

# Evaluación de mezclas biodiésel-diésel en la generación de energía eléctrica<sup>1</sup>

## Assessment of Biodiesel-Diesel Blends for Producing Electric Energy<sup>2</sup>

## Avaliação de misturas biodiesel-diesel na geração de energia elétrica<sup>3</sup>

*Andrés Rojas-González<sup>4</sup>  
Óscar Chaparro-Anaya<sup>5</sup>  
Carlos Andrés-Ospina<sup>6</sup>*

---

<sup>1</sup> Fecha de recepción: 10 de enero de 2011. Fecha de aceptación: 10 de mayo de 2011. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Evaluación de mezclas de biodiésel provenientes de diferentes fuentes vegetales para la generación de potencia en motores diésel*, desarrollado por los grupos de Prospectiva Ambiental, Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón, y financiado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>2</sup> Submitted on: January 10, 2011. Accepted on: May 10, 2011. This article results from the research project *An Assessment of Biodiesel Blends Made of Different Vegetable Sources for Generating Power in Diesel Engines*, developed by the research groups Environmental Prospective and Coal Science and Technology Group and financed by the Universidad Nacional de Colombia — sede Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>3</sup> Data de recepção: 10 de janeiro de 2011. Data de aceitação: 10 de maio de 2011. Este artigo é derivado de um projeto de pesquisa denominado *Avaliação de misturas de biodiesel provenientes de diferentes fontes vegetais para a geração de potência em motores diesel*, desenvolvido pelos grupos de Prospectiva Ambiental, Grupo de Ciência e Tecnologia do Carvão, e financiado pela Universidade Nacional da Colômbia, sede Palmira, Valle del Cauca, Colômbia.

<sup>4</sup> Ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Colombia. Magíster en Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Doctor en Ingeniería Química, Universidad del Valle. Investigador, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Correo electrónico: anfrojasgo@unal.edu.co.

<sup>5</sup> Ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Maestría en Educación Superior. Doctorado en Mecanización y Tecnología Agraria, Universidad Politécnica de Valencia, España. Investigador, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Correo electrónico: ochaparroa@palmira.unal.edu.co.

<sup>6</sup> Ingeniero mecánico. Joven Investigador, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Correo electrónico: caoa1236@hotmail.com.

### Resumen

En este artículo se muestra el efecto de tres diferentes biodieleses mezclados con diésel en el funcionamiento de una planta de generación de energía eléctrica que simula el consumo eléctrico de una vivienda pequeña. En la planta se realizaron pruebas a diferentes cargas, para evaluar el consumo específico de combustible (CEC) y emisiones gaseosas (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y otros gases). Se utilizó biodiésel de aceite de higuera (H), aceite de fritura usado (AFU) y aceite de palma (P), mezclados con petrodiesel, en una relación de 1:4 (B20), en mezclas binarias y terciarias de biodiésel. Se encontró que el CEC del motor es directamente proporcional a la carga que se le imponga a este; mientras que la combustión interna del motor es independiente de la carga impuesta a la planta eléctrica, pero dependiente del tipo de combustible con el que se alimenta. La mezcla de combustibles que logró minimizar el CEC y las emisiones gaseosas fue la mezcla D80/P10/AFU10.

### Palabras clave

Combustibles diésel, energía eléctrica, consumo de energía eléctrica, conductores orgánicos.

### Abstract

This article shows the effect of three different biodiesel blended with diesel on the operation of an electric power plant by simulating power consumption in a small house. Three different loads were tested in the plant in order to evaluate specific fuel consumption (SFC), and gaseous emissions (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and others gases). It used castor oil biodiesel (CO), as well as frying oil (UFO) and palm oil (P), mixed up with diesel in a ratio of 1:4 (B20), in binary and tertiary blends of biodiesel. It was found that the SFC of the motor is directly proportional to the load it receives, while the internal combustion engine is independent from the load imposed on the power plant. Nevertheless, it depends on the kind of fuel used. The mix of fuels that was able to minimize the SFC and the gaseous mixture was D80/P10/UFO10.

### Key words

Diesel fuels, electric power, electric power consumption, organic conductors.

### Resumo

Neste artigo é apresentado o efeito de três tipos diferentes de biodieleses misturados com diesel no funcionamento de um gerador de energia elétrica de uma casa pequena. Foram realizados testes no gerador com diferentes cargas, para avaliar o consumo específico de combustível (CEC) e emissões de gases (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e outros gases). Foi utilizado o biodiesel de óleo de mamona (H), óleo de fritura usado (AFU) e óleo de dendê (P), misturados com diesel, numa relação de 1:4 (B20), em misturas binárias e terciárias de biodiesel. Encontrou-se que o CEC do motor é diretamente proporcional à carga que lhe for aplicada; enquanto que a combustão interna do motor é independente da carga imposta ao gerador elétrico, mas dependente do tipo de combustível com o que se alimenta. A mistura de combustíveis que conseguiu minimizar o CEC e as emissões gasosas foi a mistura D80/P10/AFU10.

### Palavras chave

Combustíveis diesel, energia elétrica, consumo de energia elétrica, condutores orgânicos.

## Introducción

El biodiésel es un combustible líquido de origen biológico, proveniente de diferentes fuentes renovables —por ejemplo, aceites vegetales, grasas animales, aceites de fritura usado e incluso de microorganismos fotosintéticos como algas y hongos—. El biodiésel es producto de la transesterificación de los aceites y grasas con un alcohol de cadena corta, en presencia de un catalizador ácido, básico o enzimático (Zhang et ál., 2003; Meher et ál., 2006).

La transesterificación, también llamada alcoholólisis, consiste en tres reacciones consecutivas y reversibles, en la cual los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, monoglicéridos y glicerina. En cada reacción se produce un mol de alquil éster (biodiésel). Por lo tanto, al final de las tres reacciones, se obtienen tres moles de alquil éster y un mol glicerina, a partir de un mol de triglicérido y tres moles de alcohol (Conceição et ál., 2007; Miliarium, 2009). Durante el proceso de transesterificación se produce glicerol o glicerina, el cual tiene muchas aplicaciones tradicionales en la industria farmacéutica, cosmética, de alimentos, en la preparación de jabón, en producción de polímeros, entre otros. Sin embargo, debido a la gran producción de glicerina, se han estudiado otras aplicaciones, como suplemento en la alimentación animal, materia prima en fermentaciones, polímeros, surfactantes y lubricantes, producción de biogás, biohidrógeno y bioetanol (Vicente et ál., 2006).

Como combustible, el biodiésel se caracteriza por que está prácticamente libre de azufre y aromáticos; tiene un alto número de cetano, contenido medio de oxígeno y mayor punto de ignición; reduce las emisiones de material particulado, de hidrocarburos parcialmente quemados (HC), de monóxido de carbono (CO), de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); es no tóxico, y es biodegradable, aunque puede causar un incremento en las emisiones de óxidos de nitrógeno (Alcántara et ál., 2000; Lin et ál., 2006). Además, es obtenido a partir de fuentes renovables, lo que permite establecer un ciclo cerrado de carbono que se absorbe cuando la planta crece y se libera cuando se quema en el motor de combustión

(Ma et ál., 1999; Barbosa et ál., 2008). Por lo tanto, el biodiésel se convierte en un combustible apropiado para ser utilizado en lugares ecológicos y ambientalmente sensibles, como lagos, parques nacionales y comunidades aisladas (zonas no interconectadas) (Conceição et ál., 2007).

El uso de biodiésel como combustible en motores tiene éxito, siempre y cuando no se requieran grandes modificaciones en el motor ni se presenten problemas a largo plazo, y al mismo tiempo, que la potencia y el consumo no se vean muy afectadas. Actualmente, los vehículos convencionales no demandan modificar el motor, salvo en modelos anteriores a 1998, año en el que se cambian los mangueras y empaques de goma (NBR) por un material más resistente (el biodiésel disuelve el NBR) (Herrero y Maiza, 2008).

Se ha encontrado que tanto el deterioro del motor como su rendimiento son similares al utilizar diésel o mezclas de biodiésel/diésel. Sin embargo, estos parámetros varían respecto a la materia prima utilizada para la producción del biodiésel (Agudelo et ál., 2003) y al aumento de la proporción de biodiésel en la mezcla. Esto último se debe al menor poder calorífico del biodiésel respecto al petrodiésel (Journey Forever, 2009). Además del poder calorífico, propiedades como la densidad y la viscosidad influyen en el rendimiento del motor y las emisiones gaseosas (Canakci, 2009).

Las investigaciones realizadas en cuanto a mezclas de biodiésel de diferentes fuentes que cumplan con los parámetros establecidos en el ámbito internacional son muy limitadas; una de ellas es la mezcla de biodiésel de palma y jatrofa (Sarin, Sharma y Sinharay, 2006). También se han hallado investigaciones en las que se produce biodiésel al mezclar aceites de diferentes fuentes vegetales, como es el caso de mezclas de aceite de fritura usado con aceite de canola (Issariyakul et ál., 2008), y mezclas de aceites de algodón, higuierilla y soya (Plentz et ál., 2007).

El objetivo de este artículo es mostrar el efecto de tres diferentes biodieseles mezclados con diésel en el funcionamiento de una planta de generación de energía eléctrica, simulando el consumo energético de una vivienda constituida por diez bombillos, una estufa eléctrica de una hornilla, una plancha y un ventilador, a fin de determinar el consumo específico de combustible y las emisiones gaseosas.

## 1. Materiales y métodos

Los biocombustibles utilizados son mezclas de biodiésel provenientes del aceite de palma (P), aceite de higuierilla (H) y aceite de fritura usado (AFU). El biodiésel de AFU se obtuvo por metanólisis básica en el Laboratorio de Fitoquímica

de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira; el biodiésel de P fue adquirido por medio de la empresa BIO-D, hecho por metanólisis básica; el biodiésel de H se obtuvo por etanólisis básica, hecho en el laboratorio de Plantas Piloto de Biotecnología y Agroindustria de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, y el petrodiesel se adquirió en una estación de servicio, el cual no se encuentra mezclado con biodiésel.

Los biodieseles puros se mezclaron individualmente con diésel (mezclas primarias). Igualmente, se prepararon mezclas binarias y ternarias de los tres biodieseles con petrodiesel, manteniendo siempre una proporción de 20% de biodiésel y 80% de diésel. Esto con el fin de cumplir con el Decreto 2629 de 2007, donde se fomenta el uso de biocombustibles en mezclas con combustibles fósiles, que para el 2012 debe ser del 20% de biodiésel (B20).

El diésel, los biodiésel puros y las mezclas de biocombustibles se caracterizaron respecto a la viscosidad, índice de acidez, punto de inflamación, cenizas sulfatadas, índice de yodo, poder calorífico inferior y densidad, y se compararon de acuerdo con los criterios dados en las NTC 1438 y NTC 5444. Todos los biocombustibles se sometieron a evaluación en una planta de generación de energía eléctrica a diferentes cargas (carga 0: sin carga eléctrica; carga 1: 10 bombillos de 60 W; carga 2: 10 bombillos y una estufa de una boquilla; carga 3: 10 bombillos, una estufa de una boquilla y un ventilador, y carga 4: 10 bombillos, una estufa, un ventilador y una plancha) (Figura 1).

Figura 1. Sistema de simulación de una casa



Fuente: presentación propia de los autores.

La planta eléctrica, de marca KAMA modelo KDE 6500T, está constituida por un generador acoplado a un motor diésel monocilíndrico, con un sistema de refrigeración por aire y un sistema de inyección directa de combustible y de aire, del cual no se midió su caudal de entrada al motor. Este último tiene una potencia máxima de 6,3 kW a 3.600 rpm, una frecuencia de 60 Hz, un voltaje de 240/120 V y una capacidad en el depósito de combustible de 16 L.

Para el análisis de funcionamiento del motor diésel se estableció un consumo de 100 ml, durante el cual se cuantificó el tiempo de consumo y las emisiones de gases. También se cuantificaron las revoluciones por minuto del eje central del motor, por medio de un tacómetro digital marca ERASMUS ERC-100; y la intensidad de corriente requerida por cada carga en la planta eléctrica con una pinza amperimétrica marca ERASMUS EPV-32. La cuantificación del consumo específico de combustible (CEC) y la potencia eléctrica aplicada se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$CEC = \frac{CC * \rho_{mezcla}}{t * P} \quad (1)$$

Donde  $CEC$  es el consumo específico de combustible (g/kWh),  $CC$  es el consumo de combustible (100 cm<sup>3</sup>),  $\rho_{mezcla}$  es la densidad de la mezcla a 15 °C (g/cm<sup>3</sup>),  $P$  es la potencia del motor (6,3 kW) y  $t$  es el tiempo de consumo (h).

$$P_{Eléctrica} = V * I \quad (2)$$

Aquí  $P_{Eléctrica}$  es la potencia eléctrica (W),  $V$  es el voltaje (120 V) e  $I$  es la corriente (A).

Para la cuantificación de las emisiones gaseosas, se utilizó un analizador Orsat, el cual permite determinar la composición porcentual en volumen (medición cuantitativa) en base seca de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, y de otros gases, a la salida del tubo de escape, al cual se le adaptó un embudo de aluminio para reducir la velocidad de los gases y no afectar la medida de las emisiones gaseosas (Doolittle, 1962; Huertas, 2008).

## 2. Resultados y discusión

### 2.1 Caracterización de los combustibles

En la Tabla 1 se muestra la caracterización físico-química (viscosidad, índice de acidez, punto de inflamación, cenizas sulfatadas, índice de yodo, poder calorífico

inferior y densidad) de los biocombustibles utilizados en la generación de energía eléctrica. En esta tabla se observa que tanto el diésel (D100) como el biodiésel de palma (P100) y de AFU (AFU100) cumplen con la normatividad colombiana; mientras que el biodiésel del aceite de higuerrilla (H100) no cumple con la normatividad colombiana respecto a la viscosidad cinemática, cenizas sulfatadas, densidad y poder calorífica. Entre los biocombustibles puros, el biodiésel de higuerrilla reporta el más bajo poder calorífico, mientras que el biodiésel de palma tiene mayor poder calorífica de los tres.

Tabla 1. Caracterización química de las mezclas de biodiésel

Combustible	Viscosidad cinemática a 40 °C ASTM 445	Índice de acidez (mg NaOH/g) ASTM D664	Punto de inflamación (°C) ASTM D93	Cenizas sulfatadas (% masa) ASTM D874	Índice de yodo (g yodo/100 g) HANUS	Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) a 15 °C	Poder calorífico superior (kcal/kg)
Diésel según NTC 1438	1,9-5,0	---	52 min.	0,01 máx.	---	---	+/- 45000
B100 según NTC 5444	1,9-6,0	0,5 máx.	120 min.	0,02 máx.	120 máx.	0,86-0,90	+/- 39000
D100	3,9	0,5	68	< 0,01	0,01	0,904	45605,60
P100	4,7	0,2	168	< 0,01	12,68	0,911	40095,27
H100	26,1	0,3	270	0,09	6,76	0,985	37823,36
AFU100	6,8	1,6	146	< 0,01	17,53	0,933	39990,67
D80/P20	4,0	0,5	69	< 0,01	3,58	0,906	44597,26
D80/H20	9,7	0,5	65	0,03	2,76	0,903	44902,69
D80/AFU20	4,4	0,8	73	< 0,01	5,90	0,908	45505,18
D80/P10/ H10	6,2	0,4	98,2	< 0,01	1,95	0,903	44276,34
D80/P10/ AFU10	4,3	0,6	85,8	0,01	3,03	0,902	44493,07
D80/H10/ AFU10	4,6	0,6	71	< 0,01	3,51	0,907	44254,17
D80/P10/ H5/AFU5	4,1	0,5	71	< 0,01	4,38	0,904	43902,71
D80/H10/ P5/AFU5	6,3	0,5	97,1	0,02	1,66	0,908	44271,11
D80/ AFU10/P5/ H5	5,3	0,6	90,9	0,01	2,73	0,904	44379,49
D80/P6.67/ H6.67/ AFU6.67	5,3	0,5	93,3	0,02	2,92	0,909	44349,03

Fuente: presentación propia de los autores.

Para establecer la calidad de las mezclas biodiésel/diésel, se compararon las características de dichas mezclas con las normas NTC 5444 y NTC 1438, dado que en Colombia no existe una normatividad para las mezclas biodiésel/diésel. Se encontró que las mezclas formuladas cumplen con dichas normas, excepto algunas mezclas que contienen higuierilla en una proporción mayor al 6,67%. De igual manera se observa que la mezcla de mayor poder calorífica es D80/AFU20 (aunque es muy similar al poder calorífico de la mezcla D80/H20), mientras que la mezcla D80/P10/H5/AFU5 reporta el valor más bajo de poder calorífico.

## 2.2 Pruebas de funcionamiento

En las tablas 2, 3, 4 y 5 se presentan los resultados del tiempo de consumo de biocombustible, velocidad del motor, potencia eléctrica y consumo específico de combustible, para los combustibles puros, las mezclas binarias y las ternarias de los tres biodieseles. En estas tablas se observa que la velocidad del motor permaneció en el rango de 3.500 a 3.600 rpm, lo cual se debe a que el motor se autorregula para mantener aproximadamente constante su velocidad a la cual está programado (3.600 rpm).

De igual manera se observa que el tiempo de consumo de los 100 ml de biocombustible disminuye al aumentar la carga eléctrica exigida al generador. Esto es de esperarse, debido a que el motor se exige para mantener sus revoluciones cercanas a 3.600. También se observa que la potencia eléctrica exigida al generador es aproximadamente la misma para todos los biocombustibles evaluados en la planta eléctrica, porque siempre se trabaja en la misma secuencia de carga con los mismos equipos (diez bombillos, una estufa eléctrica, un ventilador y una plancha) a los que se les suministra la energía generada.

Se analizó el efecto del tipo de biocombustible sobre el consumo específico en la planta eléctrica. Para ello los biocombustibles se dividieron en cuatro grupos: 1) los biocombustibles puros (petrodiesel, biodiésel de higuierilla, de palma y de aceite de fritura usado); 2) las mezclas de petrodiesel con cada de uno de los biodieseles (D80/P20, D80/H20 y D80/AFU20); 3) las mezclas binarias de biodiésel con petrodiesel (D80/P10/H10, D80/P10/AFU10 y D80/H10/AFU10), y 4) las mezclas ternarias de biodiésel con petrodiesel (D80/P10/H5/AFU5, D80/H10/P5/AFU5, D80/AFU10/P5//H5, y D80/P6.67/H6.67/AFU6.67).

### 2.2.1 Biocombustibles puros

Los resultados de funcionamiento de la planta eléctrica empleando los biocombustibles puros se muestran en la Tabla 2. En esta se observa que el consumo

específico de combustible es diferente para cada uno de ellos, de tal manera que el biodiésel de palma es el biocombustible que presenta menor consumo, mientras que el biodiésel de higuerilla es el de mayor CEC de los tres biocombustibles, lo cual posiblemente se debe a su alta viscosidad y bajo poder calorífico.

**Tabla 2. Funcionamiento de la planta eléctrica con los combustibles puros**

Combustible	Carga	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	CEC (g/kWh)
D100	0	0,122	3579,3	0,0	117,61
	1	0,106	3622,33	0,57	135,37
	2	0,087	3599,66	1,49	144,93
	3	0,094	3623,44	1,52	152,65
	4	0,093	3624,66	2,40	154,29
P100	0	0,126	3528,50	0,0	112,76
	1	0,116	3520,17	0,57	124,66
	2	0,109	3493,16	1,48	132,66
	3	0,096	3489,00	1,56	150,63
	4	0,089	3472,67	2,48	162,47
H100	0	0,139	3555,65	0,0	112,48
	1	0,112	3522,17	0,58	139,60
	2	0,089	3540,00	1,49	175,67
	3	0,088	3532,17	1,56	177,67
	4	0,080	3524,67	2,48	195,44
AFU100	0	0,122	3597,83	0,0	121,39
	1	0,113	3562,33	0,54	131,06
	2	0,091	3556,33	1,49	162,74
	3	0,087	3551,50	1,58	170,22
	4	0,085	3563,66	2,41	174,23

Fuente: presentación propia de los autores.

Además, como era de esperarse, se observan aumentos en el consumo específico de combustible a medida que se aumenta la carga en la planta eléctrica. También, una gran diferencia entre la carga 1 y la carga 2, ya que hay un aumento significativo del consumo específico, debido a que en esta carga se conectó una estufa de una boquilla, que demanda mayor carga eléctrica que los diez bombillos. Aunque se esperaba que el CEC de la carga 4 fuera mucho mayor por el uso de la plancha, se encontró que en algunos casos el aumento del CEC no fue importante, porque el termostato de la plancha, al calentarse a cierta temperatura, se dispara y no vuelve a consumir energía hasta cuando la temperatura baja a un valor determinado. Este comportamiento se observó en casi todas la mezclas utilizadas.

### 2.2.2 Mezclas de diésel con un biodiésel

Los resultados del funcionamiento de la planta eléctrica para los biocombustibles que resultan de mezclar cada biodiésel con petrodiésel se muestran en la Tabla 3. En esta se observa que la mezcla D80/AFU20 reporta un aumento considerable en el CEC, mientras que la mezcla D80/H20 muestra el menor CEC de las tres mezclas. Esto posiblemente se debe a la alta viscosidad de la mezcla D80/H20 (9,7 mm<sup>2</sup>/s), que provoca un menor consumo de combustible debido a su baja fluidez. Igualmente, se observa una gran diferencia entre la carga 1 y la carga 2, por un aumento significativo del consumo específico, demandado por la estufa de una boquilla y a que el CEC de la carga 4 no fue tan alto, dado el uso de una plancha con regulador de temperatura.

**Tabla 3. Funcionamiento de la planta eléctrica con los mezclas de biodiésel al 20%**

Combustible	Carga	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	CEC (g/kWh)
D80/P20	0	0,140	3562,85	0,0	102,72
	1	0,122	3543,00	0,55	117,88
	2	0,102	3528,65	1,47	138,99
	3	0,104	3528,50	1,57	140,28
	4	0,088	3562,50	2,40	163,42
D80/H20	0	0,148	3559,50	0,0	96,85
	1	0,127	3555,00	0,56	112,86
	2	0,110	3552,50	1,49	130,30
	3	0,102	3543,50	1,56	140,52
	4	0,095	3559,00	2,41	150,88
D80/AFU20	0	0,127	3596,83	0,0	113,49
	1	0,116	3599,50	0,56	124,25
	2	0,095	3581,50	1,51	151,71
	3	0,090	3574,83	1,58	160,14
	4	0,087	3582,50	2,40	165,66

Fuente: presentación propia de los autores.

### 2.2.3 Mezclas de diésel con dos biocombustibles al 10% cada uno

En la Tabla 4 se presentan los resultados de funcionamiento de la planta eléctrica cuando se utilizan mezclas binarias de biocombustible (a una concentración del 10% v/v cada uno) con petrodiésel. En esta tabla se muestra la influencia de las tres mezclas en el CEC y se encontró un comportamiento similar entre las mezclas.

Tabla 4. Funcionamiento de la planta eléctrica con los mezclas de dos biocombustibles al 10%

Combustible	Carga	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	CEC (g/kWh)
D80/P10/H10	0	0,140	3564,00	0,00	102,38
	1	0,124	3534,50	0,51	115,59
	2	0,104	3528,17	1,45	137,82
	3	0,101	3529,67	1,48	141,33
	4	0,100	3537,66	2,47	143,91
D80/P10/AFU10	0	0,144	3527,66	0,00	99,43
	1	0,132	3570,66	0,56	108,47
	2	0,106	3499,83	1,54	135,36
	3	0,105	3492,99	1,57	136,07
	4	0,096	35230,99	2,41	149,14
D80/H10/AFU10	0	0,140	3568,00	0,00	102,83
	1	0,125	3548,50	0,57	115,17
	2	0,101	3542,50	1,50	142,54
	3	0,098	3548,00	1,55	146,90
	4	0,093	3560,00	2,40	154,80

Fuente: presentación propia de los autores.

Sin embargo, el menor consumo de combustible se reporta en la mezcla D80/P10/AFU10; mientras que se observa un incremento en el CEC por parte de la mezcla D80/H10/AFU10. Esto se debe a la presencia de una proporción considerable de biodiésel de higuerilla en la mezcla, pues es el biodiésel que reporta el menor poder calorífico de los tres biocombustibles puros.

#### 2.2.4 Mezclas de diésel con un biocombustible al 10% y dos al 5%

La Tabla 5 muestra la influencia de las mezclas ternarias de biodiésel (un biodiésel al 10% y dos al 5% v/v) y petrodiesel en el funcionamiento de la planta de generación de energía eléctrica. Se observa una notoria disminución del consumo específico de combustible en la mezcla D80/P10/H5/AFU5 y aumento en la mezcla D80/AFU10/P5/H5.

Tabla 5. Funcionamiento de la planta eléctrica con mezclas de un biodiésel al 10% y dos al 5%

Combustible	Carga	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	CEC (g/kWh)
D80/P10/H5/ AFU5	0	0,136	3571,83	0,00	105,51
	1	0,129	3544,66	0,56	111,23
	2	0,105	3523,67	1,48	139,66
	3	0,100	3517,66	1,55	143,49
	4	0,092	3520,16	2,47	155,97

Continúa

Combustible	Carga	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Potencia (kW)	CEC (g/kWh)
D80/H10/P5/ AFU5	0	0,141	3549,33	0,00	102,22
	1	0,119	3549,66	0,57	121,11
	2	0,103	3520,66	1,49	139,93
	3	0,100	3519,33	1,54	144,13
	4	0,090	3527,16	2,50	160,14
D80/AFU10/P5/ H5	0	0,139	3555,65	0,00	103,23
	1	0,112	3522,17	0,58	128,12
	2	0,089	3540,00	1,49	161,23
	3	0,088	3532,17	1,56	163,06
	4	0,080	3524,67	2,48	179,36
D80/P6.67/ H6.67/ AFU6.67	0	0,142	3582,16	0,00	101,61
	1	0,113	3538,33	0,57	127,69
	2	0,102	3519,20	1,36	141,46
	3	0,101	3515,99	1,56	142,86
	4	0,089	3524,66	2,48	162,12

Fuente: presentación propia de los autores.

### 2.3 Emisiones gaseosas

Los resultados del análisis de gases de combustión en la planta eléctrica para las diferentes mezclas de biocombustibles evaluadas se presentan en las tablas 6, 7, 8 y 9. Este análisis se presenta para los mismos cuatro grupos dados en el numeral anterior: 1) biocombustibles puros (Tabla 6); 2) mezclas de petrodiesel con cada uno de los biodiesel (Tabla 7); 3) mezclas binarias de biodiesel con petrodiesel (Tabla 8), y 4) mezclas ternarias de biodiesel con petrodiesel (Tabla 9).

#### 2.3.1 Combustibles puros

Los resultados de las emisiones gaseosas de la planta de generación de energía utilizando los combustibles puros se presentan en la Tabla 6. En esta tabla se observa una gran producción de CO por parte del diésel de petróleo (D100), mientras que con los biodieseles puros se observa una disminución importante respecto al diésel de petróleo puro. No obstante, se producen altos porcentajes de CO<sub>2</sub>, lo cual no afecta considerablemente el ambiente, dado que este gas es adsorbido por las plantas y liberado durante la combustión del biodiesel. Esto hace atractivo el uso de biocombustibles, ya que se puede llegar a concluir que la utilización de biocombustibles en motores diésel mejora considerablemente la combustión interna del motor.

Tabla 6. Emisiones gaseosas de combustibles puros

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D100	0	4,06	21,63	26,60	47,68
	1	3,76	20,25	22,90	53,07
	2	5,83	22,31	27,69	43,41
	3	4,95	13,93	14,19	66,92
	4	5,56	14,08	14,94	65,40
P100	0	1,90	4,18	3,96	89,96
	1	2,20	5,01	5,05	87,74
	2	3,35	5,23	4,53	86,90
	3	2,55	4,26	4,17	89,02
	4	3,90	8,58	9,75	77,76
H100	0	2,45	2,72	1,85	92,98
	1	2,50	3,69	3,27	90,54
	2	2,20	3,48	3,16	91,17
	3	2,90	3,96	3,69	89,44
	4	3,40	4,50	3,87	88,23
AFU100	0	3,95	7,65	7,49	80,90
	1	4,00	8,22	8,52	79,25
	2	5,30	10,26	11,40	73,03
	3	5,15	9,38	9,54	75,92
	4	5,10	9,00	9,27	76,62

Fuente: presentación propia de los autores.

### 2.3.2 Mezclas de diésel y un biocombustible

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las emisiones gaseosas de la planta eléctrica utilizando mezclas de biodiésel de palma, de higuerilla y de aceite de fritura usado, en forma individual, con petrodiesel (B20). En la tabla se observa que se obtiene una mejor combustión con la mezcla de B20 proveniente de aceite palma (D80/P20), ya que la producción de CO durante la combustión es baja, lo que indica una combustión parcialmente completa, aunque esta baja producción de CO conlleva una alta producción de otro tipo de gases. También es evidente la baja producción de CO<sub>2</sub> por parte de esta mezcla. La mezcla B20 proveniente de higuerilla (D80/H20) presentó la más alta producción de CO e indica una combustión incompleta de la mezcla, que posiblemente se debe a la alta viscosidad de la misma (9,7 mm<sup>2</sup>/s).

Tabla 7. Emisiones gaseosas de los biocombustibles al 20%

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D80/P20	0	4,65	3,88	4,98	86,49
	1	4,25	6,11	6,16	83,48
	2	5,05	7,48	7,00	80,48
	3	4,90	7,73	7,29	80,09
	4	4,20	5,74	6,08	83,97
D80/H20	0	7,20	10,56	11,31	70,93
	1	7,60	13,53	31,89	46,99
	2	7,50	8,54	31,60	52,36
	3	8,35	12,33	19,05	60,27
	4	9,20	14,32	18,97	57,52
D80/AFU20	0	5,30	11,98	11,70	71,02
	1	4,25	10,55	11,30	73,89
	2	5,75	12,41	12,05	69,78
	3	5,25	10,97	11,21	72,56
	4	7,00	13,47	13,67	65,85

Fuente: presentación propia de los autores.

### 2.3.3 Mezclas de diésel con dos biocombustibles al 10% cada uno

La Tabla 8 muestra los resultados del análisis de gases emitidos por la planta de generación de energía eléctrica para mezclas binarias de biodiésel de palma, de higuierilla y de aceite de fritura usado al 10% cada uno, con diésel al 80%. En esta tabla se observa una baja combustión de la mezcla que contiene higuierilla y AFU, ya que la producción de CO es relativamente alta respecto a las mezclas que contienen biodiésel de palma.

Tabla 8. Emisiones gaseosas de dos biocombustibles al 10%

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D80/P10/H10	0	2,50	5,03	4,42	88,06
	1	2,95	4,12	4,95	87,98
	2	3,05	4,44	4,86	87,66
	3	3,15	4,54	4,71	87,60
	4	3,05	4,54	4,08	88,33
D80/P10/AFU10	0	4,96	8,42	7,50	79,12
	1	3,50	5,03	4,89	86,59
	2	4,10	4,43	3,81	87,66
	3	4,05	7,19	6,98	81,78
	4	4,80	5,78	6,24	83,18

Continúa

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D80/H10/AFU10	0	7,10	9,53	16,57	66,81
	1	7,60	13,53	31,89	46,99
	2	7,50	8,54	31,60	52,36
	3	8,35	12,33	19,05	60,27
	4	9,20	14,32	18,97	57,52

Fuente: presentación propia de los autores.

Sin embargo, la mezcla que contiene higuerilla y palma reporta el más bajo porcentaje de CO emitido, aunque con una producción intermedia de CO<sub>2</sub>. La mezcla que contiene biodiésel de palma y de AFU se caracteriza por presentar los mayores valores de CO y CO<sub>2</sub>. Esto indica que aunque se presenten valores altos de CO, hay una mayor eficiencia en la combustión, debido a que se reduce la cantidad de hidrocarburos inquemados, lo cual se evidencia en los valores bajos de los otros gases, comparado con las dos mezclas de este grupo.

#### 2.3.4 Mezclas de diésel con un biocombustible al 10% y dos al 5%

En la Tabla 9 se presentan los resultados de las emisiones gaseosas de la planta de generación de energía eléctrica para mezclas ternarias de biodiésel de palma, de higuerilla y de AFU, al 10% uno de ellos y al 5% los otros dos biocombustibles, con petrodiésel al 80%. De acuerdo con la Tabla 9, se observa una gran disminución de las emisiones gaseosas de CO y CO<sub>2</sub> en las mezclas evaluadas de este grupo en comparación con las mezclas evaluadas. Esto indica que la combustión interna del motor es incompleta con este tipo de mezclas, pero predominan los altos porcentajes de otros gases, entre los que están los hidrocarburos inquemados.

Tabla 9. Emisiones gaseosas mezclas de un biocombustible al 10% y dos al 5%

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D80/P10/H5/AFU5	0	2,40	4,05	3,70	89,86
	1	3,10	3,61	3,37	89,92
	2	3,60	4,41	4,54	87,45
	3	3,40	3,93	3,85	88,82
	4	4,05	5,37	5,54	85,05
D80/H10/P5/AFU5	0	2,90	3,91	3,07	90,12
	1	2,75	3,91	3,64	89,70
	2	3,70	5,09	5,26	85,95
	3	3,55	4,41	4,33	87,71
	4	3,70	4,83	4,98	86,49

Continúa

Combustible	Carga	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO (%)	Otros gases
D80/AFU10/P5/H5	0	2,65	3,24	2,22	91,89
	1	2,65	3,54	3,21	90,60
	2	6,15	7,99	7,35	78,51
	3	3,40	5,80	5,30	85,51
	4	4,20	6,11	5,84	83,85
D80/P6.67/H6.67/AFU6.67	0	2,35	3,43	3,83	90,39
	1	2,75	3,80	4,05	89,40
	2	2,95	4,07	4,22	88,76
	3	2,60	4,06	3,70	89,65
	4	3,10	4,59	4,29	88,02

Fuente: presentación propia de los autores.

### 3. Conclusiones

El consumo específico de combustible de un motor es directamente proporcional a la carga eléctrica que se le exige a este. Por otro lado, la combustión interna del motor es independiente de la carga eléctrica impuesta a la planta, ya que la combustión depende del tipo de combustible con el que se alimenta.

En términos generales, se encontró que con el empleo de biodiésel proveniente de fuentes vegetales diferentes a la palma y la mezcla de estas con diésel se obtienen reducciones en el consumo específico de combustible y se observa que los menores consumos se reportaron en las mezclas D80/H20 y D80/P10/AFU10.

Se comprobó que el mejor biodiésel es el proveniente del aceite de palma, ya que este minimiza las emisiones gaseosas, aunque el uso de H100 también minimiza en altos porcentajes las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO. Pero los resultados más destacados se obtuvieron con las mezclas D80/P10/AFU10 y D80/AFU10/P5/H5, las cuales lograron aumentar la producción de CO<sub>2</sub> y disminuir la producción de CO.

La mezcla de combustibles que mejor comportamiento mostró respecto a la reducción del consumo específico de combustible y emisiones gaseosas fue la mezcla D80/P10/AFU10, por cuanto representa un gran atractivo para su utilización, ya que el aceite de fritura usado es un residuo de bajo costo que puede ser reutilizado, a fin de reducir el costo del biocombustible.

### Referencias

AGUDELO, J. R.; BENJUMEA, P.; GÓMEZ, E. y PÉREZ, J. F. Biodiesel una revisión del desempeño mecánico y ambiental. *Revista de Ingeniería & Desarrollo*. 2003, núm. 13, pp. 1-14.

- ALCÁNTARA, R.; AMORES, J.; CANOIRA, L.; HIDALGO, E.; FRANCO, M. J. y NAVARRO, A. Catalytic production of biodiesel from soybean oil, used frying oil and tallow. *Biomass & Bioenergy*. 2000, num. 18, pp. 515-527.
- BARBOSA, R. L.; MOREIRA, D. S. y FABIO, S. N. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. *Ciência e Agrotecnologia*. 2008, núm. 32, pp. 1588-1593.
- CANAKCI, M.; OZSEZEN, A. N.; ARCAKLIOGLU, E. y ERDIL, A. Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil. *Expert systems with Applications*. 2009, num. 36, pp. 9268-9280.
- CONCEICÃO, M. M.; CANDEIAB, L. A.; SILVA F. C.; BEZERRAB, A. F.; FERNANDEZ, V. J. y SOUZA, A. G. Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, núm. 11, pp. 964-975.
- DOOLITTE, J. S. *El laboratorio del ingeniero mecánico*. Buenos Aires: Hispanoamérica, 1962.
- HERRERO, R. y MAIZA, I. *Influencia de los biocombustibles sobre los materiales plásticos empleados en automoción*. Navarra: Centro Multidisciplinar de Innovación y Tecnología de Navarra (CEMITEC), 2008.
- HUERTAS, J. I. *Curso de capacitación en combustión, laboratorio no. 8 medición de gases con Orsat*. Toluca: Centro de Investigación en Ingeniería Automotriz (CIMA)-Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, 2008.
- ISSARIYAKUL, T.; KULKARNI, M. G.; MEHER, L. C.; DALAI, A. K. y BAKHSHI, N. N. Biodiesel production from mixtures of canola oil and used cooking oil. *Chemical Engineering Journal*. 2008, vol. 140, pp. 77-85.
- JOURNEY FOREVER. El biodiesel y tu vehículo [documento en línea]. <<http://www.journeytoforever.org>> [Consulta: 03-11-2009].
- LIN, C. Y.; LIN, H. A. y HUNG, L. B. Fuel structure and properties of biodiesel produced by the per oxidation process. *Fuel*. 2006, núm. 85, pp. 1742-1749.
- MA, F. y HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*. 1999, núm. 70, pp. 1-15.
- MEHER, L.; VIDYA, S. y NAIK, S. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2006, núm. 10, pp. 248-268.
- MILIARIUM. *Generalidades del biodiesel* [documento en línea]. <<http://www.miliarium.com/Monografías/>> [Consulta: 27-10-2009].
- PLENTZ, S. M.; MENEGHETTI, M. R.; SERRA, T. M.; BARBOSA, D. C.; WOLF, C. R. Biodiesel production from vegetable oil mixtures. Cottonseed, soybean, and castor oils. *Energy & Fuels*. 2007, núm. 21, pp. 3746-3747.
- SARIN, R.; SHARMA, M. y SINHARAY, M. Jatropha-palm biodiesel blends. An optimum mix for Asia. *Fuel*. 2006, núm. 86, pp. 1365-1371.

- VICENTE, G.; MARTÍNEZ, M. y ARACIL, J. A comparative study of vegetable oils for biodiesel production in Spain. *Energy & Fuels*. 2006, núm. 20, pp. 394-398.
- ZHANG, Y.; DUBÉ, M.; MCCLEAN, D. y KATES M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*. 2003, núm. 89, pp. 1-16.