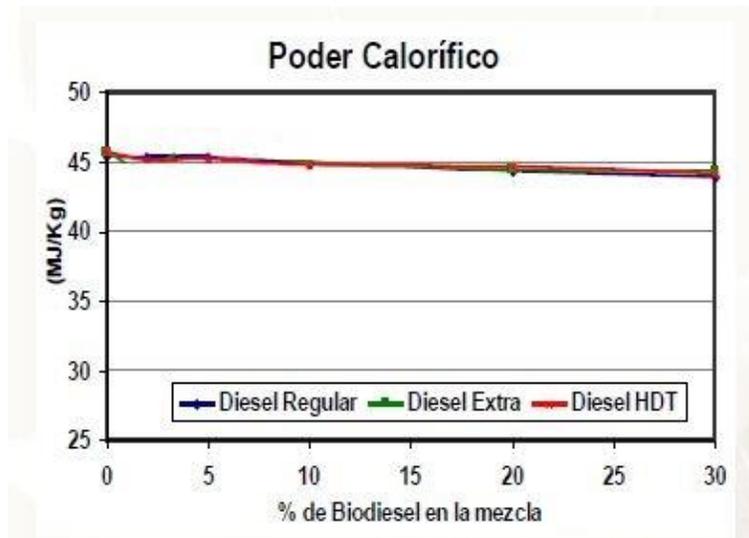


Gráfico 4. Comportamiento del poder calorífico respecto a el porcentaje de Biodiesel obtenido por Cuellar (2010)

3.1.3. Impacto de la mezcla sobre la viscosidad cinemática.

La norma ASTM D 445 especifica que la viscosidad de combustibles para motores Diésel se debe medir a 40 °C, con este valor de temperatura se calculó la viscosidad para cada mezcla

notando que esta presenta un comportamiento aproximadamente parabólico teniendo un valor mínimo entre las mezclas B10 y B20.

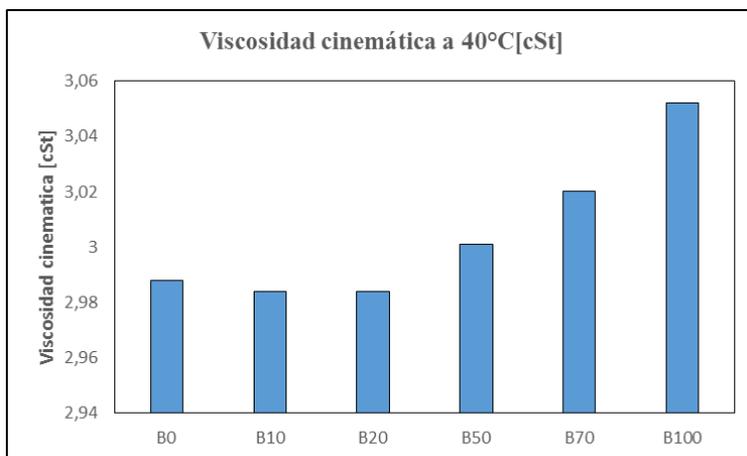


Gráfico 5. Comportamiento de la viscosidad cinemática respecto al porcentaje de Biodiesel.

En el estudio de Benjumea, et al. (2006). Se registró un comportamiento de la viscosidad respecto a la fracción de volumen de la mezcla muy parecida a la anterior, con la salvedad que esta obtuvo valores más altos de la viscosidad cinemática lo cual pudo ser generado por la existencia de trazas de aceite y glicerina sin reaccionar en el combustible. Los resultados de este estudio se muestran en el gráfico 6.

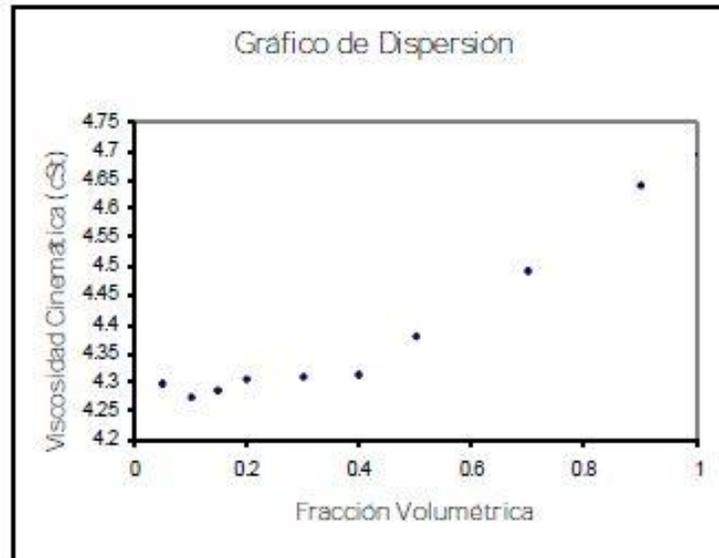


Gráfico 6. Viscosidad cinemática vs fracción volumétrica de Biodiesel obtenido por Benjumea, et al. (2006)

3.1.4. Impacto de la mezcla sobre el índice de Cetano.

Para el caso del efecto del índice de Cetano respecto a la fracción de Biodiesel en la mezcla se obtuvieron valores alternantes sin una tendencia marcada como se muestra en el grafico 7, esto se aduce a la interacción química entre los componentes del Diésel y los del Biodiesel dicha interacción debe ser más fuerte para algunas mezclas que para las otras (Cardona & Orrego, 2009).

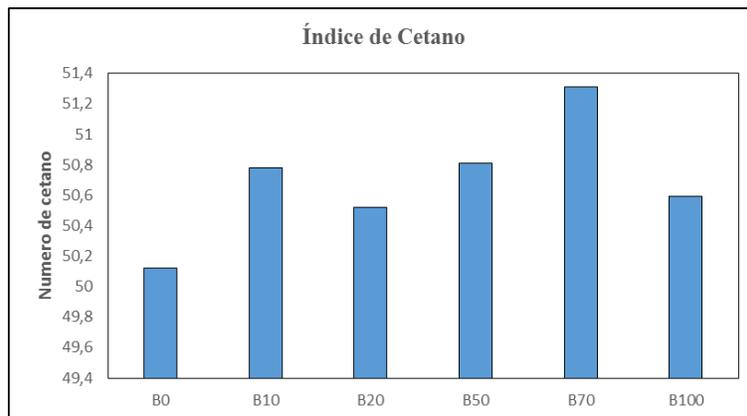


Gráfico 7. Influencia del porcentaje de Biodiesel sobre el Índice de Cetano

Este comportamiento también fue encontrado por Cuellar (2010) para mezclas de Biodiesel de aceite de palma con Diésel regular y con porcentajes de Biodiesel menores al 30% como se muestra en el grafico 8 a continuación.

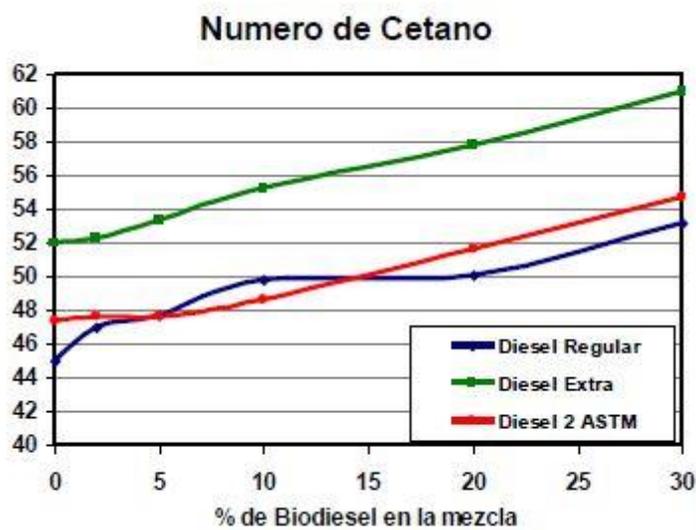


Gráfico 8. Influencia del porcentaje de Biodiesel sobre el Número de Cetano encontrada por Cuellar (2010)

3.1.5. Elección de la mezcla con mejores propiedades.

Para la optimización de múltiples respuestas realizada en Design Expert se obtuvo que la mezcla óptima contenía 69% de Biodiesel es decir una mezcla B69 según las especificaciones y restricciones del modelo de optimización. La tabla 14 muestra los valores de las propiedades del combustible para la mezcla más óptima.

Tabla 14. Propiedades de la mezcla B69

Propiedad	Valor
%Diesel	31%
%Biodiesel	69%
Densidad (kg/m ³)	861,806
LHV (MJ/kg)	40,0748
Viscosidad (cSt)	3,01902
Cetano	51,295
Desirability	0,57

El grafico 9 muestra el comportamiento de la función de deseabilidad planteada indicando además el punto óptimo.

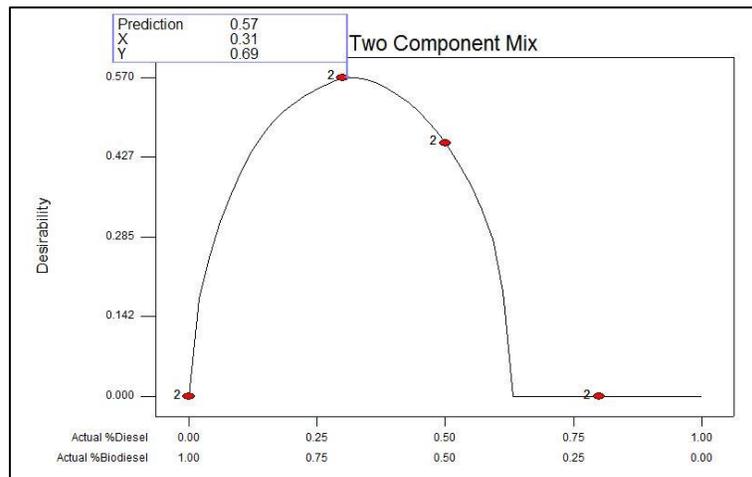


Gráfico 9. Función de deseabilidad optimizada

3.2. Simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.

En la figura 11 se detalla el modelo completo simulado en el software Aspen HYSYS v. Las líneas de color azul representan los flujos de materia y las de color marrón los flujos de energía, cabe además resaltar que el software simula es el proceso que se sigue en cada etapa del ciclo Diésel y no los elementos reales del motor. Los parámetros de operación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M se ingresaron al modelo, además se consideró que el aire y el combustible entran al motor en condiciones ambientales.

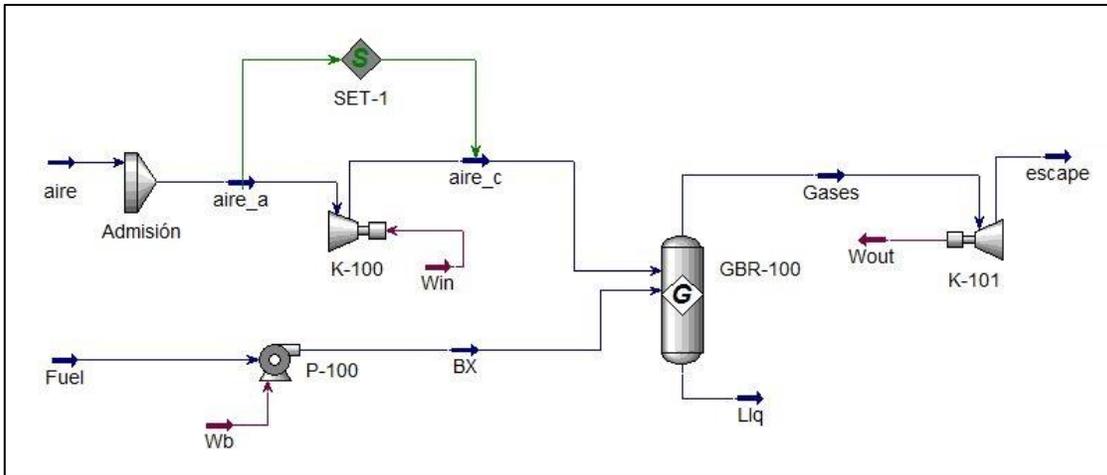


Figura 11. Modelo de simulación del motor Diésel en Aspen HYSYS.

A continuación en la tabla 15 se detallan los elementos presentes en este modelo.

Tabla 15. Elementos presentes en el modelo simulado en Aspen HYSYS

Elemento	Materia	Energía	Equipo	Especificación
Aire	X			Aire ambiente
Admisión			X	Admisión de aire en el motor
aire_a	X			Aire admitido
SET-1			X	Control de relación de compresión
K-100			X	Compresión de aire
Win		X		Trabajo de entrada en la compresión
aire_c	X			Aire comprimido
Fuel	X			Línea de combustible
P-100			X	Bomba de combustible
Wb		X		Trabajo de entrada en la bomba
BX	X			Combustible bombeado
GBR-100			X	Cámara de combustión
Liq	X			Purga de cámara de combustión
Gases		X		Gases de combustión
K-101			X	Expansión de gases
Wout		X		Trabajo extraído en la expansión
Escape	X			Gases de escape del motor

3.2.1. Validación del modelo de simulación del motor.

Para la validación del modelo se comparó las curvas de potencia y torque obtenidas en el simulador con las especificadas en el catálogo del fabricante para el Diésel fósil.

En la grafico 10 se muestra la comparación de las curvas de potencia.

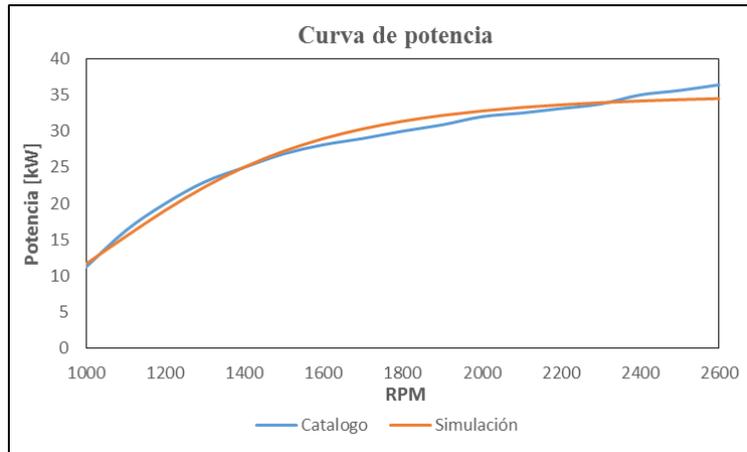


Gráfico 10. Comparación de la curva de potencia.

A continuación el grafico 11 muestra la comparación entre las curvas de torque.

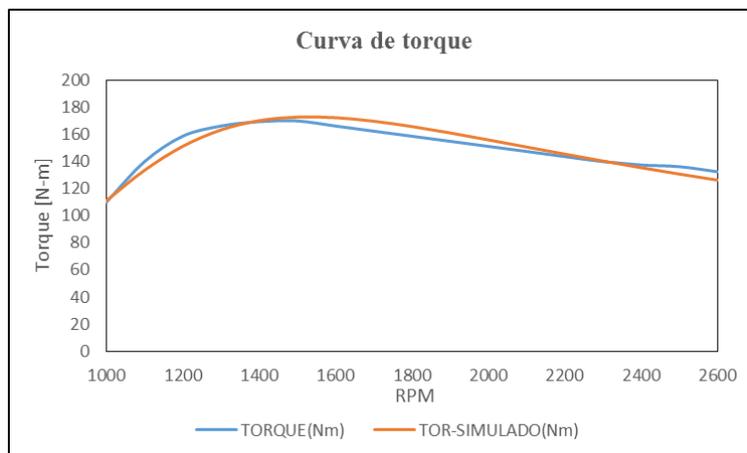


Gráfico 11. Comparación de las curvas de torque.

Gráficamente se nota que para ambas curvas existe gran coincidencia entre las variables especificadas en el catálogo con las que se obtuvieron en el simulador; para realizar una

comparación cuantitativa se calculó el coeficiente de correlación para ambos casos y los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Correlación entre las curvas para la potencia y el torque

Variable	Coefficiente de correlación
Potencia	99,04%
Torque	96,75%

3.3. Evaluación de las prestaciones mecánicas del motor Diésel operando con mezclas Biodiesel-Diésel.

3.3.1. Comportamiento del Diésel puro (B0) en el motor de combustión interna.

En el grafico 12 se muestra el comportamiento que se obtuvo para la curva de potencia del combustible B0 en el modelo de simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.

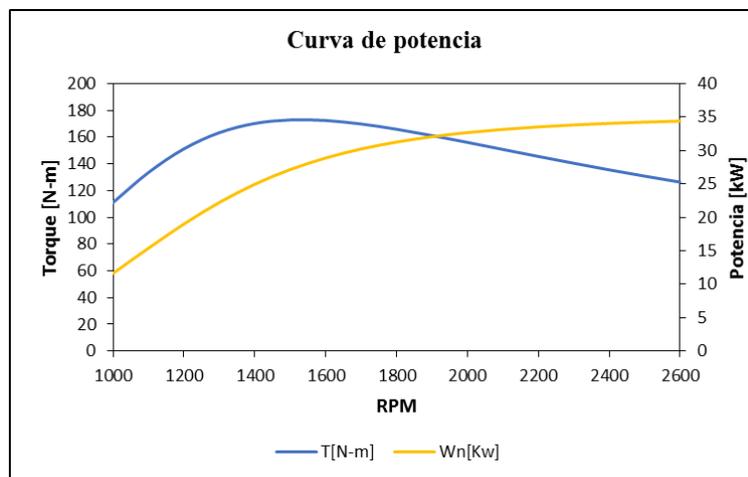


Gráfico 12. Curva de potencia para el combustible B0.

3.3.2. Comportamiento de la mezcla B10 en el motor de combustión interna.

En el gráfico 13 se muestra el resultado de la evaluación del comportamiento de la curva de potencia de la mezcla B10 en el modelo de simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.

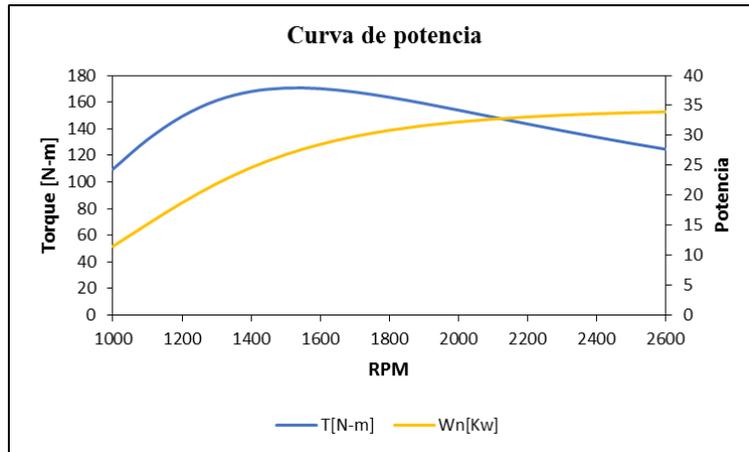


Gráfico 13. Curva de potencia para la mezcla B10.

3.3.3. Comportamiento de la mezcla B20 en el motor de combustión interna.

La curva de potencia obtenida para la mezcla B20 en el modelo de simulación del motor Diésel se muestra en el gráfico 14.

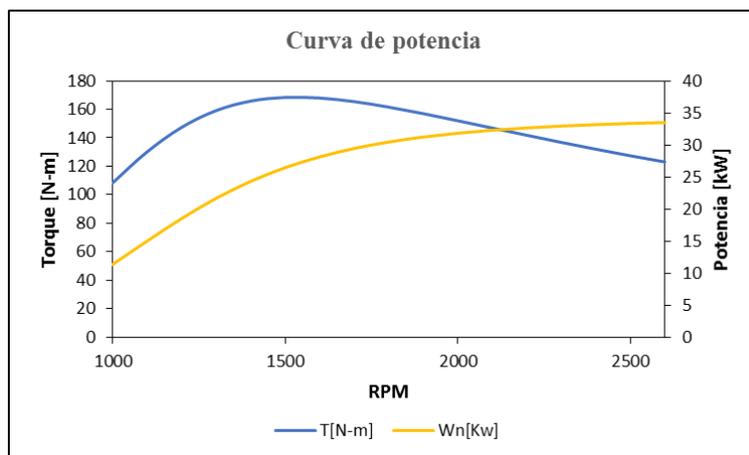


Gráfico 14. Curva de potencia para la mezcla B20.

3.3.4. Comportamiento de la mezcla B50 en el motor de combustión interna.

En el gráfico 15 se muestra el comportamiento para la curva de potencia de la mezcla B50 obtenida en el modelo de simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M.

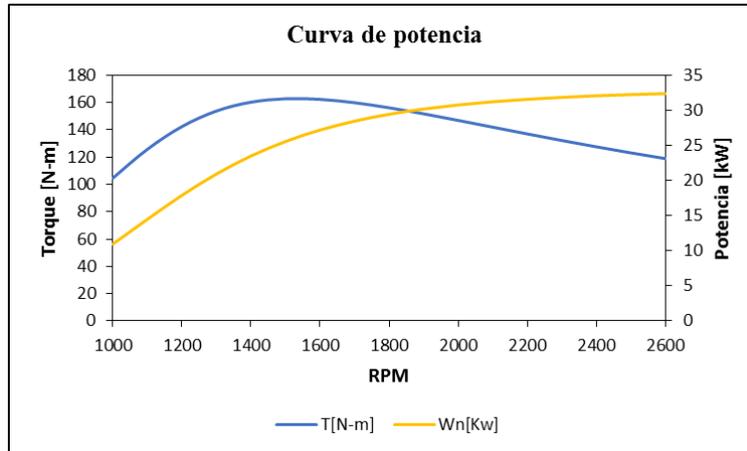


Gráfico 15. Curva de potencia para la mezcla B50.

3.3.5. Comportamiento de la mezcla B70 en el motor de combustión interna.

El siguiente gráfico muestra el resultado de la curva de potencia del motor Diésel KOHLER KDI 2504M funcionando con la mezcla B70.

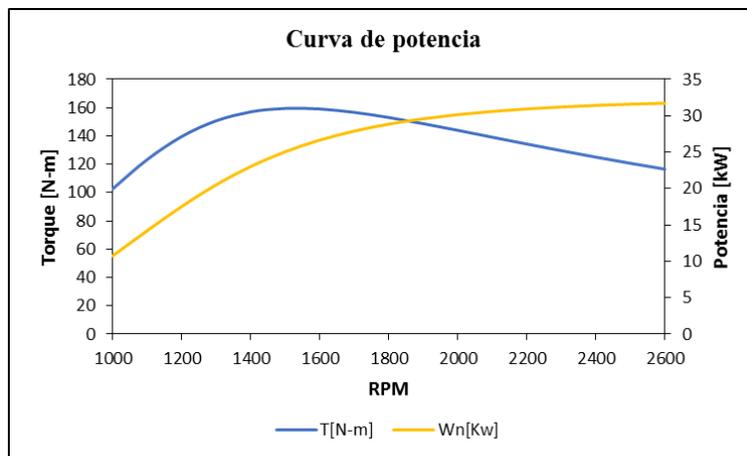


Gráfico 16. Curva de potencia para la mezcla B70.

3.3.6. Comportamiento del Biodiesel puro (B100) en el motor de combustión interna.

En el gráfico siguiente se muestran los resultados de la curva de potencia del modelo de simulación del motor Diésel KOHLER KDI 2504M funcionando con Biodiesel puro.

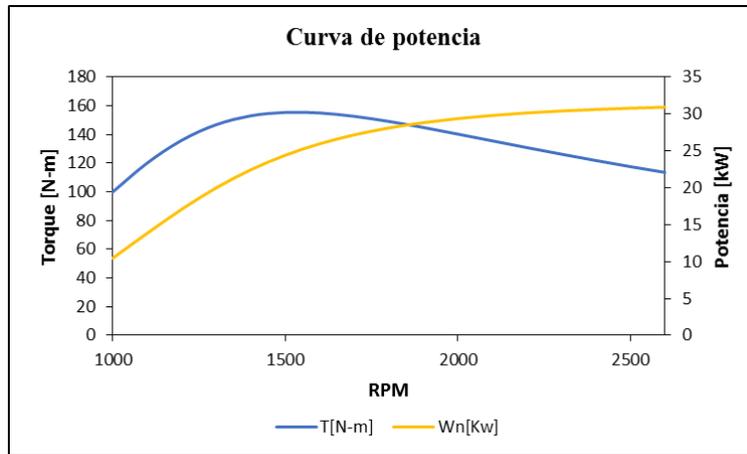


Gráfico 17. Curva de potencia para el combustible B100.

3.3.7. Comparación de la potencia obtenida para cada mezcla.

El gráfico 18 muestra la comparativa de la graficas potencia vs RPM para cada una de las mezclas evaluadas.

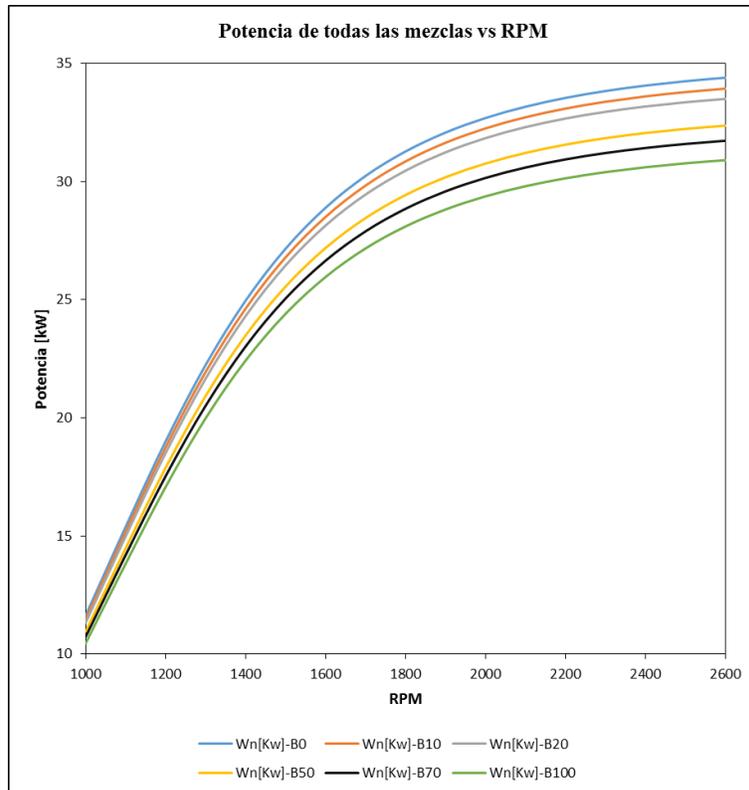


Gráfico 18. Potencia vs RPM para cada mezcla evaluada.

Comparando los resultados obtenidos en los numerales anteriores, notamos que a medida que aumenta el porcentaje de Biodiesel en la mezcla la potencia del motor disminuye para todas las velocidades, siendo más notorio para altas revoluciones esto se explica con el hecho de que el Biodiesel no se ve tan afectado por los efectos de heterogeneidad de la mezcla aire-combustible causada por disminución del tiempo de llenado debido a las altas RPMs, ya que las moléculas de este son oxigenadas; por lo que la curva trata de ser más achatada.

En grafico 19 muestra una comparativa de la potencia máxima del motor para cada mezcla.

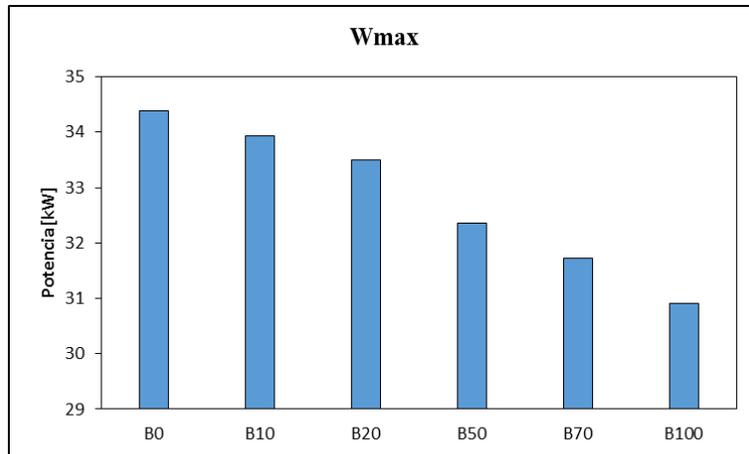


Gráfico 19. Comparativa de la potencia máxima en el motor para cada mezcla.

La disminución en la potencia del motor se atribuye a la disminución del poder calorífico del combustible a medida que la fracción de Biodiesel en la mezcla aumenta. En el gráfico anterior se presenta una disminución de la potencia del motor de un 10% desde B0 hasta B100.

Piloto, et al. (2010) encontró experimentalmente un comportamiento parecido al del gráfico 18, con un motor YUCHAI modelo YC61108Q de 6 cilindros e inyección directa; usando Diésel regular y Biodiesel de aceite de soya. En el gráfico 20 se muestran los resultados obtenidos por Piloto, et al. (2010) para la potencia en función de las RPMs.

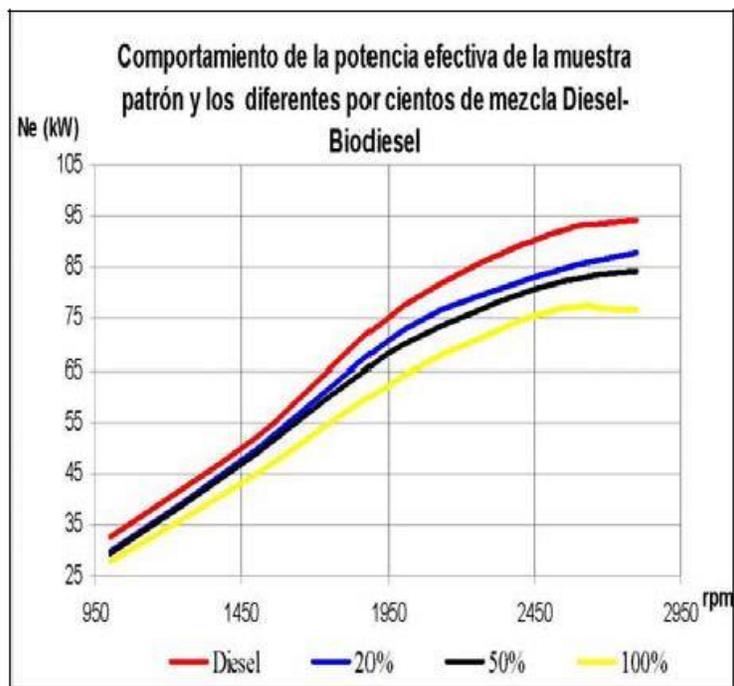


Gráfico 20. Potencia vs RPM obtenido por Piloto, et al. (2010).

3.3.8. Comparación del torque obtenido en el motor para cada mezcla.

En el grafico 21 se muestra la comparación de la graficas de torque para todas las mezclas evaluadas vs RPM.

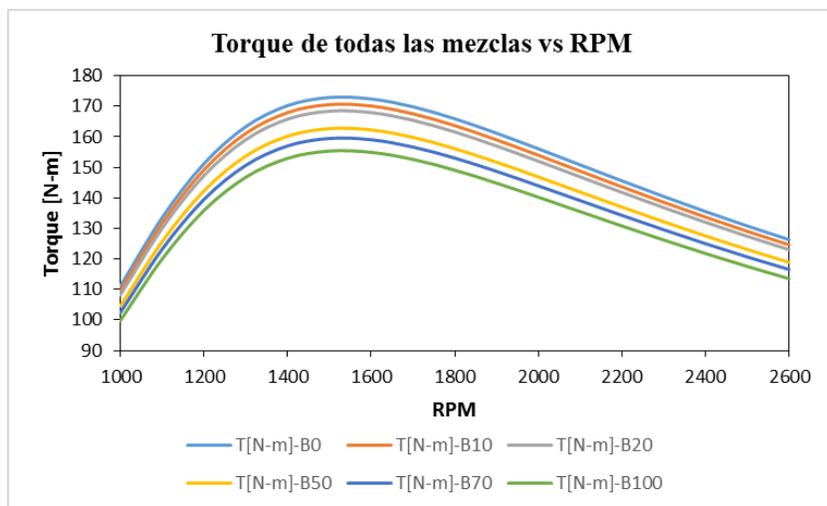


Gráfico 21. Comparación de la graficas de torque para todas las mezclas evaluadas vs RPM

En el grafico anterior se observa que a medida que aumenta la fracción de Biodiesel en la mezcla el torque del motor disminuye, esto se debe a la influencia que tiene la disminución de la potencia sobre el torque a RPMs constantes; sin embargo es de notar que la velocidad a la cual se presenta el torque máximo es la misma para todas las mezclas.

El grafico 22 muestra el efecto del aumento del porcentaje de Biodiesel sobre el torque máximo del motor.

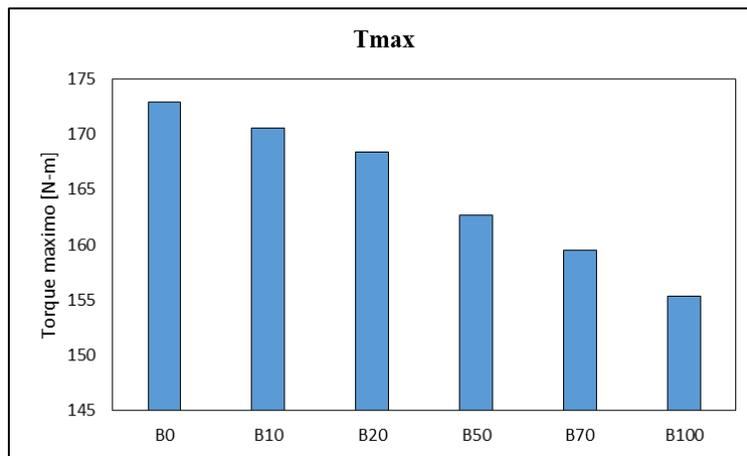


Gráfico 22. Comparativa del torque máximo en el motor para cada mezcla.

En el grafico anterior se calcula una reducción del torque máximo del 10% aproximadamente desde B0 hasta B100.

Piloto, et al. (2010) también registró un comportamiento parecido para el torque al variar el porcentaje de Biodiesel en la mezcla, para B0, B20, B50 y B100 alcanzando una disminución máxima del torque de 18% respecto a B0.

En el grafico 23 se muestran los resultados obtenidos por Piloto, et al. (2010) para el torque en función de las RPMs, donde se nota disminución del torque a medida que se aumenta el porcentaje de Biodiesel sin embargo la velocidad a torque máximo se conservó para todas las mezclas.

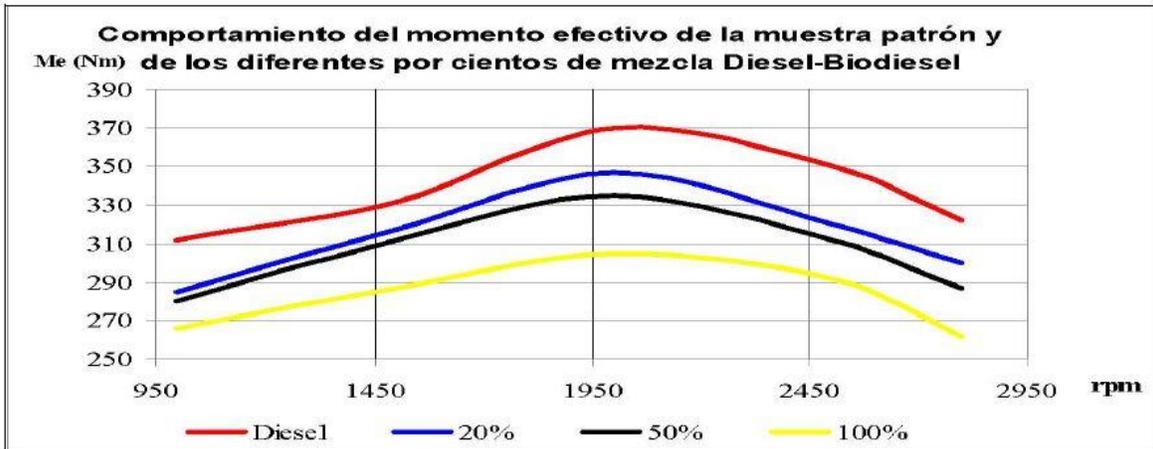


Gráfico 23. Torque vs RPM obtenido por Piloto, et al. (2010).

3.3.9. Análisis de emisiones para cada mezcla.

La influencia del porcentaje de Biodiesel de Palma Africana sobre los kilogramos de CO₂ por unidad de potencia se muestra en el grafico 24.

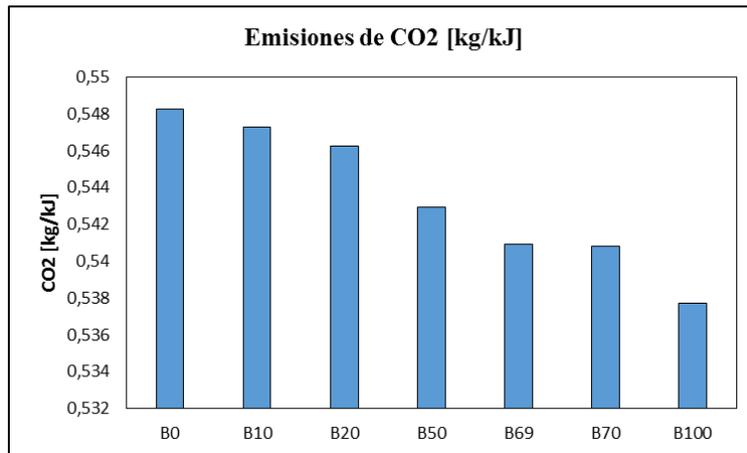


Gráfico 24. Emisiones de CO₂ para cada mezcla

El comportamiento del CO por unidad de potencia se muestra en el grafico 25, donde observamos una disminución de las emisiones por potencia específica de este gas, lo que indica que desde el punto de vista de las emisiones de CO se justifica la implementación de Biodiesel como sustituto parcial o total del Diésel convencional.

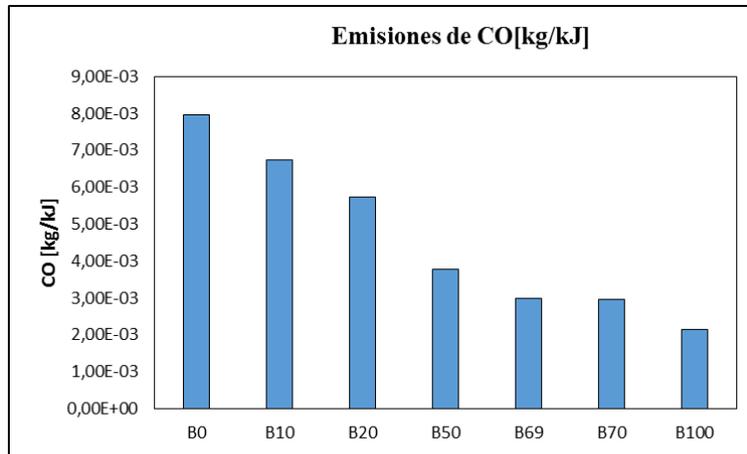


Grafico 25. Emisiones de CO para cada mezcla.

En el grafico 26 se muestra el comportamiento promedio de las emisiones específicas de HC para cada mezcla, donde notamos una tendencia al aumento de las emisiones específicas a medida que aumenta el porcentaje de Biodiesel, lo que indica que la reducción de HC producida por la adición de biodiesel al combustible no compensa la pérdida de potencia causada por el mismo.

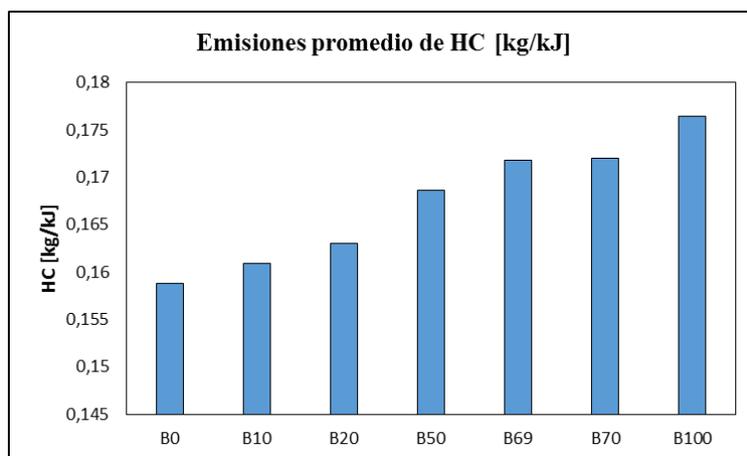


Grafico 26. Emisiones promedio de HC para cada mezcla.

3.3.10. Evaluación de la mezcla óptima.

Evaluando en el modelo de simulación del motor la mezcla más óptima seleccionada previamente la cual correspondió a la mezcla B69, se obtiene la curva de potencia ilustrada en el gráfico 27.

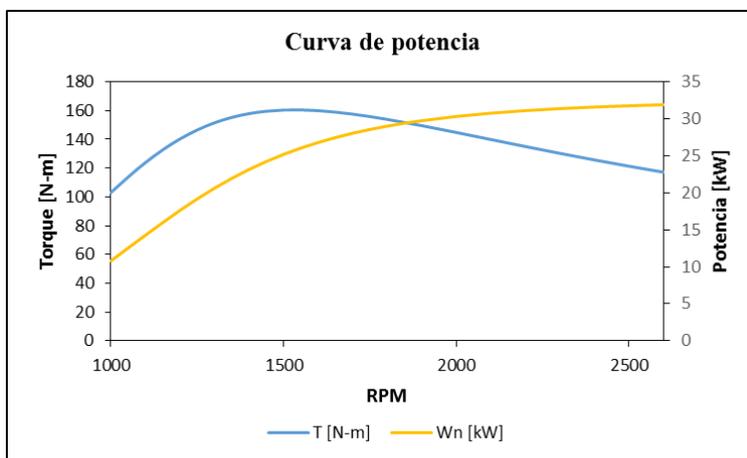


Gráfico 27. Curva de potencia para la mezcla B69

En la gráfica anterior se evidencia un comportamiento parecido a los descritos anteriormente para el torque y la potencia para este caso se presenta una pérdida máxima de torque y potencia del 7% aproximadamente, donde vemos que a pesar de ser una mezcla con alto porcentaje de Biodiesel presenta un buen comportamiento en el motor de combustión interna debido a las propiedades energéticas y de flujo optimizadas conjuntamente en el primer objetivo.

3.4. Análisis de segunda ley del ciclo Diésel para las Biodiesel- Diésel.

Para el análisis de segunda ley se calculó la exergía de cada línea de flujo, luego se realizó el balance exergético global como se describió en el numeral 2.

3.4.1. Influencia del porcentaje de Biodiesel y las RPMs sobre las eficiencias de primera y segunda ley.

El comportamiento de las eficiencias de primera y segunda ley respecto a las revoluciones del motor, obteniendo los resultados que se muestran a continuación en el gráfico 28.

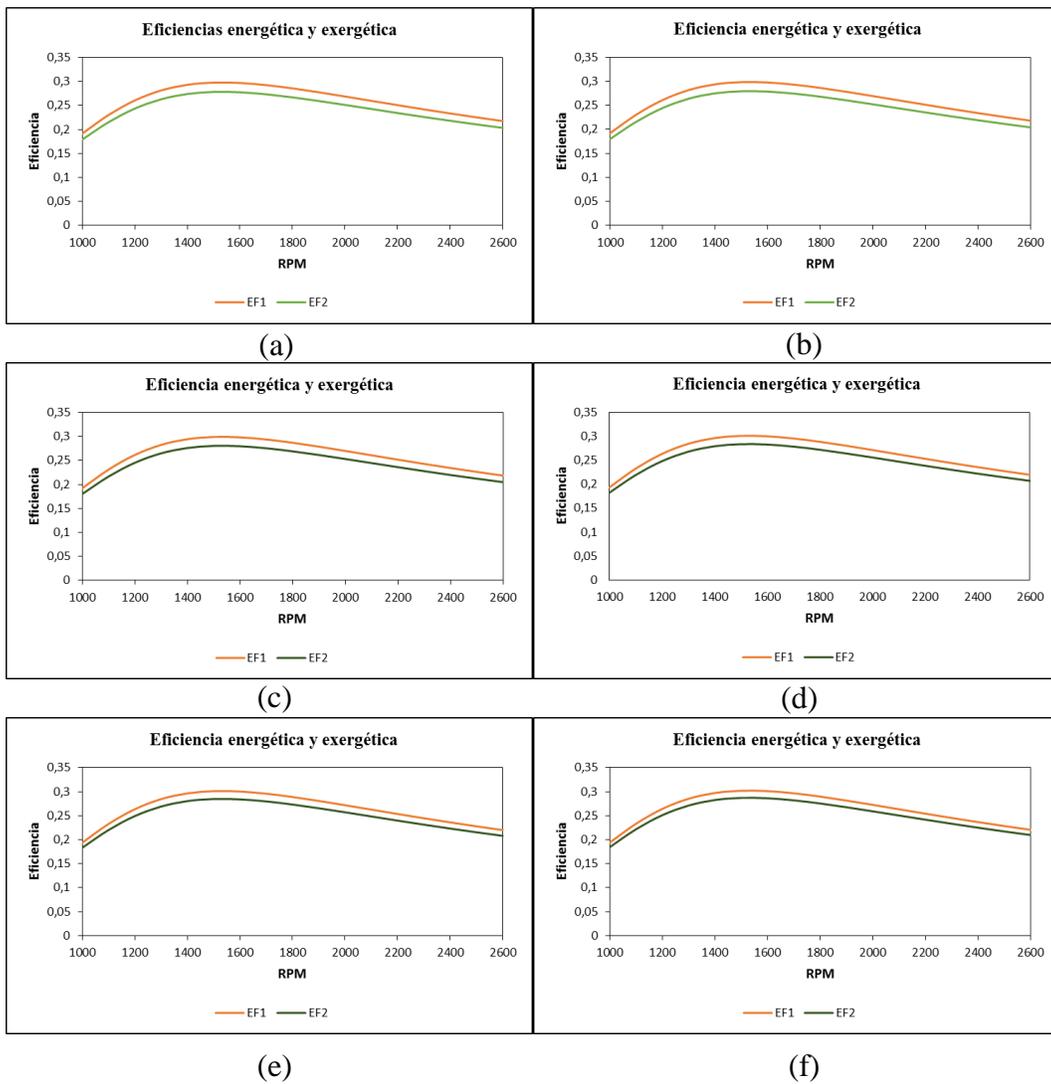


Gráfico 28. Eficiencia de primera y segunda ley para las mezclas (a). B0, (b). B10, (c). B20, (d). B50, (e). B70 y (f). B100

En el grafico anterior se observa que a medida que aumenta el porcentaje de Biodiesel en la mezcla la eficiencia de primera y segunda ley aumentan logrando un aumento máximo aproximado del 1,5% para la eficiencia de primera ley y del 3% para la eficiencia de segunda ley.

El grafico 29 muestra el comportamiento de la eficiencia de segunda ley para todas las mezclas evaluadas.

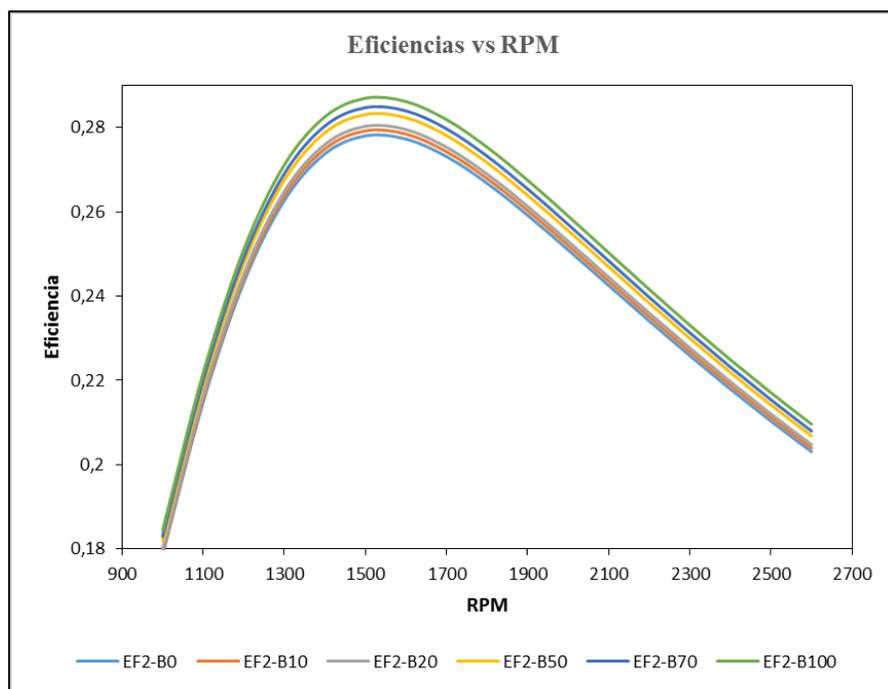


Gráfico 29. Eficiencia de segunda ley para todas las mezclas evaluadas vs RPM

Notamos que el punto de máxima eficiencia coincide para todas las mezclas y es el mismo para las dos eficiencias el cual se tiene para una velocidad de 1500 RPM.

3.4.2. Impacto del porcentaje de Biodiesel y las RPMs sobre la exergía destruida en el motor.

Por medio el balance de exergía se determinó la exergía destruida para cada mezcla y a varias revoluciones obteniendo los resultados mostrados en el grafico 30 donde notamos que a medida que aumenta el porcentaje de Biodiesel en la mezcla la exergía destruida en el motor va a disminuir para cualquier valor de las RPMs.

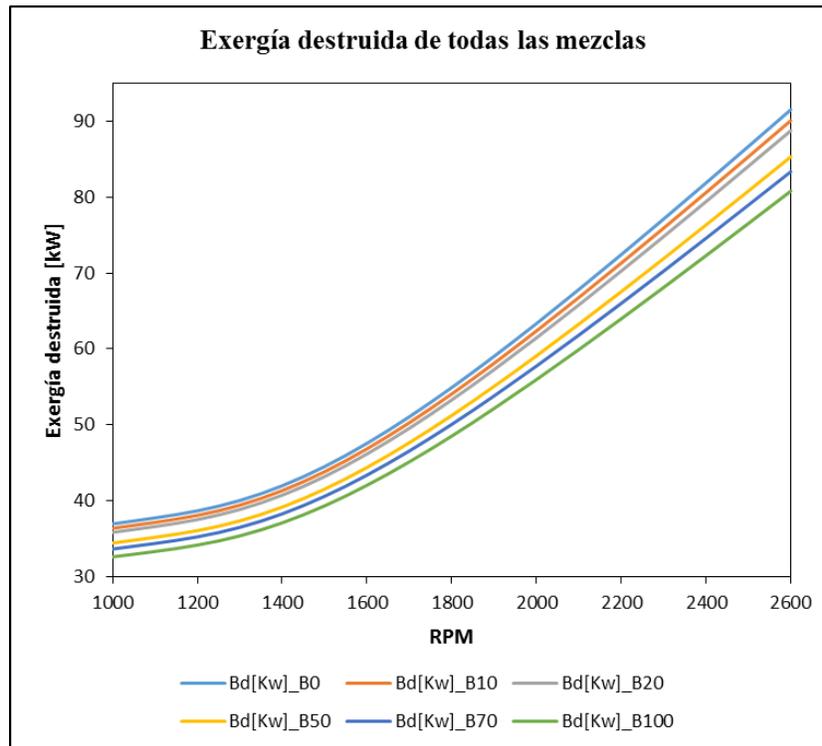


Gráfico 30. Exergía destruida para cada mezcla vs RPM

El grafico anterior también es notable el hecho de que la exergía destruida sea mayor a más altas RPMs esto se debe a que a mayores revoluciones el tiempo de llenado del cilindro va a ser más corto por tanto la mezcla aire combustible se hace menos homogénea y la combustión no se da adecuadamente por lo que las pérdidas de exergía aumentan. La exergía destruida disminuye para el B100 en comparación con el B0 un valor máximo del 12% aproximadamente.

- **Evaluación exergetica de la mezcla más óptima.**

Se realizó el análisis particular del comportamiento desde el punto de vista exergetico de la mezcla más óptima seleccionada previamente (B69).

El grafico 31 muestra el comportamiento de la eficiencia de primera y segunda ley del motor funcionando con la mezcla B69.

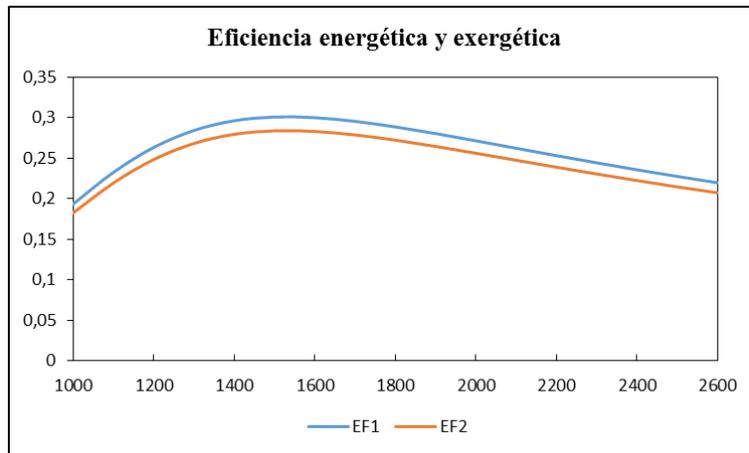


Gráfico 31. Eficiencia energética y exergetica del motor funcionando con la mezcla B69 vs RPM.

Para esta mezcla se tiene el mismo comportamiento general descrito anteriormente para las otras mezclas evaluadas, de donde se infiere que la eficiencia exergetica para esta mezcla aumenta aproximadamente un 2,1% respecto a la mezcla B0.

Miremos ahora el comportamiento de la exergetia destruida en el motor para cada mezcla vs las RPM en el grafico 32.

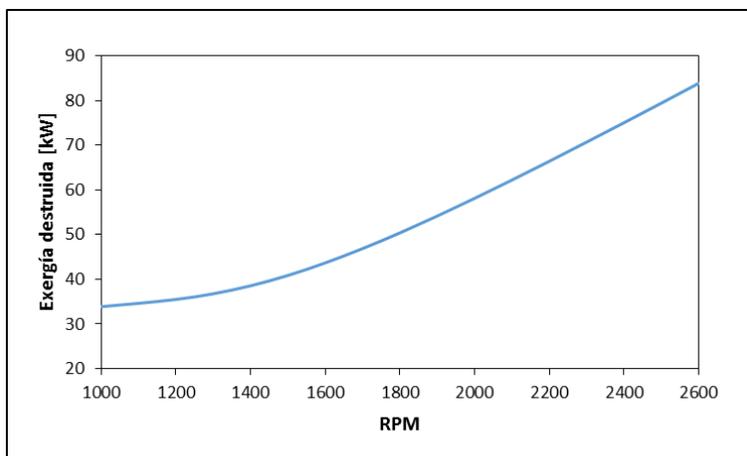


Gráfico 32. Exergía destruida en el motor para la mezcla B69 vs RPM.

El gráfico muestra la misma tendencia que las mezclas evaluadas anteriormente con una disminución de la exergía destruida de aproximadamente 8,3% por lo que el análisis exergético sigue ratificando las buenas propiedades de esta mezcla, estableciendo un punto de equilibrio entre los parámetros de operación considerados para realizar la evaluación. A continuación la tabla 17 muestra de manera resumida los resultados obtenidos para la mezcla B69 para el motor de combustión interna KOHLER KDI 2504M.

Tabla 17. Parámetros de operación del motor funcionando con la mezcla B69.

Parámetro	Valor
Wmax	31,91 kW
EF1max	30%
EF2max	28%
Tmax	160,39 N-m
Bd max	83,89 kW

4. CONCLUSIONES

El modelo termodinámico seleccionado predice adecuadamente el comportamiento de las propiedades consideradas en este estudio (densidad, poder calorífico, viscosidad e índice de Cetano) las cuales se compararon con comportamientos obtenidos de referencias bibliográficas mostrando gran similitud con los resultados del presente estudio.

El Biodiesel de aceite de Palma posee muy buenas propiedades que permiten que sustituya total o parcialmente al Diésel fósil en los motores de encendido por compresión, cumpliendo los requerimientos técnicos para la mayoría de aplicaciones, además la caracterización de las mezclas en el simulador arrojó que la totalidad de las mezclas cumplen los requisitos normativos para ser implementado en motores Diésel.

La optimización de múltiples respuestas buscando un punto de equilibrio entre las variables de entrada y salida de acuerdo con las restricciones y niveles de importancia especificados, encontró que la mezcla más óptima era la B69 la cual cuenta con propiedades destacables como un poder calorífico de 40,1 MJ/kg una viscosidad aproximada de 3 cSt y un número de Cetano de 51; adicional a esto es una mezcla con alto contenido de Biodiesel lo que trae ventajas en temas de impacto ambiental y sostenibilidad.

El modelo de simulación construido con los parámetros de operación real del motor Diésel KOHLER KDI 2504 M muestra un gran grado de ajuste con las curvas especificadas por el fabricante del motor, lo que le da validez al modelo por lo que se puede decir que los resultados obtenidos están cercanos a los valores que se obtendrían experimentalmente, por otro lado las ecuaciones programadas en el software predicen acertadamente el comportamiento de los parámetros de operación y funcionamiento del motor.

El software Aspen HYSYS permitió conocer la influencia del porcentaje de Biodiesel en el combustible sobre los parámetros de operación reales para cada una de las mezclas evaluadas donde se obtuvieron comportamientos descritos en estudios experimentales encontrados en la literatura. Posteriormente se evaluó en el modelo de simulación del motor Diésel la mezcla más óptima obtenida en la optimización de múltiples respuestas concluyendo que está presenta un buen comportamiento de los parámetros de operación del motor, por lo que se refuerza la hipótesis de que esta es la mejor mezcla.

Al aumentar el porcentaje de Biodiesel en el combustible para motor Diésel se presenta una disminución de la potencia del motor y el torque de aproximadamente un 10% para este caso, sin embargo se genera también un aumento en la eficiencia del motor.

La evaluación exergética del combustible mostró que desde el punto de vista exergético el Biodiesel es un mejor combustible que el Diésel tradicional debido a que con este se obtienen mayores eficiencias exergéticas y menor exergía destruida, obteniendo que la exergía destruida aumenta al aumentar la fracción de Diésel en la mezcla y la eficiencia aumenta al aumentar el porcentaje de Biodiesel en este caso se registró un aumento máximo del 3% para la eficiencia exergética y una disminución del 12% para la exergía destruida.

La evaluación exergética del motor operando con la mezcla B69 corrobora el hecho de que esta es una mezcla con muy buenas propiedades, obteniendo un aumento de la eficiencia exergética del 2,1% y una disminución de la exergía destruida del 8,3%, por lo que finalmente se puede concluir que la mezcla B69 es adecuada para ser implementada en motores Diésel obteniéndose con ello un ahorro exergético y mejorando la eficiencia del motor.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar el funcionamiento del motor por medio del simulador con las características de Biodiesel obtenido de materias primas abundantes en el departamento de Córdoba.
- Validar experimentalmente los resultados obtenidos en este estudio en un motor de especificaciones parecidas a las del motor KOHLER KDI 2504M.
- Determinar el efecto de adicionar al combustible aditivos mejoradores de propiedades, como MTBE o ETBE (metil-terbutil-eter o etil-terbutil-eter).
- Realizar una evaluación económica del uso del Biodiesel en motor así como una valoración ambiental del de la sustitución total o parcial del combustible Diésel.
- Construir un modelo de simulación dinámico del motor de combustión para poder registrar las perturbaciones y las fluctuaciones de los flujos tomando como base el modelo ya simulado.
- Realizar una evaluación del proceso de producción de Biodiesel de aceite de palma definiendo los parámetros necesarios para alcanzar una composición del combustible parecida a la obtenida en este estudio, ya que esta mostró muy buenas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

Agudelo, J., Agundelo, A. & Cuadrado, I., 2006. Analisis de primera y segunda ley de un motor funcionando con biodiesel de aceite de palma. *Enerética*, Volumen 25, pp. 9-14.

Anon., s.f.

Benjumea, P., Alvarez, A. & Molina, A., 2006. Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional. *Energética*, Volumen 35, pp. 33-38.

Cardona A., C. A., 2009. Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial. *Dossier*, Issue 29, pp. 109-120.

Cardona, C. & Orrego, C., 2009. Avances investigativos en la producción de biocombustibles. 1ra ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia..

Castro, P., Coello, J. & Castillo, L., 2007. Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Primera ed. Lima: Soluciones Practicas- ITDG.

Castro, V., 2015. El mercado mundial de Biocombustibles , Rosario: CARBIO.

Cengel, Y. & Boles, M., 2011. TERMODINÁMICA. Séptima ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc..

Clauss, R., Mayes, J., Hilton, P. & Lawrerson, R., 2005. The influence of weather and environment on pulmonary embolism: pollutants and fossil fuels. , s.l.: Medical Hypotheses.

Corsini, A. y otros, 2015. Vegetable oils as fuel in Diesel engine. Engine performance and emissions.. *ELSEVIER, Energia Procedia.* , 1(81), pp. 942-949.

Cuellar, M., 2010. Características del biodiesel de palma y las mezclas, Bogotá: Fedepalma.

Cuellar, M. & Augusto, J., 2007. Posibilidades del Biodiésel de Palma y sus mezclas con Diésel en Colombia. *PALMAS*, 2(28), pp. 64-71.

Delgado, A., Aperador, W. & Silva, J., 2011. Infl uencia del porcentaje de mezcla del aceite de higuerilla en la obtención de combustible alternativo para motores diesel. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Issue 58, pp. 46-52.

ECOPETROL, 2014. El petróleo y su mundo, Bogotá: Ecopetrol S.A..

Fedepalma, 2016. Fedepalma.[En línea] Available at: <http://web.fedepalma.org/>
[Último acceso: 12 08 2016].

Fontalvo, M., Vecino, R. & Barrios, A., 2014. El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. Prospect., 12(1), pp. 90-98.

Gustavsson, L., Bijrjesson, P., Johansson, B. & Svenningsson, P., 1995. Reducing CO2 emissions by substituting biomass for fossil fuels , s.l.: Renewable Energy.

Heywood, J., 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. segunda ed. New York: McGraw- Hill.

Jiménez, E. & Andrés, N., 2007. Aplicación del análisis energético a circuitos de energía eléctrica en el hospital universitario de Santander, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander-Tesis de grado.

Kates, E. j. & Luck, W. E., 2003. Motores Diésel y de gas de alta compresión. Segunda ed. Barcelona: Reverté, S.A..

Molina, D. L., 2015. Modelación matemática basada en análisis exergético de una caldera bagacera, Cali: Universidad Autonoma de Occidente- Tesis de Mestria.

Morris, D. & Szargut, J., 1986. Standard chemical exergy of some elements of the planet Earth. Energy, Volumen vol. 11, pp. 733-755.

Muñoz R., M., Moreno G., F. & Morea R., J., 1999. Motores alternativos de combustión interna. Primera ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.

National Biodiesel Board, 2016. BIODIESEL American's Advanced Biofuel. [En línea] Available at: <http://biodiesel.org>

[Último acceso: 2 Agosto 2016].

Perez S., A. y otros, 2015. Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel. Ingeniería Investigación y Tecnología , XVI(1), pp. 83-92.

Piloto, R., Ferrer, N. & Ferrer, N., 2010. Evaluación del desempeño de un motor Yuchai trabajando con biodiesel Cubano. Ingeniería Energética, 31(3), pp. 70-79.

Poma, F. & Karim, 2004. Evaluacion de la calidad del Diésel 2 basado en sus propiedades cetanicas, Lima: Universidad Nacional de Ingeniería-Tesis de grado.

Ramírez D., J. L., 2012. Evaluacion del uso de de biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina usado en un motor diésel, Cali: El hombre y la maquina.

Sierra, C. & Casas, J., 2011. Analisis exergético de una planta de producción de biodiesel de aceite de palma, Bucaramanga: Tesis de grado-UIS.

Torrela, E., 2014. La combustion: Combustibles y tipos, s.l.: s.n.

Uparela, I., 2013. El Biodiésel y las diferentes generaciones de materia prima , Montería: Tesis de grado- Universidad de Córdoba.

UPME, 2009. Biocombustibles en Colombia, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.

Wuithier, P., 1973. El petróleo: Refino y tratamiento químico. 2 ed. Madrid: Cepsa.

ANEXOS

ANEXO A: Resumen de la optimización multi-objetivo

Densidad

Sequential Source	Sum of Squares	Model DF	Sum Mean Square	of F Value	Squares Prob > F
Mean	5.844E+006		1	5.844E+006	
Linear	2980.59		1	2980.59	1762.59
< 0.0001					
Quadratic	10.13		1	10.13	2390.63
< 0.0001					
<u>Cubic</u>	<u>0.021</u>	<u>1</u>	<u>0.021</u>	<u>6.366E+007</u>	<u>≤</u>
0.0001 Suggested					
Residual	0.000	4	0.000		
Total	5.847E+006	8	7.309E+005		

"*Sequential Model Sum of Squares*": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Linear	10.15	2	5.07		
Quadratic	0.021	1	0.021		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	4	0.000		

"*Lack of Fit Tests*": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	1.30	0.9966	0.9960	0.9936	19.24
Quadratic	0.065	1.0000	1.0000	1.0000	0.042
<u>Cubic</u>	<u>0.000</u>	<u>1.0000</u>	<u>1.0000</u>		<u>+ Suggeste</u>

"*Model Summary Statistics*": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Poder Calorífico

Sequential Source	Sum of Squares	Model DF	Sum Mean Square	of F Value	Squares Prob > F
Mean	13060.51	1	13060.51		
Linear	5.60	1	5.60	743.62	
< 0.0001					
Quadratic	0.045	1	0.045	1062.50	
< 0.0001					
Cubic	2.118E-004	1	2.118E-004	6.366E+007	≤
0.0001 Suggested					
Residual	0.000	4	0.000		
Total	13066.16	8	1633.27		

"*Sequential Model Sum of Squares*": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Linear	0.045	2	0.023		
Quadratic	2.118E-004	1	2.118E-004		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	4	0.000		

"*Lack of Fit Tests*": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.087	0.9920	0.9907	0.9848	0.086
Quadratic	6.508E-003	1.0000	0.9999	0.9999	4.157E-004
Cubic	0.000	1.0000	1.0000		+ Suggested

"*Model Summary Statistics*": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Viscosidad

Sequential Source	Sum of Squares	Model DF	Sum Mean Square	of F Value	Squares Prob > F
Mean	72.69		1	72.69	
Linear	4.981E-003		1	4.981E-	
003 257.06	< 0.0001				
Quadratic	1.125E-004		1	1.125E-	
004 149.41	< 0.0001				
<u>Cubic</u>	<u>3.765E-006</u>	<u>1</u>	<u>3.765E-006</u>	<u>6.366E+007</u>	<u>≤</u>
0.0001 Suggested					
Residual	0.000	4	0.000		
Total	72.69	8	9.09		

"*Sequential Model Sum of Squares*": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Linear	1.163E-004	2	5.813E-005		
Quadratic	3.765E-006	1	3.765E-006		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	4	0.000		

"*Lack of Fit Tests*": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	4.402E-003	0.9772	0.9734	0.9571	2.188E-004
Quadratic	8.677E-004	0.9993	0.9990	0.9986	7.390E-006
<u>Cubic</u>	<u>0.000</u>	<u>1.0000</u>	<u>1.0000</u>		<u>+ Suggeste</u>

"*Model Summary Statistics*": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

Cetano

Sequential Source	Model Sum of Squares	DF	Sum Mean Square	of F Value	Squares Prob > F
Mean	20651.22		1	20651.22	
Linear	0.036		1	0.036	0.29
Quadratic	0.51		1	0.51	11.64
Cubic	0.22	1	0.22	6.366E+007	≤
Residual	0.000	4	0.000		
Total	20651.98	8	2581.50		

"*Sequential Model Sum of Squares*": Select the highest order polynomial where the additional terms are significant and the model is not aliased.

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Linear	0.73	2	0.36		
Quadratic	0.22	1	0.22		
Cubic	0.000	0			
Pure Error	0.000	4	0.000		

"*Lack of Fit Tests*": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.35	0.0468	-0.1121	-0.6706	1.28
Quadratic	0.21	0.7136	0.5990	0.4378	0.43
Cubic	0.000	1.0000	1.0000		+ Suggeste

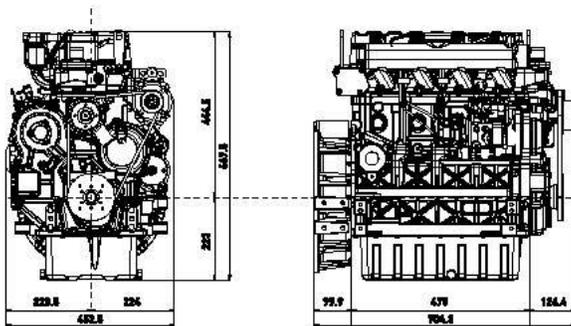
"*Model Summary Statistics*": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

ANEXO B: Catálogo del motor de Diésel KOHLER KDI 2504M

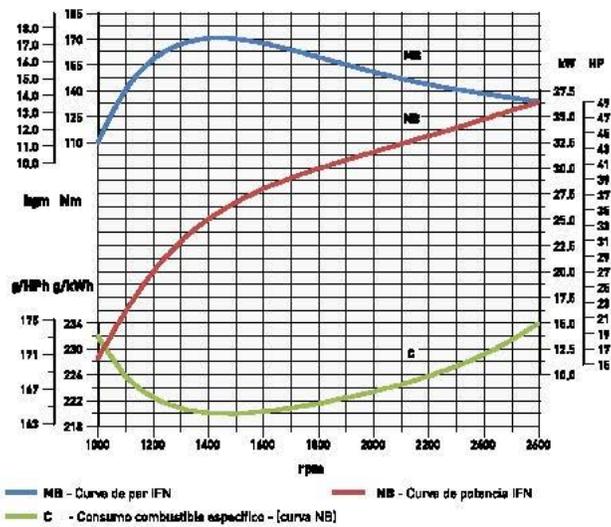


DATOS

DIMENSIONES [mm]



PRESTACIONES (IFN- ISO 3046 Y ISO 14396)



Las clasificaciones de potencia hacen referencia a motores equipados con filtro de aire, escape estándar, después de un periodo funcionando a temperatura ambiente de +25°C, humedad relativa del 50% y 1 bar. La potencia cae un 1% cada 100 m altitud y un 2% cada 5°C por encima de +25°C.

KDI 2504M

ESPECIFICACIONES

4 Mecánico
CILINDROS

49 **36.4** @ 2600 rpm
HP kW STAGE III A

170 @ 1500 rpm
Nm



Figura B 1. Catálogo del motor KOHLER KDI 2504M Pag1.

MOTORES TURBO COMMON RAIL



Modelo		KDI1903TCR	KDI2004TCR
Especificaciones	Motor Diesel 4 tiempos con cilindros en línea	•	•
	Refrigeración líquida	•	•
	4 válvulas por cilindro	•	•
	Eje levas en bancada, distribución por engranajes	•	•
	Balancines-válvulas y taqués hidráulicos	•	•
	Bancada en fundición tipo "Bad- Plate"	•	•
	Culata en fundición	•	•
	Circuito de recirculación de gases interno	•	•
	Common rail a alta presión (2000 Bar)	•	•
	Gestión Electrónica del motor	•	•
Características	Turbo compresor	•	•
	Intercooler	(+)	(+)
	Cilindros	3	4
	Diámetro (mm)	88	88
	Carrers (mm)	102	102
	Cilindrada (cm ³)	1861	2482
	Sistema de inyección	DI	DI
	Equipamiento de inyección	Common rail (2000 bar)	Common rail (2000 bar)
	Normativa de emisiones	TIER 4 Final / STAGE III B	TIER 4 Final / STAGE III B
	Prestaciones		
Potencia Max (IFN - ISO 3046 y ISO 14394) (kW@rpm)	42@2400 - 2600	55.4@2400 - 2600	
Par Max (IFN - ISO 3046 y ISO 14394) (Nm@rpm)	225@1500	300@1500	
Par al Min (Nm@1000 rpm)	172	262	
Consumos			
Consumo óptimo (g/kWh)	215	210	
Potencia Max (g/kWh@2400 rpm)	237	226	
Condiciones de Arranque			
Std (°C)	hasta -19	hasta -19	
Con accesorios* (°C)	por debajo -19	por debajo -19	
* Bujía de calentamiento en colector			
Tipos combustible	EN 590	•	•
	No 1 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grado 1-D S 15	•	•
	No 2 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grado 2-D S 15	•	•
	Aviaco EN 590/ASTM D 975-09 B	•	•
Mantenimiento	Acabas/filtro intervalos de sustitución std/sintético (hr)	500-750*	500-750*
	Ajuste de válvulas	—	—
	Sustitución correa alternador	36 meses	36 meses
	Sustitución del refrigerante	2 años	2 años
	Consumo aceite (% combustible)	<0.1	<0.1
	* acorde con las condiciones de funcionamiento		
Dimensiones físicas	H x L x W (sin ventilador) (mm)	726 x 698.3 x 630	719.5 x 704.3 x 623.2
	Peso (kg)	233	267
	Punto de mantenimiento diario - posiciones	1 lado	1 lado
	Rango temperaturas de trabajo (°C)	-40 +50	-40 +50
	Inclinación en todas direcciones (continua)	28°	28°
	Inclinación en todas direcciones (intermitente-1min)	35°	35°
Refrigeración & Lubricación	Calor evacuada refrigeración (inclu. ref. aceite) (kW)	32	44
	Refrigerante: 50/50 agua/glicol	•	•
	Tipo de aceite	SAE 5W 30 low SAPS EURO 6 API CJ-4	SAE 5W 30 low SAPS EURO 6 API CJ-4
Vibraciones	Max vibraciones en puntos de montajes	5g	5g
	Par Máx (Nm)	100	100
Temas de fuerza [2 ^a & 4 ^a] (opcionales)	Velocidad de rotación	1.23 veces rpm motor	1.23 veces rpm motor
	Pre-dispuesto para doble bomba hidráulica 2P en tandem	•	•

Figura B 2. Catálogo del motor KOHLER KDI 2504M Pag2.

MOTORES MECÁNICOS



Modelo		KDI1900M	KDI2504M
Especificaciones	Motor diesel 4 tiempos con cilindros en línea	•	•
	Refrigeración líquida	•	•
	4 válvulas por cilindro	•	•
	Eje levas en bancada, distribución por engranajes	•	•
	Balancines-varillas y taqués hidráulicos	•	•
	Bancada en fundición tipo "Bad Plate"	•	•
	Culata en fundición	•	•
	Circuito de recirculación de gases interno	•	•
	Turbo compresor	—	—
	Intercooler	—	—
Características	Cilindros	3	4
	Diámetro (mm)	88	88
	Carrera (mm)	102	102
	Cilindrada (cm ³)	1861	2482
	Sistema de inyección	DI	DI
	Equipamiento de inyección	Bomba rotativa mecánica	Bomba rotativa mecánica
Pruebas clave	Normativa de emisiones	STAGE III A	STAGE III A
	Potencia Max [IFN - ISO 3046 y ISO 14396] (kW@rpm)	31@2400	36.4@2600 (STAGE III A)
	Par Max [IFN - ISO 3046 y ISO 14396] (Nm@rpm)	122@1600	170@1600
Consumos	Par el Min (Nm@1000 rpm)	80	110
	Consumo óptimo (g/kWh)	223	220
	Potencia Max (g/kWh@2600)	237	234
Condiciones de Arranque	Sid (°C)	hasta -15	hasta -15
	Con accesorios* (°C)	por debajo -15	por debajo -15
Tipos combustible	* Bujías de calentamiento en colector		
	EN 590	•	•
	No 1 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grade 1-D S 15	•	•
	No 1 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grade 1-D S 500	•	•
	No 2 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grade 2-D S 15	•	•
	No 2 Diesel (US) - ASTM D 975-09 B - Grade 2-D S 500	•	•
	Artico EN 590/ASTM D 975-09 B	•	•
	High Sulfur Fuel < 5000 ppm (< 0.5%)	•	•
	High Sulfur Fuel > 5000 ppm (> 0.5%)	•	•
	Military NATO Fuels F34 - F36 - F44 - F43 - F64 - F68 *	•	•
	Military US Fuels JPB - JPB (AVTUR) *	•	•
	Civil Jet Fuels Jet A/ A1 *	•	•
* Con restricciones			
Mantenimiento	Aceite/filtro intervalos de sustitución std/sintético (hr)	500-750*	500-750*
	Ajuste de válvulas	—	—
	Sustitución correa alternador	36 meses	36 meses
	Sustitución del refrigerante	2 años	2 años
	Consumo aceite [% combustible]	<0.1	<0.1
* acorde con las condiciones de funcionamiento			
Dimensiones físicas	H x L x W (sin ventilador) (mm)	667.5 x 598.3 x 452.5	667.5 x 704.3 x 452.5
	Peso (kg)	210	244
	Punto de mantenimiento diario - posiciones	1 lado	1 lado
	Rango temperaturas de trabajo (°C)	-40 +50	-40 +50
	Inclinación en todas direcciones (continua)	25°	25°
	Inclinación en todas direcciones (intermitente-1min)	35°	35°
Refrigeración & lubricación	Delor evacuada refrigeración (incl. ref. aceite) (kW)	24	28
	Refrigerante: 50/50 agua/glicol	•	•
	Tipo de aceite	API CH4-SAE 10W40	API CH4-SAE 10W40
Vibraciones	Max vibraciones en puntos de montaje	5g	5g
Temas de fuerza (3" & 4") (opcional)	Par Max (Nm)	100	100
	Velocidad de rotación	1.23 veces rpm motor	1.23 veces rpm motor
	Preinstalado para doble bomba hidráulica 2P en tándem	•	•

Figura B 3. Catálogo de motor KOHLER KDI 2504M Pag3.

ANEXO C: Programación de las ecuaciones en el software Aspen HYSYS v.8.0.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Cilindrada	RPM	Presion_i	<empty>	R_comburente	#Cilindros parados	#cilindros totales	Factor del #cilindro	Vol_aire	Masa_air
2	2482	2600	101.3 kPa	25.00 C	0.2887 kJ/kg-C	2.000	4.000	0.5000	2.482e-003	2.923e-00
3	Flujo_aire	AFRs	L	AFRa	flujo combustible	P_aire-c	P_GNV	WIn	Wout	W
4	101.7 kg/h	17.00	1.000	17.00	5.984 kg/h	2057 kPa	2057 kPa	11.46 kW	42.37 kW	30.90 kW
5	LHV	Wcombustible	eficiencia	consumo real	fac	1/fac	TESCAPE	TA	4.989e-003 kW	
6	3.761e+004 kJ/kg	140.1 kW	0.2205	13.41 kg/h	2.241	0.4462	902.3 C	902.3 C		
7		Ce	AIR-MASSOBRAN...							
8	T	299.3	126.3 kg/h							
9	1135 N-m									
10										
11										
12										
13										

Figura C 1. Programación de las ecuaciones de los parámetros de funcionamiento del motor KOHLER 2504M

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		CO	CO2	O2	H2O	N2	GE			
2	CGASES DE ESCAPE	0.0003	0.0486	0.1475	0.0455	0.7601	1.000		EP2	
3	b°	2.750e+005	2.000e+004	3900	1300	660.0	-		0.2096	
4	y°b°	8.0655e+01	9.3232e+02	5.7524e+02	5.9139e+01	5.0167e+02	2.1490e+03			
5	sumaj(y°1ny)	-0.0024	-0.1429	-0.2823	-0.1406	-0.2085	-0.7767			
6	M	28.89				R	8.314		EX_DEST	
7	flujo masico	234.0 kg/h				S(EXE)	-1.9244e+03		80.79 kW	
8						b_CH(GE)	2.2463e+02			
9						b_ch(KJ/kg)	7.775 kJ/kg			
10						b_ph(KJ/kg)	541.9 kJ/kg			
11						b_total(GE)	549.7 kJ/kg			
12						B_GE(KW)	35.73 kW			
13	B-X	M-OLEATE	M-palmitate	M-linoleato	n-C16	ALFA-M-NAFTAL				
14	y	0.3822	0.5380	0.0798	0.0000	0.0000	f_prom			
15	f°y	0.4027	0.5660	0.0839	0.0000	0.0000	1.0520			
16	flujo masico	13.41 kg/h				b_total	3.957e+004			
17	LHV	3.761e+004 kJ/kg				B_B-X(KW)	147.4 kW			
18						B(WW)	30.90 kW			

Figura C 2. Programación del cálculo de las exergías