

Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. N.º 42. pp. 79-93. Diciembre, 2007

Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diesel-biogás para generación de electricidad

Effect of the engine load level and pilot fuel quantity on the mechanical and environmental performance of a dual-fuel compression ignition engine in power generation

*Iván Darío Bedoya Caro**, *Andrés Amell Arrieta*, *Francisco Javier Cadavid*, *Jhon Alexander Pareja*

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía.
Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Apartado Aéreo 1226,
Medellín, Colombia.

(Recibido el 13 de abril de 2007. Aceptado el 10 de agosto de 2007)

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización mecánica y ambiental de un motor de encendido por compresión (MEC) para generación de electricidad, operando con diesel y en modo dual diesel-biogás. El motor ha sido acoplado a un generador eléctrico y evaluado a un régimen de 1.800 rpm con varios grados de carga, el biogás se ha simulado con una composición típica de 60% metano (CH₄) y 40% de dióxido de carbono (CO₂). Se han encontrado disminuciones en la eficiencia efectiva al reducir la cantidad de combustible piloto en modo dual, al igual que aumentos considerables en las emisiones de CH₄ y monóxido de carbono (CO), la opacidad del humo no varía significativamente en modo dual, pero muestra una reducción drástica al compararla con las medidas para el motor en modo diesel. Los resultados obtenidos confirman la importancia del uso del biogás como alternativa para mecanismos de desarrollo limpio y como aporte a la disminución de la dependencia energética y económica de los combustibles fósiles

----- *Palabras clave:* motor dual, biogás, grado de carga, emisiones contaminantes, combustible piloto.

* Autor de correspondencia: teléfono: +57 +4 +210 55 29, fax: +57 +4 +211 07 05, correo electrónico: ibedoyac@udea.edu.co (I. Bedoya).

Abstract

In this paper, analysis of the mechanical and environmental performances of a compression ignition engine working with diesel and diesel-biogas as fuels is carried out. The engine has been coupled to an electricity generator and tested at a constant speed of 1800 rpm for different loads. The biogas has been simulated from a mixture of methane and carbon dioxide with a fraction of 60% and 40% by volume, respectively. Decreases of the thermal efficiency as well as important increases in methane and carbon monoxide emissions in dual-fuel operation were found when the quantity of pilot fuel was reduced. Opacity varied slightly in dual-fuel operation. However, opacity presented a hard reduction in dual fuel operation with respect to diesel operation. Results validate the importance of using biogas as an alternative for Clean Development Mechanisms and a way to reduce economic fossil fuel dependency.

----- *Key words:* dual engine, biogas, engine load, pollutant emission, pilot fuel.

Introducción

La utilización de MEC en operación dual ha sido ampliamente estudiada por sus beneficios para la reducción de emisiones como óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado, típicas del motor diesel. En un MEC convertido a operación dual, se admite una mezcla aire-combustible gaseoso, denominado primario, el cual puede ser gas natural, metano, propano, biogás, gas licuado de petróleo (GLP), etc., al final de la carrera de compresión se inyecta una cantidad determinada de diesel, denominado piloto, el cual dadas las condiciones de alta presión y temperatura al interior del cilindro, se autoenciende e inicia el proceso de combustión de la mezcla aire-combustible primario-piloto-gases residuales. Se han obtenido niveles de sustitución de combustible diesel superior a 80% en operación dual [1, 2, 3], pero se recomienda no sobrepasar ese valor para no permitir sobrecalentamientos en los inyectores y su acelerado deterioro [4].

El proceso de combustión del motor dual es un híbrido que combina características de los motores de encendido provocado (MEP) y de los MEC, de acuerdo con el tipo de combustible primario, se pueden presentar aumentos importantes en las emisiones de ciertos contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (THC) [5, 6] y metano (CH₄) [7, 8, 9], sobre todo a cargas parciales y mayores niveles de sustitución, donde su funcionamiento es más ineficiente respecto a su homólogo diesel.

En el contexto colombiano, existe un escenario especial para la implementación de motores duales, son las llamadas zonas no interconectadas (ZNI), definidas como aquellas que no reciben energía eléctrica del sistema interconectado nacional (SIN) y están alejadas de su área de cobertura, dichas zonas representan cerca del 64% del territorio colombiano y sus necesidades de electricidad son suplidas casi en su totalidad por plantas de generación accionadas por motores diesel [10]. El suministro de electricidad en las ZNI se ha caracterizado por la baja cobertura, el número reducido de horas de servicio, los altos costos y la falta de esquemas administrativos,

operativos y de mantenimiento [11], ayudando a que estas regiones muestren indicadores de nivel de vida y desarrollo menores a los del resto del país. El mayor problema es la operación poco económica debido al alto costo del diesel (hasta 4 veces del valor comercial en Bogotá), el cual se ve influenciado por la ausencia de vías de transporte adecuadas y restricciones de seguridad que existen para su mercado [10].

Dadas las condiciones antes señaladas, se deben buscar alternativas que reduzcan los costos de generación de electricidad, siendo una de ellas la sustitución de diesel por combustibles alternativos provenientes de biomasa existente en determinadas ZNI. El biogás es un combustible que resulta de la descomposición anaerobia de material orgánico proveniente de diferentes fuentes como rellenos sanitarios, desechos agroindustriales y aguas residuales, su composición es variable: 50-70% CH₄, 25-50% CO₂, 1-5% H₂, 0,3-3 % N₂ y un porcentaje poco significativo de impurezas como H₂S [12, 13].

De otro lado, estudios realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) señalan que el sector agrícola es la mayor fuente de emisión de gases de efecto invernadero, por encima del sector industrial y de transporte, los principales factores que contribuyen a la formación de este tipo de gases son la deforestación de bosques y quema de biomasa, los arrozales y la ganadería [14].

La implementación de los MEC a funcionamiento dual diesel-biogás reduciría considerablemente el consumo de diesel en la generación de electricidad en las ZNI, aportaría en la reducción de emisiones libres de metano a la atmósfera y crearía fuentes de ingreso mediante la implementación de mecanismos de desarrollo limpio (MDL) según las directrices del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas y la Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático [15].

El uso del biogás en operación dual en MEC ha sido estudiado en los trabajos de Bilcan y colaboradores [16, 17] y Henham y Makkar [18]. Los

resultados muestran que para una misma potencia desarrollada, la eficiencia cae con el aumento del CO₂ en el biogás y el porcentaje de sustitución respecto al modo diesel, las emisiones de CO no crecen significativamente con la adición de CO₂ en la composición del biogás, pero sí con el nivel de sustitución [18].

Para el caso del motor dual, las emisiones de NO_x aumentan con el porcentaje de CH₄ en el biogás y el nivel de sustitución por el aumento en la temperatura promedio al interior del cilindro; la adición de CO₂ en el biogás aumenta ligeramente el porcentaje de THC en los gases de escape, al igual que el aumento en el nivel de sustitución, sobre todo a cargas parciales [16].

El desarrollo de la combustión cambia drásticamente al incrementar el nivel de sustitución, ya que se disminuye el pico de tasa de liberación de calor premezclada del diesel e incrementa el pico de combustión difusiva del biogás, sin importar la composición de este último; igualmente, disminuye el tiempo de retraso al aumentar el nivel de sustitución por una compleja interacción de factores: una riqueza de la mezcla más elevada, aumento en la temperatura de los gases residuales y aumento en la capacidad de autoignición del biogás [16].

En el contexto nacional se han realizado varios trabajos en la implementación de motores a funcionamiento dual, los que aparecen documentados están enfocados a la viabilidad técnica de emplear el biogás como combustible primario en MEC [19, 20, 21, 22]. Sin embargo estos estudios no dan mayor información del efecto sobre el desempeño del motor. Cárdenas [22] adelantó estudios comparativos del desempeño de un MEP al operar con biogás. El artículo reporta que la operación empleando biogás mantiene la eficiencia al compararla con la del motor empleando gas natural.

Este trabajo pretende cuantificar el comportamiento de variables de interés en la operación de motores duales diesel-biogás y compararlo con el funcionamiento en modo diesel, para el

planteamiento de estrategias de mejoramiento y hacer más viable su implementación en escenarios que puedan ser beneficiados con este tipo de tecnologías

Experimentación

Montaje

Para la toma de datos se acopló un MEC para aplicaciones estacionarias, por medio de bandas a un generador eléctrico, el cual se seleccionó para operar en el régimen de máximo par (1.800 rpm) a condiciones de Medellín; en la tabla 1 se resumen las características técnicas más importantes del motor de ensayos

Tabla 1 Características del motor de ensayos

<i>Designación comercial</i>	<i>Lister Petter TR 2, DI, 4 tiempos</i>
Número de cilindros	2
Admisión	Natural
Refrigeración	Por aire
Cilindrada	1.550 cm ³
Diámetro x carrera (mm)	98 x 101
Relación de compresión	15,5:1
Potencia nominal	20 kW @ 3.000 rpm
Par nominal	76 Nm @ 1.800 rpm

La simulación de los requerimientos de potencia que se desarrollaron por el conjunto motor-generador se realizó mediante un banco de resistencias variable en un rango de 3 a 10 kW, la potencia desarrollada fue evacuada en forma de calor al ambiente. La figura 1 muestra esquemáticamente el arreglo experimental utilizado para la toma de datos

El suministro de biogás simulado se realizó mediante una mezcla de 60% CH₄ y 40% CO₂ almacenado a alta presión, el control de la presión de suministro al sistema de admisión se hizo con dos estaciones de regulación y la cantidad de

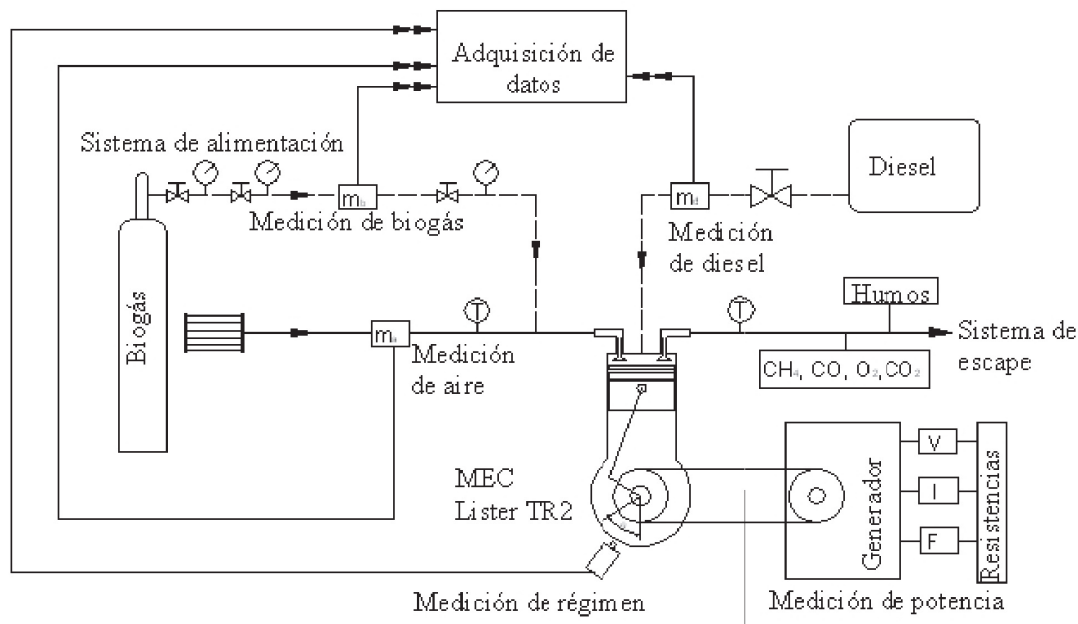


Figura 1 Montaje experimental

biogás se controló y se midió mediante un controlador de flujo OMEGA. Se midieron además los flujos de aire y diesel para el posterior cálculo de la relación aire/combustible, rendimiento volumétrico (η_v) y eficiencia efectiva. La potencia eléctrica (N_e) desarrollada se calculó con las lecturas de voltaje (V) y corriente (I) después del generador, el régimen de operación del motor se controló con la ayuda del lector de frecuencia (F) en el generador y un decodificador angular acoplado al eje de giro del cigüeñal. El porcentaje con base seca de los gases de escape de CO_2 , CH_4 y CO se midió mediante la técnica de infrarrojo no dispersivo (NDIR) y el O_2 mediante celda electroquímica con un analizador MAIHAK 610 debidamente calibrado. La opacidad del humo se obtuvo mediante un opacímetro marca GALIO.

Metodología

Primera fase. La primera parte de la experimentación consistió en evaluar el comportamiento mecánico ambiental del motor de ensayos en el modo diesel para la posterior comparación con el modo dual. Se eligieron cuatro modos de operación a un régimen de giro común de 1.800 rpm, uno

correspondió a plena carga y fue obtenido experimentalmente mediante la lectura de la máxima potencia alcanzada luego de varias pruebas de verificación. Posteriormente, se eligieron otros tres modos de funcionamiento para observar el comportamiento a carga parcial (70, 50 y 40%) dado que las plantas de generación ubicadas en las ZNI operan normalmente bajo esas condiciones [15].

Se empleó un diseño experimental unifactorial para la toma de datos y el análisis de resultados, realizando tres réplicas para cada punto de funcionamiento. En la tabla 2 se resume el diseño experimental.

Segunda fase. En esta parte se observó la respuesta del motor al utilizar biogás, se verificó que su funcionamiento fuera estable y no se presentara un comportamiento anómalo en el proceso de combustión, mediante la lectura de las medidas instantáneas de consumo de diesel, consumo de biogás, flujo volumétrico de aire, emisiones contaminantes y temperatura de los gases de escape.

Con los datos obtenidos del consumo de diesel para cada grado de carga evaluado en la fase previa, se definió el nivel de sustitución como:

Tabla 2 Diseño experimental para el desempeño del motor en modo diesel

Modo	Régimen (rpm)	Carga (%)	Ne (kWe)	Ficha técnica del experimento	
1	1.800	100	7,3	Modelo	Modelo de comparación simple con 1 factor a 4 niveles
2		70	5,2	Variable de referencia	Consumo de combustible [g/s]
3		50	3,6	Factor	Modo de operación
				Varianza	1,515x10 ⁻⁵ g ² /s ²
				Error de experimentación	0,0093 g/s
				Intervalo de confianza	95%
4		40	2,7	Potencia de la prueba	90%
				Grados de libertad	3
				Número de réplicas	3

$$Z = \frac{\dot{m}_{DI} - \dot{m}_{DD}}{\dot{m}_{DI}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Z: nivel de sustitución.

\dot{m}_{DD} : consumo másico de diesel en modo dual.

\dot{m}_{DI} : consumo másico de diesel en modo diesel.

El poder calorífico del diesel se tomó como 43,2 MJ/kg de valores reportados en la literatura [23] y su composición química se tomó como C_{14,7}H_{28,8} [24]. Para el biogás las propiedades termodinámicas se calcularon con la ayuda del *software* COMBUGAS del grupo GASURE, siendo el poder calorífico de 23,73 MJ/kg.

Para determinar los máximos niveles de sustitución se procedió a observar la estabilidad en el funcionamiento para los cuatro modos de operación seleccionados en la fase anterior. Se empezó utilizando un nivel de sustitución del 80% observando inestabilidad a baja carga, caracterizada por contraexplosiones en el ducto de escape, vibración excesiva y altas emisiones de metano. El máximo nivel de sustitución con el

cual se alcanzó una estabilidad adecuada para el rango de operación evaluado fue de 70%. Posteriormente, se escogieron dos niveles de sustitución adicionales (50 y 60%) que fueran representativos en el estudio de motores duales en el ámbito internacional y que permitieran evaluar las tendencias en el comportamiento de las variables de operación.

Para cada una de las fases se verificó que el dosado relativo obtenido con las lecturas de flujo de diesel, biogás y aire estuviera acorde al calculado con las medidas de emisiones contaminantes en los gases de escape.

Se espera que el desempeño global del motor se vea afectado por el efecto combinado del grado de carga y el nivel de sustitución, por eso se eligió un diseño multifactorial multivariado, replicado dos veces para la toma de datos y el análisis de resultados. La tabla 3 resume el diseño experimental empleado.

Resultados y análisis

El análisis de la fase experimental se presenta con base en la teoría del diseño factorial de experimentos detallada por Montgomery [25]. Se

Tabla 3 Diseño experimental para el desempeño del motor en modo dual

Factor	Característica nivel			Designación nivel
Nivel de sustitución	Reducción del 50% de consumo diesel			Z50
	Reducción del 60% de consumo diesel			Z60
	Reducción del 70% de consumo diesel			Z70
Modo de operación	n (rpm)	% Carga	Ne (kW)	Modo
	1.800	100	7,3	M4
		70	5,2	M3
		50	3,6	M2
		40	2,7	M1

reportan las gráficas de valores medios con sus intervalos de confiabilidad, dichos intervalos cuantifican el rango de variación esperado para las variables de operación respecto al modo de operación y el nivel de sustitución (motor dual). El solapamiento de los intervalos de confiabilidad indica que no se espera una influencia significativa sobre la variable de análisis al modificar el factor en sus diferentes niveles. Los extremos de cada intervalo representan las máximas desviaciones respecto al valor medio obtenido para cada punto de funcionamiento y grado de sustitución evaluado.

Modo diesel

En la figura 2 se muestra el comportamiento de las variables de funcionamiento mecánico del motor diesel para los cuatro modos de operación. El consumo específico de combustible (GEF) y la eficiencia efectiva se ven influenciados por las pérdidas en bornes del generador, el acople por bandas y altura sobre el nivel del mar, por tal razón el mínimo GEF y la máxima eficiencia se encuentran por encima y por debajo, respectivamente, de los reportados por el fabricante (235 g/kWh y 35%) a condiciones ISO [26]. Se observan las tendencias esperadas de disminución del GEF y aumento en

la eficiencia con el grado de carga, la temperatura de gases de escape (T_g) presenta una tendencia ascendente por el aumento en el dosado al interior del cilindro, el rendimiento volumétrico (η_v) presenta valores poco variables y cercanos a los calculados por el fabricante (0,85) a plena carga, lo que se explica por la no variación del régimen de funcionamiento.

En la figura 3 se observa la poca variabilidad y bajo orden de magnitud de las emisiones de metano para los motores diesel, destacando que su aparición en la corriente de gases de escape se debe exclusivamente a fenómenos de combustión incompleta. Su cuantificación en esta parte del análisis es importante para la posterior comparación con el motor dual, debido a que es uno de los principales contaminantes producidos al usar biogás como combustible primario, aportando de manera relevante al fenómeno del calentamiento global.

El resto de la figura presenta las tendencias de las emisiones de monóxido de carbono (porcentaje en base seca), la opacidad del humo y el dosado relativo (Fr). El aumento en el grado de carga trae consigo el aumento del dosado relativo, alcanzando valores cercanos de los medidos por el fabricante a 2.000 rpm (0,52). Las emisiones de CO se mantienen en un bajo orden de magnitud,

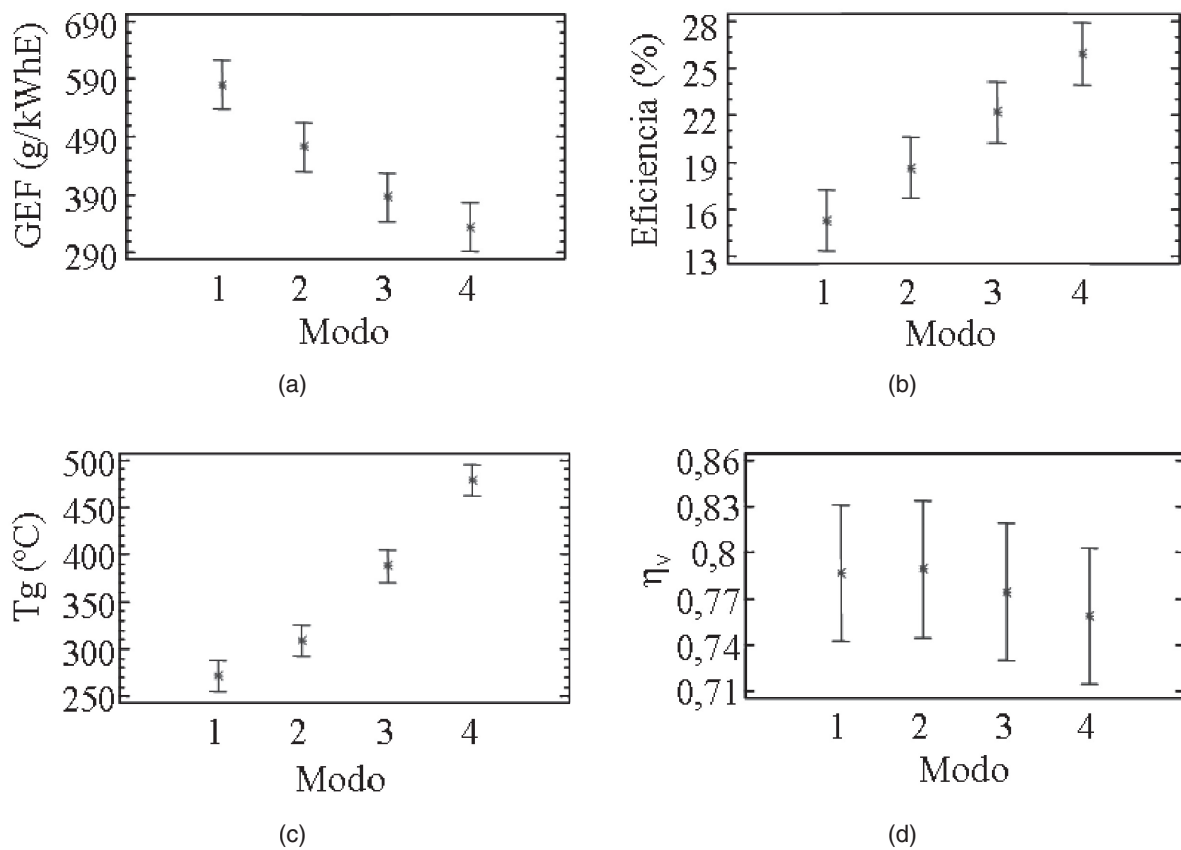


Figura 2 Consumo específico de combustible, eficiencia efectiva, temperatura de gases de escape y rendimiento volumétrico en función del modo de operación en modo diesel

pero aumentan con el grado de carga debido al aumento del Fr, el cual gobierna además el contenido de hollín de las partículas en la corriente de gases de escape, representado indirectamente mediante la opacidad del humo. Con dosados bajos hay mayor posibilidad de que el diesel inyectado en la última fase del proceso de combustión encuentre el oxígeno necesario para oxidarse, dando como resultado bajas emisiones de hollín, las cuales aumentan con el aumento del Fr.

Finalmente, y luego de haber verificado que el motor de ensayos y los sistemas de medición en conjunto entreguen tendencias y valores coherentes en las variables de análisis, se muestra en la figura 4 las medias de los consumos de combustible diesel obtenidas para los cuatro modos de operación, replicando cada uno de los

experimentos tres veces. Estos valores fueron validados para determinar los diferentes grados de sustitución de diesel por biogás en las fases posteriores de la experimentación.

Comparación del modo diesel y modo dual

El efecto causado por el porcentaje de sustitución y el modo de operación en el valor promedio del GEF se muestra en la figura 5. El GEF en modo dual incluye las masas de combustible primario y piloto. La parte a de la figura muestra los valores promedio esperados del GEF para cada nivel de sustitución al funcionar el motor de manera alterna en los cuatro grados de carga evaluados; así se espera que para el modo diesel (0% de sustitución) el GEF sea de 450 g/kWhE y para

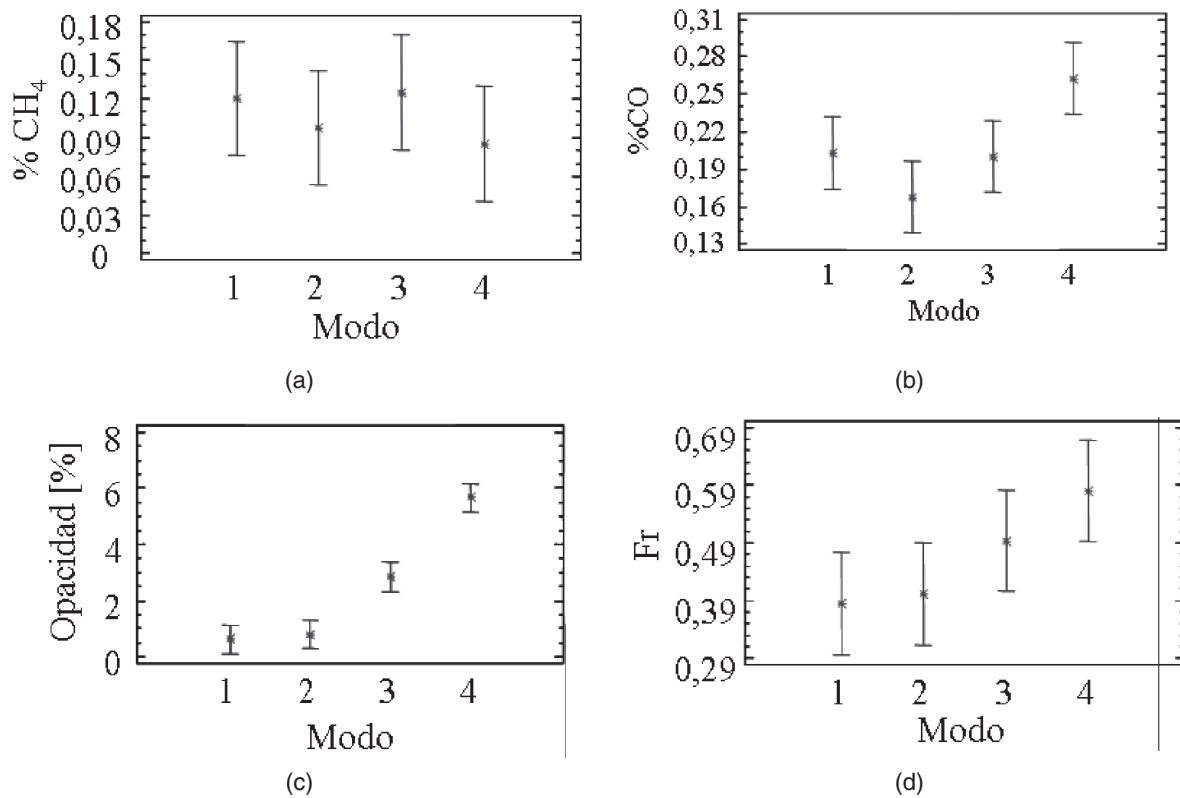


Figura 3 Emisiones de metano, monóxido de carbono, opacidad del humo y dosado relativo en función del modo de operación para el motor diesel

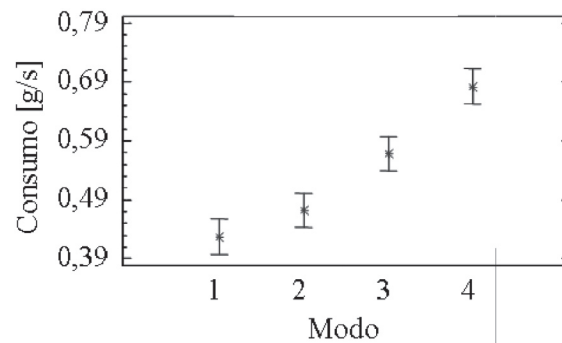


Figura 4 Medias de consumo de combustible diesel

70% de sustitución sea de 1.020 g/kWhE en promedio. En la parte b se muestran los resultados para los diferentes modos de operación, los valores medios del GEF representan la cantidad de combustible necesaria en caso de que se utilicen los grados de sustitución evaluados de manera alterna en cada modo.

El GEF aumenta considerablemente con el grado de sustitución debido a un suministro importante de energía primaria proveniente de un combustible gaseoso de bajo poder calorífico (biogás) y a la disminución en la eficiencia de conversión de combustible a bajas cargas al reducir la cantidad de combustible piloto. Una diferencia pequeña

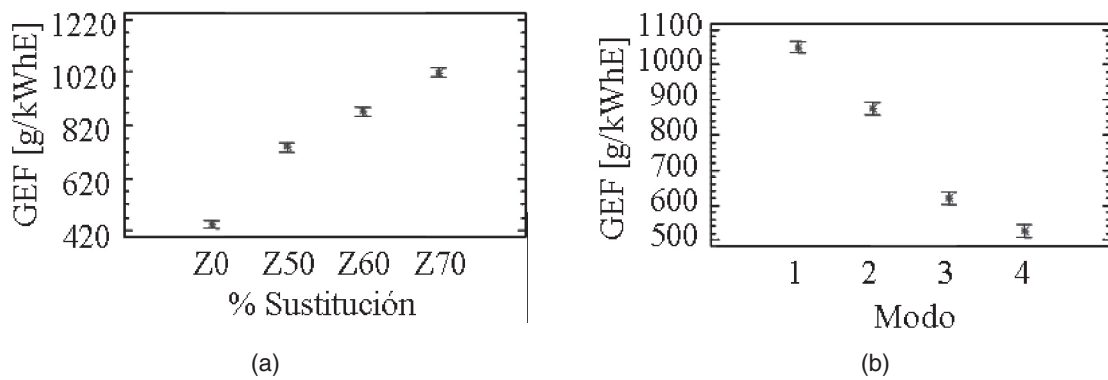


Figura 5 Efectos principales del porcentaje de sustitución y el modo de operación en el consumo específico de combustible

en la eficiencia efectiva en operación dual con biogás, conlleva una diferencia grande en el GEF, debido a que solo el metano aporta energéticamente al proceso de combustión y el dióxido de carbono participa como un inhibidor de este, rebajando las tasas de quemado de la mezcla aire combustible. Las diferencias con el modo de operación son obvias, debido al mejoramiento en la eficiencia del motor, característica que se conserva para el modo dual

Pese a que el GEF entrega información valiosa acerca de la cantidad de combustible empleada para la generación de potencia, es erróneo utilizarlo por sí solo para comparar el desempeño del motor en modo diesel y en modo dual, debido al poco contenido energético del biogás, en este caso es necesario recurrir al uso de la eficiencia de conversión de combustible.

En la figura 6a se observan los valores promedio esperados de la eficiencia para cada grado de sustitución evaluado, se presenta un leve incremento para el Z50 respecto al modo diesel del 2%, y una reducción de 2,5 y 10,1% para el Z60 y Z70 respectivamente. Las diferencias entre el modo diesel y modo dual se atenúan a plena carga con el aumento del dosado y la eficiencia aumenta a mayor cantidad de combustible piloto inyectada, lo que hace que a plena carga y bajos niveles de sustitución se alcancen mayores eficiencias para el modo dual, como reportan varios autores [1, 5, 6, 18]. Dado que para cada

nivel de sustitución el intervalo de confiabilidad representa la variabilidad de la eficiencia efectiva al operar el motor en los cuatro modos de operación, el valor medio se ve afectado y muestra valores superiores para Z50. En la parte b se observan valores más bajos para la eficiencia en los modos 1 y 2, respecto a los encontrados en el modo diesel (figura 2b) debido a la caída en la eficiencia de conversión de combustible al aumentar el nivel de sustitución.

La figura 7 muestra la respuesta de variables importantes de operación: rendimiento volumétrico (η_v), la temperatura de gases de escape y el dosado relativo (Fr), al cambio en los factores elegidos para la experimentación.

El η_v mide la capacidad de los MCIA para admitir mezcla o aire para la combustión, en el caso de los combustibles con baja relación aire/combustible estequiométrica se debe calcular dicho rendimiento con base en la mezcla aire-combustible. En el caso del biogás la relación teórica es considerablemente menor (6 kg aire/kg de biogás) en comparación con el diesel; por tal razón la capacidad de llenado del cilindro se mide con base en la admisión de la mezcla [17]. La parte a de la figura 7 muestra el η_v para la operación con diesel y en modo dual, no se observan cambios significativos en su magnitud ni tendencias claras con el grado de sustitución, lo que es explicable debido a que los dos gases presentes en el ducto de admisión tienen densidades muy parecidas.

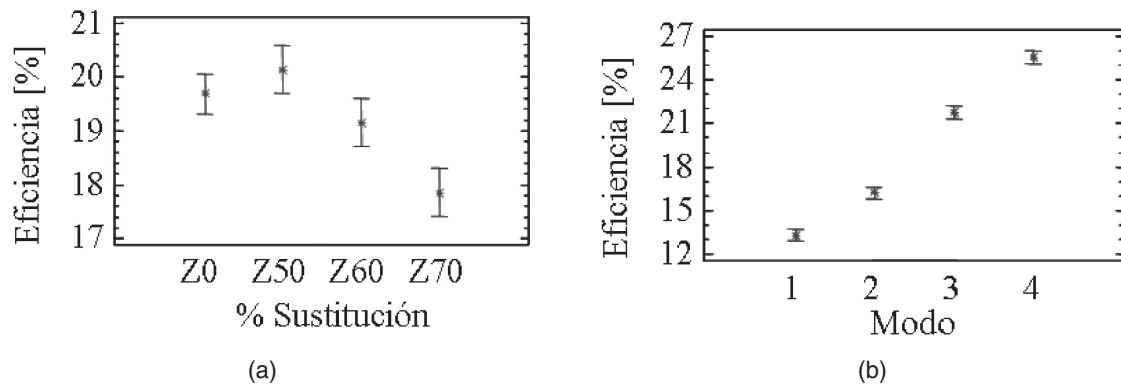


Figura 6 Efectos principales del porcentaje de sustitución y el modo de operación en la eficiencia efectiva

En el modo dual a cargas parciales se presenta un aumento en el tiempo que dura la combustión comparado con el modo diesel, debido al aumento en el tiempo de retraso y la baja velocidad de combustión por la pobreza de la mezcla aire-biogás (Fr bajos, figura 7d), lo cual se agrava con la sustitución de combustible diesel; por tal razón la temperatura de los gases de escape tiende a aumentar a baja carga para el motor dual y afecta el valor promedio para todo el rango de operación. La parte (b) de la figura refleja el fenómeno explicado, mostrando aumentos del 4, 6 y 10% para Z50, Z60 y Z70 respectivamente.

En la operación de los motores duales una de las variables que más sufre alteraciones es la relación aire/combustible, debido a la admisión de la mezcla aire-biogás, lo cual cambia sustancialmente la forma en que se desarrolla la combustión. En los motores diesel se controla estrictamente el dosado relativo por normatividad ambiental, ya que un dosado excesivo generaría gran cantidad de material particulado; al operar el motor en modo dual, los dosados deben ser incrementados debido a que gran parte del proceso de combustión se da por premezcla aire-biogás, siendo necesario tener un dosado más cercano al estequiométrico para esta mezcla y una determinada cantidad de aire adicional para el quemado del combustible piloto. El aumento significativo del dosado relativo (total para el diesel y el biogás) con el porcentaje de sustitución se aprecia en la parte c de la figura 7.

La parte a de la figura 8 muestra los valores promedio del porcentaje de CH_4 esperadas para cada grado de sustitución al combinar los grados de carga, la media esperada para el 70% de sustitución es de 9.000 ppm (0,9 %) aproximadamente, valor 7 veces mayor que las emisiones de CH_4 para el modo diesel. Lo anterior es debido a que un incremento en el porcentaje de sustitución a bajas cargas incrementa las emisiones de metano por el aumento de la cantidad de biogás en el proceso de admisión y por las bajas eficiencias de conversión de combustible. Tomando como base a Z50 el porcentaje de CH_4 aumenta el 35% para Z60 y el 77% para Z70. Los valores altos del CH_4 en los modos 1 y 2 al aumentar el porcentaje de sustitución son atenuados en los modos 3 y 4 (figura 8b) al aumentar el dosado relativo (figura 7b), las temperaturas de operación del motor y la eficiencia efectiva (figura 6b), alcanzando reducciones cercanas al 38, %.

En la figura 9 se observa la respuesta de las emisiones promedio de CO. Al comparar la operación dual con el modo diesel se observa un incremento significativo debido a los altos dosados promedio que se adquieren con el aumento del biogás al interior del cilindro (figura 7c), lo cual beneficia el fenómeno de la combustión incompleta. Al comparar las emisiones de CO del modo dual con las del modo diesel, se observan aumentos de 59, 67 y 85% para Z50, Z60 y Z70 respectivamente (figura 9 a). Las emisiones promedio de CO no tienen un incremento significativo al pasar del

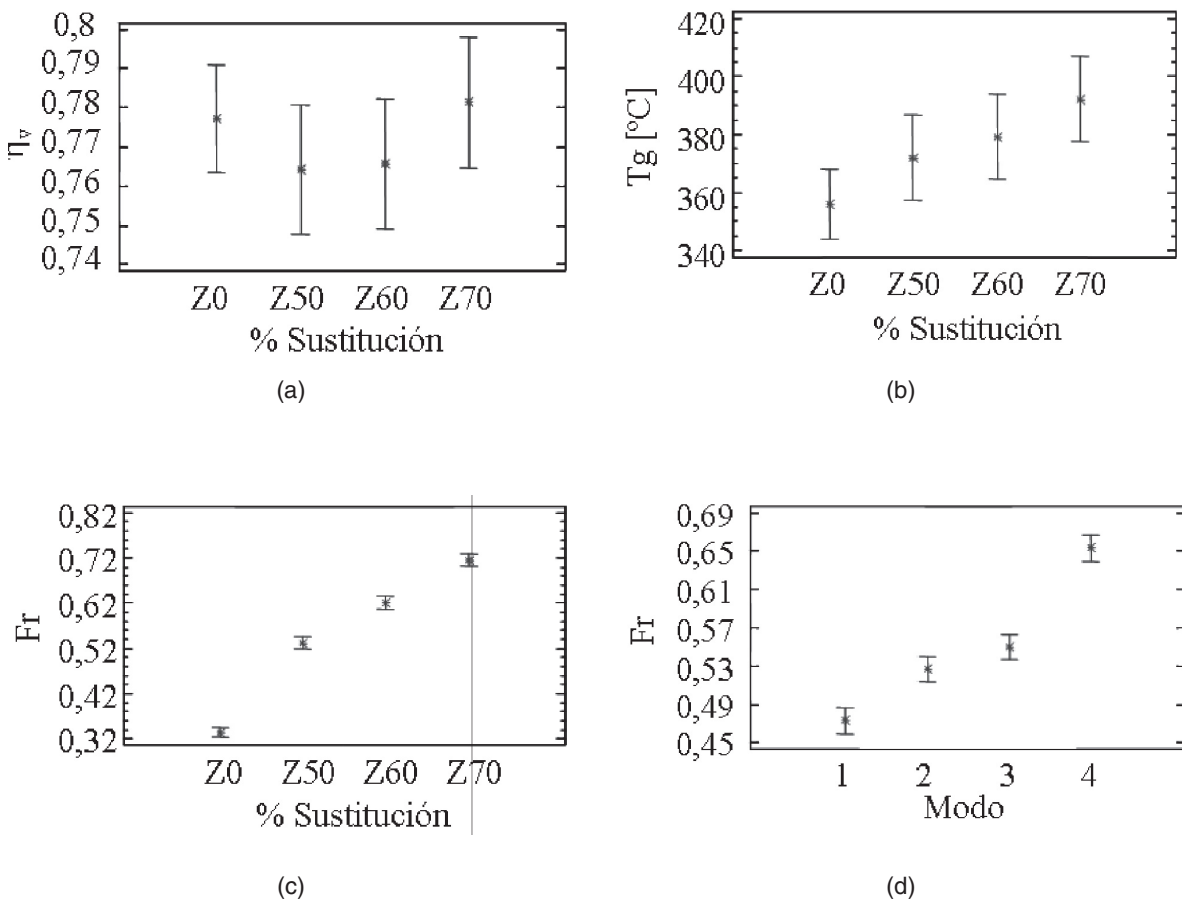


Figura 7 Efectos principales del porcentaje de sustitución y el modo de operación en el rendimiento volumétrico, la temperatura de gases de escape y el dosado relativo

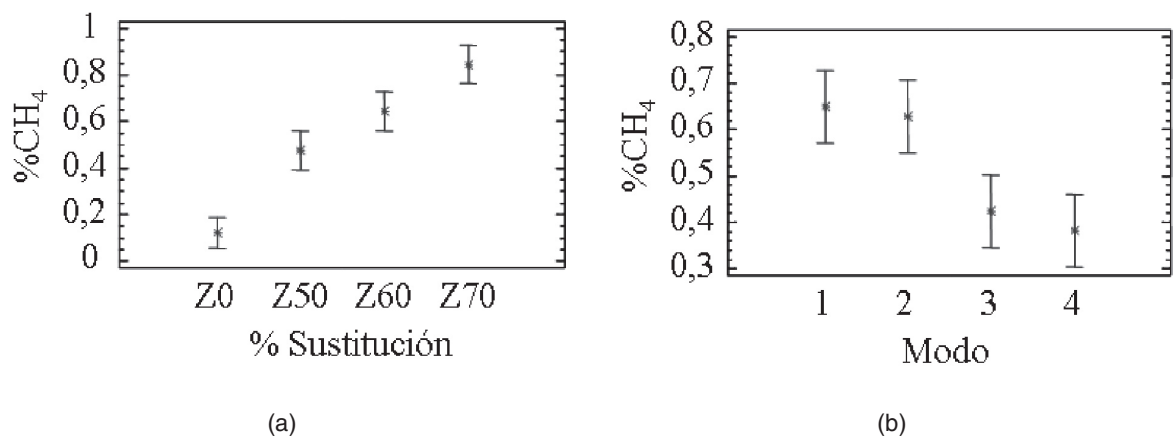


Figura 8 Efectos del modo de operación y el grado de sustitución sobre las emisiones de metano

modo 1 al modo 2, debido a que en esa zona las emisiones de CH_4 aún son altas (figura 8b) porque hay mayor cantidad de biogás que no se alcanza a quemar por los bajos rendimientos. En los modos 3 y 4 la cantidad de CH_4 disminuye y hay mayor posibilidad de que aparezca CO por la combustión incompleta debido a los más altos dosados

de funcionamiento (figura 7d), confirmando la estrecha relación que tienen las emisiones de CO y las de CH_4 en motores duales reportadas en la literatura internacional [8, 9]. Las emisiones de CO aumentan cerca del 11% al comparar el modo 3 con el modo 1 y 36% al comparar el modo 4 y el modo 1 (figura 9 b).

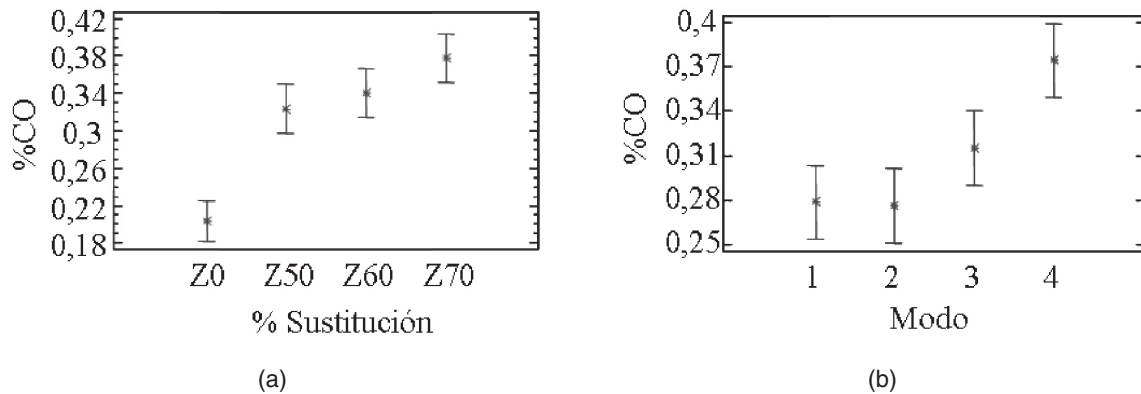


Figura 9 Efectos del porcentaje de sustitución y el modo de operación en las emisiones de monóxido de carbono

La respuesta de la opacidad del humo promedio se observa en la figura 10. Solo se muestran los resultados para los modos 3 y 4, donde los órdenes de magnitud de la opacidad del modo dual presentaron valores comparables con la opacidad del modo diesel, en los modos 1 y 2 en modo dual la opacidad estuvo por debajo de la apreciación del equipo de medición. Se observa en general que para diferentes grados de sustitución no existe una diferencia signifi-

ficativa en la opacidad del humo promedio del modo dual, existiendo una disminución cercana al 47% respecto al modo diesel (figura 10a). Al pasar del modo 3 al 4, hay un aumento considerable de la opacidad promedio, siendo casi dos veces mayor para el modo 4, debido al enriquecimiento del dosado y a que en todos los niveles de sustitución se introduce más combustible diesel para la misma cantidad de aire admitida en toda la fase experimental.

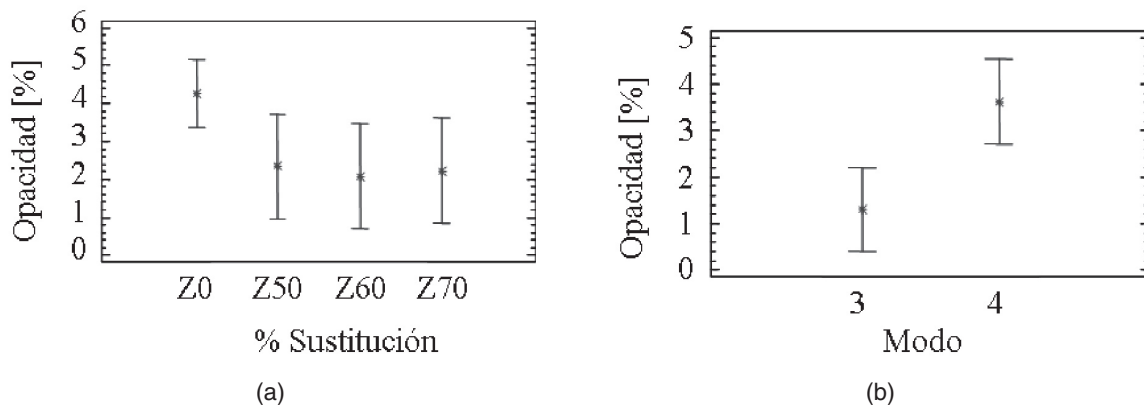


Figura 10 Efectos del porcentaje de sustitución y el modo de operación en la opacidad del humo

Conclusiones

1. En esta investigación sobre motores duales diesel-biogás, se ha logrado obtener un nivel de sustitución de combustible diesel del 70% manteniendo estabilidad en el funcionamiento del motor de ensayos.
2. Al comparar la operación en modo dual al 70% de sustitución con el modo diesel se han presentado aumentos en la emisión de CH₄ (7 veces mayor) y CO (85% mayor), los cuales se atenúan al disminuir el nivel de sustitución. Pese a los valores altos de CH₄ respecto al modo diesel, se debe recordar que en general se presenta una reducción en la emisión de CH₄ a la atmósfera por la utilización del 60% en volumen que tiene el biogás en el proceso de combustión del motor.
3. La eficiencia efectiva mostró una tendencia decreciente al aumentar el nivel de sustitución para el modo dual; para los niveles de 60 y 70% se presentó una reducción de la eficiencia promedio respecto al modo diesel del 3 y 10% respectivamente, dándose un pequeño aumento para el 50% del 2,5% respecto al modo diesel. Dadas las pequeñas diferencias que se presentan, se hace muy factible económicamente utilizar sustituciones al 70% implementando mecanismos de atenuación para estos fenómenos indeseados. En la actualidad se realizan investigaciones en el grupo GASURE sobre el efecto que tiene la sobrealimentación, los sistemas de mezclado y la calidad de combustible piloto sobre el funcionamiento de los motores duales diesel-biogás.
4. Los efectos negativos sobre la eficiencia efectiva y las emisiones de CH₄ de la conversión dual se atenúan a medida que aumenta el grado de carga, las emisiones de CO aumentan debido al aumento de la combustión incompleta; lo anterior hace necesario una correcta selección de los MEC a utilizar en modo dual para generación de electricidad según la demanda existente, lo cual permite su operación lo más cerca posible de la plena carga para la cual han sido diseñados y utilizar mecanismos de atenuación para la formación de CO en estas condiciones.
5. La reducción en la emisión de partículas es una de las grandes ventajas de los motores duales frente a la operación en modo diesel, de manera indirecta se ha verificado esa tendencia en este trabajo, encontrando reducciones cercanas al 47% de la opacidad del humo para todos los niveles de sustitución evaluados para los grados de carga superiores.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo expresan sus más sinceros agradecimientos al Comité para el Desarrollo de la Investigación de la Universidad de Antioquia por el financiamiento del proyecto "Evaluación del comportamiento mecánico, térmico y ambiental de un motor dual diesel-biogás con y sin poscombustión", del cual hacen parte los resultados presentados en esta publicación.

Bibliografía

1. R. G. Papagiannakis. D.T. Hountalas. "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas". *Energy Conversion and Management*. Vol. 45. 2004. pp. 2971-2987.
2. L. Gettel. G. Perry. "Natural gas conversion system for heavy duty truck engines". *SAE Paper* 911663. 1991.
3. V. Balasubramanian. K. Sridhara. "Performance Evaluation of a Small Agricultural Engine Operated on Dual Fuel (Diesel + Natural Gas) System". *SAE Paper* 951777. 1995.
4. K. V. Mitzlaff. *Engines for biogas: Theory, modification, economic operation*. GATE. GmbH. Wiesbaden. Vieweg. 1988. pp. 33-47.
5. P. Poonia. A. Ramesh. R. R. Gaur. "Experimental Investigation of the Factors Affecting the Performance of a LPG Diesel Dual Fuel Engine". *SAE Paper* N.º 1999-01-1123. 1999.
6. G. H. Abd Alla. H. A. Soliman. O.A. Badr. M.F. Abd Rabbo. "Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine". *Energy Conversion and Management*. Vol. 41. 2000. pp. 559-572.
7. A. Karim Ghazi. "A review of combustion processes in the dual fuel engine -The gas diesel engine". *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 6. 1980. pp. 277-285.
8. O. Badra. G. A. Karim. B. Liua. "An examination of the flame spread limits in a dual fuel engine". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 19. 1999. pp. 1071-1080.

9. G. A. Karim, Z. Liu, W. Jones. "Exhaust emissions from dual fuel engines at light load". *SAE Paper* 932822.
10. J. Zapata, L. Bayona. "Nuevo esquema de organización para el suministro energético en las zonas no interconectadas de Colombia". *Revista Escenarios y Estrategias*. Unidad de Planeación Minero Energética. Vol. 8. 2001. pp. 9-14.
11. Ministerio del Medio Ambiente. Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático. *Diagnóstico de gases de efecto invernadero por suministro de energía en zonas no interconectadas*. Bogotá D. C. 2002.
12. H. Jawurek, N. W. Lane, C. J. Rallis. "Biogas/Petrol dual fueling of SI engine for rural third world use". *Biomass* 13. 1990. pp. 87- 103.
13. A. Bilcan, O. Le Corre, M. Tazerout, I. Bitir, V. Athanasovici, "Valorisation du biogaz dans les moteurs à combustion interne". Colloque Franco-Roumain sur Energie-Environnement-Economie. COFRET 2002. pp. 253-259.
14. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. *Opciones para la reducción de emisiones de GEI en Colombia 1998-2010*. <http://www.ideam.gov.co/publica/gases/gasesme.pdf>. Consultado 10 de febrero de 2007.
15. Hagler Bailly Services. AENE. *Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no interconectadas con participación de las comunidades y el sector privado*. Bogotá D. C., 2001. <http://www.upme.gov.co>, consultado 5 de abril de 2007.
16. A. Bilcan. *Contribution à l'Etude du Cycle Thermodynamique de Moteurs Fonctionnant en Dual-Fuel*. Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil. Université de Nantes. France. 2003. pp. 83-119.
17. A. Bilcan, O. Le Corre, A. Delebarre. "Thermal efficiency and environmental performances of a biogas-diesel stationary engine". *Environmental Technology*. Vol. 24. 2003. pp. 1165-1173.
18. A. Henham, M. K. Makkar. "Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine". *Energy Conversion & Management*. Vol. 39. 1998. pp. 2001-2009.
19. A. Zapata. *Utilización del biogás para generación de electricidad*. Fundación CIPAV. Cali. 1999. <http://www.cipav.org.co/cipav/resrch/listpubs.htm>, consultado 20 de febrero de 2007.
20. P. Conil. *La valorización de los subproductos de la planta de tratamiento de los efluentes de la extractora de aceite de palma, Palmar Santa Elena*. Bio-Tec. Tumaco. 1997. <http://www.bio-tec.net/archivos/publicaciones/conil27.doc>, consultado 14 de diciembre de 2006.
21. P. Conil. *El aprovechamiento del biogás de las lagunas de palma: perfil del proyecto Palmeiras*. Bio-Tec. Tumaco. 1999. http://www.bio-tec.net/archivos/publicaciones/pc6-c28_palmeiras.doc, consultado 25 de marzo de 2007.
22. H. Cárdenas. "Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna". *Revista Energética*. Vol. 13. 1995. pp. 53-57.
23. J. B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New Cork. McGraw-Hill. 1988. pp. 132-133.
24. J. R. Agudelo, I. D. Bedoya, A. F. Agudelo. "Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma". *Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 18. 2005. pp. 1-22.
25. Montgomery, Douglas. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo editorial Iberoamérica. México. 1991. pp. 170-254.
26. *Technical Data Sheet Lister Petter Engines*. TR Series. www.lister-petter.com. Consultado 30 de junio de 2001.