Comportamiento de un motor diesel de 1.105 hp operado mediante el sistema *dual-fuel* con diesel - gas natural en campos petroleros

Performance of a dual-fuel natural gas/diesel engine in oil fields

Recibido 06-11-2013 Aceptado 23-04-2014

Jorge Eduardo Arango Gómez[1]
Fabio Emiro Sierra Vargas[2]
Sergio Pérez Súa[3]

Resumen

Se describe el sistema *dual-fuel* para motores diesel, operando los motores de combustión interna, donde sustituyeron parte del combustible con gas natural u otro combustible gaseoso. El sistema permite un ahorro económico significativo por la diferencia de precio entre el diesel y el gas natural, la disponibilidad de gas en sitio y la disminución en la emisión de gases contaminantes de la atmósfera debido a las bondades que presenta el gas natural frente al diesel. Se presentan los resultados de las pruebas realizadas a motores, y se indica la manera de aprovechar la tecnología *dual-fuel* en la industria petrolera.

Palabras clave: *dual-fuel*; motor diesel-gas natural; ahorro diesel; sustitución diesel por gas natural.

Abstract

The dual-fuel system for diesel engines is described, which consists in substituting part of the fuel used by the internal combustion engine with natural gas or another gaseous fuel. This system allows significant savings in costs due to differences in the prices of diesel and natural gas, the on-site availability of gas, and the reduction in polluting gas emissions to the atmosphere attributable to the positive aspects of natural gas versus diesel fuel. The results of tests carried out on the dual-fuel engine are presented, and the best way to use this technology in the oil industry is indicated.

Key words: dual-fuel; natural gas/diesel engine; diesel saving; substituting diesel with natural gas.

1 Colombiano. Ingeniero Mecánico, MSc , Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia
2 Colombiano. Ingeniero Mecánico, Ph.D., Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
3 Colombiano. Ingeniero Electricista y Electrónico, Msc (c) Ingeniería Mecánica Universidad Nacional de Colombia

Nomenclatura

m^2	Área en metros cuadrados
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
ft^3	Pie cúbico
hp	Caballo de fuerza
gal/h	Galones por Hora
kg	Kilogramo
m^3	metro cúbico
m	masa (kg)
kVA	Kilo volta amperio
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio - hora
$\dot{m}$	*Flujo másico (kg/h)*
$\dot{m}_{DI}$	Consumo másico de diesel en modo diesel
$\dot{m}_{DD}$	Consumo másico de diesel en modo dual
Z	Nivel de sustitución *(%)*

Abreviaciones

BTU	British Unit Thermal
CR	Relación de compresión
CC	Centímetros cúbicos
CO	Monóxido de carbono
DI	Inyección directa
LPM	Litros por minuto
MEC	Motor encendido por compresión
NO	Óxido nitroso
ppm	Partes por millón
psia	Pie por pulgada cuadrada – valor absoluto
psig	Pie por pulgada cuadrada – valor manométrico
Tea	Sistema para quema excesos de gases en una facilidad petrolera.

Introducción

La crisis del petróleo en 1973 desatada por el embargo petrolero de la OPEP a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra del YomKippur y que incluía a Estados Unidos y a sus aliados de Europa Occidental, generó aumento del precio, provocó un fuerte efecto inflacionista y una reducción de la actividad económica de los países afectados, lo cual terminó creando conciencia hacia el uso racional de los recursos petrolíferos y generando varias medidas y mecanismos para aumentar la eficiencia de los procesos que involucran combustibles fósiles (Lafuente y Genatios, 2005).

El cambio climático experimentado en las últimas décadas, atribuido a los gases de efecto invernadero, ha causado alteraciones trascendentes sobre todo el planeta e impulsado diversas acciones de direccionamiento de las investigaciones hacia modos más eficientes de utilización de los recursos y de nuevas tecnologías, para reducir la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera. Entre las iniciativas más conocidas está el protocolo de Kioto por el cual los países firmantes se comprometieron a reducir las emisiones a los niveles registrados en 1990, de seis gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global (dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4), oxido nitroso (N_2O) y tres gases industriales fluorados) en al menos un 5% para el periodo 2008 – 2012 y se establecieron mecanismos para incentivar los programas de desarrollo limpio (Naciones Unidas, 1998). En las últimas décadas ha sido necesario el establecimiento de normas más restrictivas respecto al rendimiento de ciertas máquinas térmicas y de la cantidad de contaminantes que pueden emitir (*U.S. Enviromental Protection Agency, 2012)*.

Colombia, ha desarrollado estrategias para la reducción de emisiones contaminantes y la reglamentación de la materia mediante decretos y leyes; ha incentivado la utilización de sistemas de cogeneración y la aplicación de tecnologías encaminadas a reducir las emisiones a la atmósfera.

Para los combustibles refinados como el diesel, se pasó de 5.000 ppm de azufre en 1990 a un porcentaje actual de 500 ppm y con una meta de 50 ppm que entró en vigencia para todo el país (Arango, 2009).

Motor de combustión interna y el sistema dual fuel

Los motores de combustión interna (MCI) son máquinas térmicas que producen energía mecánica en el eje a partir de la transformación de la energía química de un combustible, en un proceso de combustión dentro de sus cámaras (Salazar, 2011). Con la energía en el eje se genera electricidad o se mueven bombas y/o compresores; adicionalmente, la energía residual liberada en forma de calor se puede utilizar para cogeneración (Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia, 2011).

El proceso de combustión es la reacción química exotérmica de una sustancia llamada combustible, con un comburente que generalmente es el oxígeno del aire. Para que se desencadene la reacción es necesario que co-existan tres elementos: Combustible (material que arde), comburente (material que hace arder) y un desencadenante (suministra la energía requerida para alcanzar la temperatura de inicio

de la combustión)(Karim, 1980). La combustión genera luminiscencia, calor y gases que dependen de la composición de los elementos que intervienen en la reacción; ellos pueden ser: CO_2, H_2O (como vapor), Hollín, NO_x, CO y otros (Karim, 1980).

Según el método de encendido, se tienen: Los MCI de encendido provocado (MEP) donde se produce la combustión de una mezcla homogénea de aire y combustible, mediante una chispa eléctrica desencadenante. Popularmente se conocen como MCI de gasolina, pero utilizan también alcoholes, otros gases combustibles y/o mezclas. Los MCI de encendido por compresión (MEC), donde la combustión se produce por auto-ignición del combustible en la medida en que es inyectado en el aire comprimido, al ir formándose una mezcla heterogénea en la cámara de combustión (Payri, 2011). Comúnmente el combustible utilizado en MEC es diesel puro, pero es posible inyectar fracciones de diesel en una mezcla comprimida de aire y gas combustible.

La relación entre la cantidad de energía obtenida en el eje de un MCI y la aportada por el combustible, se denomina eficiencia o rendimiento al freno; depende del tipo de motor, de las dimensiones de los cilindros, de la relación de compresión, de la carga, la velocidad de rotación y otros factores (Universidad Nacional de Colombia, 2009).

Los MCI, a pesar de ser máquinas con eficiencia al freno relativamente baja, han sido los equipos más utilizados para generar trabajo (Sanz, 2007). La tabla 1 presenta, el balance térmico del MCI, para motores Diesel y de gasolina

Tabla 1. Balance térmico del MCI

Contracción Volumétrica	Tipo de motor	
	Diesel (%)	Gasolina (%)
Calor equivalente al trabajo efectivo	30	25
Calor cedido al refrigerante	30	30
Calor en los gases de escape	30	35
Fricción y Radiación	10	10

Fuente: (Sanz, 2007). Adaptada

Se han reportado valores de eficiencia al freno en MCI hasta del 42%, y aunque la energía en el eje continúa siendo relativamente baja respecto a la energía suministrada por el combustible, se viene aprovechando cada vez más el considerable calor residual en procesos de cogeneración (Sanz, 2007).

La academia y los fabricantes han estudiado la utilización simultánea de diesel-gas en MEC, por las bondades que ofrece en reducción de costos de operación asociada a la diferencia de precios entre estos combustibles (Bedoya *et al*., 2007, y Pérez, 2011), al potencial reducción de emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) (Papagiannakis y Hountalas, 2004).

En los MEC de capacidad media que utilizaron simultáneamente diesel-gas, mantuvo el encendido por compresión mediante la adición parcial de combustible diesel, lo que obliga al uso de diesel como combustible piloto para encender el gas (operación bi-combustible).Dichos MEC pueden acondicionarse para operación dedicada en bi-combustible o para operación ***dual-fuel***: operación selectiva alternante entre bi-combustible o 100% diesel.

El sistema ***dual-fuel*** consistió en un equipamiento que se le adiciona a un motor diesel de serie, para permitir la operación simultánea del motor con dos combustibles: uno líquido, que puede ser diesel o biodiesel y otro gaseoso, que puede ser: Gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), biogás u otro.

Los menores costos de funcionamiento y el uso de fuentes alternativas de combustible con funcionamiento dual de combustible del motor, han atraído a muchos investigadores a aplicar este tipo de tecnología en diferentes áreas. Los primeros experimentos con sistema de combustible dual fueron realizados por Cave en 1929 y Helmore y Sokes en 1930, en los que se indujo hidrógeno como combustible secundario en los motores diesel (Liu, 1999). Sin embargo, en ese momento, el motor con sistema ***dual-fuel*** no se utilizó comercialmente debido a su complejidad mecánica y a complicaciones asociadas con relaciones de compresión relativamente bajas.

Se pueden encontrar aplicaciones de sistemas duales de combustible en motores usados en el sector automotor, aplicaciones marinas, generación eléctrica y motores estacionarios, en compresores y bombas. Específicamente para la aplicación en sistemas de generación eléctrica donde los sistemas de control operan de manera particular para mantener la velocidad de rotación del MCI alrededor de un valor de referencia, se han desarrollado dos tecnologías de operación dual:

- HFO (*High Fuel Operation*): Es la operación del MCI con una cantidad relativamente alta de diesel y presenta dos modos de la operación del MCI: el modo de operación

normal, en el cual el combustible diesel es controlado para producir el trabajo en el motor; el modo de sustitución en el cual, parte del combustible diesel se reemplaza por un valor fijo de gas y se continúa regulando el diesel en la cámara. La principal ventaja técnica de este sistema es que permitió la operación del motor con solo diesel, o diesel y gas en distintas proporciones, lo cual le da gran flexibilidad al operador del equipo para trabajar el motor según la disponibilidad de gas que se tenga o la cantidad que desee ahorrar de diesel (Gettel. y Perry, 1999) .

• LFO (*Low Fuel Operation*): modo de operación en el cual el combustible requerido es controlado por gas y se adiciona una pequeña cantidad de diesel que sirve como piloto para desencadenar la combustión en la cámara. En la figura 1 se presenta el esquema del sistema *dual-fuel* en modo HFO y LFO

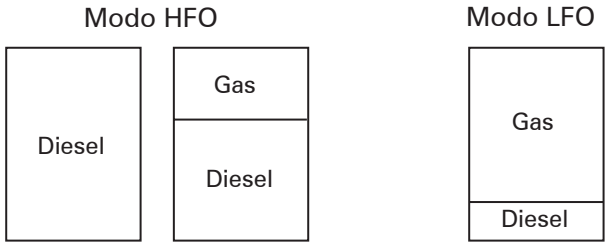


Figura 1. Esquemático del sistema *dual-fuel* en modo HFO y LFO

La figura 2 muestra el esquemático de funcionamiento del sistema *dual-fuel* en modo HFO donde, por un lado entra el gas que es regulado por presión; por otro lado entra el aire a través del filtro de aire; los dos gases se mezclan y pasan al sistema de admisión del motor.

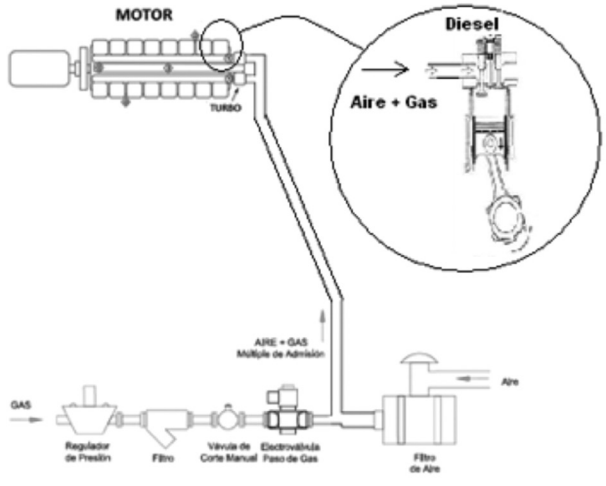


Figura 2. Esquemático del sistema *dual-fuel*

Los principales fabricantes de motores como: Caterpillar, Man, Cummins, Deutz, Wartsila y otros en asocio con empresas fabricantes de componentes como Altronic, ofrecen motores diesel que desde fábrica vienen con el sistema *dual-fuel* instalado o avalan ciertos kits que se pueden adquirir en el mercado, que al instalarlos no afectan la garantía del motor.

El sistema presenta las siguientes características:

• La instalación del sistema dual no compromete el desempeño original del motor. Un equipo de 1.000 kW de potencia, mantendrá 1.000 kW luego de la instalación, funcionando ya sea con 100% diesel o en modo dual; no hay pérdida de potencia en el motor a rangos normales de operación del sistema, solo en algunos casos se puede presentar una disminución de potencia y es debido a la composición del gas; sin embargo disminuyendo la cantidad de diesel remplazada por gas se puede recuperar la potencia perdida (Sahoo *et al*., 2009).

• El motor no presenta inconvenientes por pérdida de estabilidad o velocidad de respuesta ante cambios de carga (Sahoo *et al*., 2009).

• El sistema está diseñado para pasar de modo dual a modo diesel sin inconvenientes durante la transición, puede realizarse el cambio de manera gradual o inmediata (Sahoo *et al*., 2009).

• Los parámetros de calor por radiación, eficiencia, calor de escape y calor liberado al sistema de refrigeración, permanecen prácticamente inalterables respecto a los valores originales suministrados por el fabricante del motor; por lo tanto aquellos motores de grupos electrógenos utilizados en aplicaciones de cogeneración recuperan la misma cantidad de calor funcionando en el modo dual bi-combustible como en el modo 100% diesel (Poonia *et al*., 1999

• La reducción de los gases contaminantes como los NOx es considerable; está en el orden del 60%, al igual que la reducción de las sustancias particuladas emanadas por el escape (se calcula también en un 60% aproximado)(Brachetti, 2010).

• Se han reportado extensiones en los intervalos de cambio de aceite y en la vida útil de los motores debido fundamentalmente al resultado de la limpia combustión que caracteriza al gas natural (Pérez, 2011 y Sahoo, 2009).

Funcionamiento del sistema dual-fuel

El sistema *dual-fuel* en esencia es un sistema híbrido que combinó las características de los motores de encendido por chispa y compresión. En un motor convertido a operación dual, se le adicionó a la recámara de combustión una mezcla de aire-combustible gaseoso, la cual se denominó combustible primario; al final de la carrera de compresión se inyectó una cantidad determinada de diesel; este combustible se denominó piloto, el cual, debido a las condiciones de alta presión y temperatura al interior del cilindro, se auto-enciende e inició el proceso de combustión de la mezcla aire-combustible primario (Liu y Karim, 1977), (Karim y Zhigang,1992), (Hountalas y Papagiannakis, 2000). En la figura 2 se observa, cómo entra una mezcla de aire y gas a la recámara de combustión y finalmente se desencadenó la combustión con el suministro de una porción de diesel al final de la carrera de compresión. Posteriormente se generó movimiento descendente del pistón para producir trabajo.

En los sistemas ***dual-fuel*** se definió la tasa de sustitución de combustible diesel como, la cantidad de diesel que se remplazó por gas (Z) así tambíen:

$$Z = \left(\frac{\dot{m}_{DI} - \dot{m}_{DD}}{\dot{m}_{DI}}\right) * 100 \qquad (1)$$

Z: Nivel de sustitución (%)

$\dot{m}_{DI}$: Consumo másico de diesel en modo diesel

$\dot{m}_{DD}$: Consumo másico de diesel en modo dual

En las investigaciones realizadas en torno a motores diesel operando simultáneamente con gas, se logró una sustitución del diesel por gas natural hasta del 85% según el tipo de motor y la aplicación (Bedoya *et al*., 2007), (Papagiannakis y Hountalas, 2007), por encima de este nivel se presentaron problemas en inyectores, golpeteo en el motor, vibraciones anormales y alta temperatura (Papagiannakis y Hountalas, 2007), sin embargo todo depende del tipo de motor, combustibles, carga del equipo y el lugar de operación entre otros factores, por lo cual se realizaron pruebas en cada equipo para determinar los límites de operación de cada unidad.

Un motor diesel con el sistema *dual-fuel* no pudo operar con 100% de sustitución por gas debido a que la temperatura de ignición del gas natural es relativamente alta (aproximadamente 1.300 °F); esta temperatura no se generó durante la compresión del diesel en el cilindro del motor de modo que pudo encender el gas natural; durante la operación bi-combustible, una cantidad de combustible diesel se requirió para actuar como la fuente de ignición de la mezcla aire-gas (Sahoo *et al*., 2009).

Investigaciones particulares de Altronic Inc, uno de los proveedores de kits *dual-fuel*, estableció que por cada galón de diesel #2 que se reemplazó en un motor se requieren aproximadamente 140 SCF (*Standard Cubit Feet*) de Gas Natural (Altronic Inc).

Desvantajas del sistema dual-fuel

Las investigaciones indican que los problemas que se pueden presentar con el uso del sistema ***dual-fuel*** son:

- El principal problema de operación del motor en modo dual de combustible es que a baja carga la eficiencia del sistema disminuyó, es decir que el nivel de sustitución se bajó en comparación con otros puntos de mayor carga en el equipo, por lo cual el sistema fue más eficiente (mayor sustitución de diesel por gas) a medida que se aumentó la potencia exigida al motor (Karim y Burn, 1980, Xianhua y Philip, 1986).

- Las emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, cuando el equipo operó con baja carga pueden ser más altos en comparación con el funcionamiento con solo diesel (Karim y Burn, 1980, Xianhua yPhilip, 1986).

- Según el tipo de gas y su composición se pueden presentar problemas con los componentes del motor en contacto con este, los principales problemas se han reportado por gas con H_2S, lo cual hace que se requiera disminuir el periodo para *overhaul* del equipo. Otro problema reportado ha sido la presencia de condensados en el gas de pozo por lo que es deseable un *scrubber* en el circuito de gas (Pérez, 2011).

En general, siempre se recomendó operar el motor con el sistema ***dual-fuel*** con carga mayor al 50% del valor nominal, sin que esto excluya que se puede operar con régimen de carga menor, si para el operador no es relevante el tema de cantidad de gas a utilizarse o las emisiones, además de un buen filtro de gas y/o *scrubber* dependiendo de la composición del gas.

Investigación realizada a motores operando con sistema dual-fuel

Se han realizado investigaciones en donde se mezcló diesel o biodiesel (Kleinová *et al*., 2011) con combustibles gaseosos como: gas natural, biogás, GLP, hidrógeno (Korakianitis *et al*., 2011), acetileno (Lakshmanan y Nagarajan, 2011), según los tipos de combustibles utilizados en el motor y sus composiciones se obtuvo diferentes tasas de sustitución de combustible líquido por gaseoso y diferentes niveles de

emisiones que en la mayoría de los casos son menores que las de la operación del equipo con solo diesel.

En el 2004, en India, Uma, Kandpal y Kishore investigaron sobre un grupo electrógeno con motor diesel de 50 kW de potencia nominal, operando con sistema ***dual-fuel*** a gas natural, en la tabla 2 se presenta el consumo de combustible y el consumo de energía a diferentes cargas.

Tabla 2. Consumos de combustible y específicos de energía a diferentes cargas

Carga (kW)	Consumo de combustible				Consumo específico de energía	
	Modo Diesel	Modo *Dual-Fuel*		Tasa de reemplazo de diesel	Modo Diesel	Modo *Dual-Fuel*
	Diesel kg/h	Diesel kg/h	Gas Natural Nm^3/h	(%)	MJ/kWh 22,8	MJ/kWh
10	5,3	1,9	57	64	22,8	34
20	7,2	1,3	66	82	15,5	18
30	9,8	1,5	81	85	14	15
40	12,2	3,7	112	70	13,1	16

Fuente. Uma *et al*., 2004)

Aplicando la ecuación (1) se identificó una sustitución máxima del 85% de diesel por gas a una carga de 30 kW, lo que corresponde al 60% de la carga nominal del equipo; sin embargo, se logró operar el equipo a una carga de 40 kW que corresponde al 80% de la carga nominal con una tasa de reemplazo del diesel del 70%.

Se identificó también que el consumo especifico de energía se incrementó a medida que se reducía la carga del equipo, por lo cual se recomendó operar los equipos siempre cerca de su carga nominal; adicionalmente, se observó un consumo específico de energía mayor cuando se opera con sistema *dual-fuel*, lo cual puede obedecer al poder calorífico del gas y la velocidad de la llama (Uma *et al*., 2004; Parikh 1989; Sridhar *et al*., 2001). Finalmente, en operación dual respecto a la operación con solo diesel, se incrementó el CO, CO_2 y CH_4 y disminuyeron el NO_x y PM (tabla 3).

Estudios realizados por la Technical University of Kaiserslautem publicados en SBS, Bosch y Clean Air Power, muestran que el potencial de reducción de emisiones en un motor diesel en el cual se ha sustituido el 50% de combustible diesel por gas natural es:

- Reducción de CO: 95%
- Reducción de HC: 66%
- Reducción de PM: 42%
- Reducción de NOx: 35%

Tabla 3. Potencial de emisiones a diferentes cargas

Parametro	Carga (kW)					
	10		20		30	
	Disel	*Dual-Fuel*	Diesel	*Dual-Fuel*	Diesel	*Dual-Fuel*
CO (ppm)	181	635	207	640	284	734
CO_2 (%)	3,1	6,2	4,2	7,1	5,7	9,2
HC (ppm)	109	119	132	141	180	182
CH_4 (ppm)	7	18	8,4	24	10,2	21
SO_2 (ppm)	4,6	1,1	5,4	1,2	6,8	1,5
NOx (ppm)	172	93	230	140	279	170
PM (mg/m^3)	22	18	26	24	29	24

Fuente. Uma *et al*., 2004)

Los resultados coinciden en reducción con los obtenidos por (Bedoya 2007; Papagiannaki 2007); a su vez contradicen los obtenidos por Uma *et al*. (2004), por lo cual se infiere que la reducción de emisiones dependió de factores como el tipo de gas, el tipo de motor y la carga; por tanto cada experimento arrojó resultados específicos para el tipo de experimento.

Al utilizar gas natural se obtuvo una reducción de las emisiones de gases a la atmósfera, dependiendo del tipo de combustible gaseoso; cuando se utilizó Biogás como combustible primario, se presentaron aumentos en las emisiones de ciertos contaminantes como: el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (THC) y metano (CH_4) (Bedoya, 2007; Silva *et al*., 2012).

La composición química del biogás, lo convierte en un combustible relativamente pobre que contiene un volumen apreciable de CO_2 y contaminantes como material particulado (Siloxanos), humedad y ácido sulfhídrico (H_2S), por lo cual se hizo necesario, al menos, un pre-tratamiento de limpieza y secado para el biogás, una selección muy cuidadosa del motor (Silva *et al*., 2012).

Aplicación del "dual-fuel" en campos petroleros

El consumo de combustible diesel en los equipos de producción que utilizan este combustible en sus motores de combustión interna, afectó en gran medida el costo de la operación debido a su precio, transporte y almacenaje.

El manejo del combustible diesel en las estaciones de producción no es el más adecuado, sumado a las dificultades de transporte que en muchas veces se tiene por la localización geográfica de las facilidades de producción, hacen que no se cuente con un combustible limpio, o que en oportunidades se sufra por desabastecimiento del mismo, lo cual dificulta o restringe las operaciones de producción de hidrocarburos.

La implementación del sistema ***dual-fuel*** en los motores diesel permitió ahorros económicos debido a las diferencias de precio entre el diesel y el gas natural o por la disponibilidad que se tenga de gas, así como, también por una disminución en la emisión de gases contaminantes de la atmósfera debido a las bondades que presenta el gas natural frente al diesel. La tecnología ***dual–fuel*** le permitó a las compañías petroleras aprovechar el gas natural que se generó en la Tea, para ser utilizado en los motores usados en las facilidades de producción, con lo cual se obtuvo ahorros económicos en logística y almacenamiento de combustible, principalmente en campos con poca producción de gas natural o en fase de pruebas de producción.

La implementación óptima del sistema ***dual-fuel*** dependió de diversos factores entre los que se incluyen: tipo de motor, la aplicación del equipo, el tipo de gas usado y las condiciones de operación; por lo cual realizar un estudio detallado que permita identificar los aspectos relevantes que involucran toda la correcta implementación del sistema y pruebas para obtener el mejor punto de operación, llevará a buen término con resultados óptimos para la empresa la inversión realizada y los beneficios que se obtengan de esta tecnología. La figura 3 ilustra un típico de instalación de un sistema *dual-fuel* en un generador diesel:

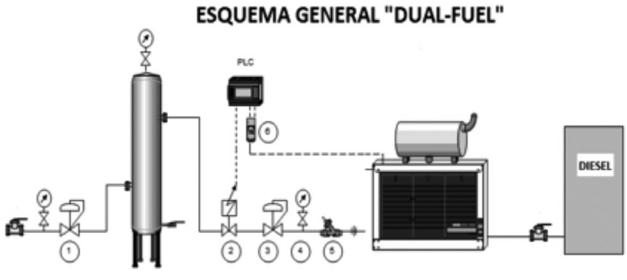


Figura 3. Esquemático *dual-fuel* usando gas de pozo y *Scrubber* en un motor diesel.

La aplicación del sistema en el sector de hidrocarburos se puede dar en bombeo, compresores, bombas o generación eléctrica; si se utiliza el gas de pozo siempre es recomendable disponer de filtros de gas y la instalación de *scrubber* de modo que se pueda entregar al motor un gas con la mejor calidad posible.

Los costos de implementación del sistema ***dual-fuel*** son bajos en comparación con los ahorros que se obtienen; el precio aumentó de acuerdo con los elementos de medida, control o seguridad que se le adicionaron a la instalación; pero en el mercado se pueden obtener kits de instalación básicos desde los US $3.000. Sin embargo, siempre es recomendable una buena asesoría técnica para elegir el producto que más se adecue a la disponibilidad energética y necesidades de cada empresa.

Montaje de la prueba

Con el objetivo de evaluar el desempeño mecánico y ambiental del grupo electrógeno diesel con el sistema *"dual-fuel"*, se diseñaron una serie de pruebas a distintos niveles de sustitución y cargas del equipo, con el fin de determinar las acciones a seguir para lograr mejorar el nivel de sustitución para el equipo en prueba.

Datos del equipo en Prueba

La figura 4 presenta el equipo utilizado, las características del equipo son:

Ítem	*Especificación*
Modelo	C27Genset
Marca grupo electrógeno	Caterpillar
Motor	Caterpillar C27
Tipo	4 tiempos
Cilindros	12
Velocidad	1.800 rpm
Potencia	1.105 hp
Turbo cargado	si
Tiempo de inyección	25 - 45 B.T.D.C
Tensión generación	480 Voltios
Potencia	906 kVA/ 725 kW
Factor de potencia	0.8



Figura 4. Fotografía del grupo electrógeno utilizado

La figura 5 presenta el Esquemático del montaje e Instrumentación de las pruebas

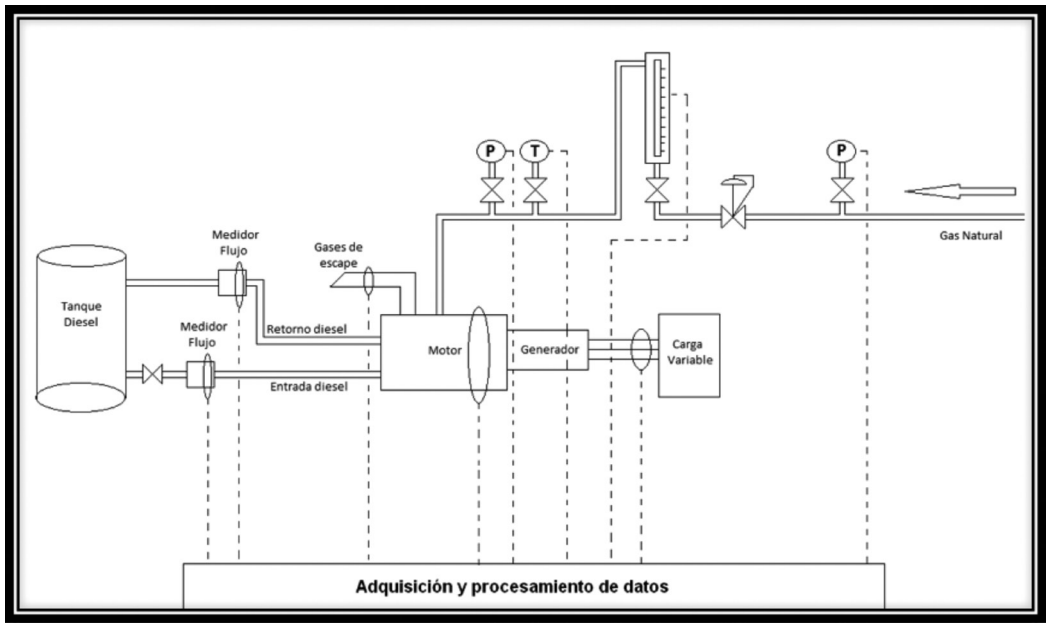


Figura 5. Esquemático del montaje e instrumentación de las pruebas

Descripción del gas natural y del diesel a utilizar en la prueba

La tabla 4 presenta las características del combustible diesel utilizado en Colombia.

Tabla 4. Características del combustible diesel en Colombia

Caracterís-ticas	Unidades	Métodos	Valor	640	284	734
Índice de Cetano		ASTM D-4737	56 - 58	7,1	5,7	9,2
Viscosidad a 40 °C	109	119	132	141	180	182
	mm^2/s	ASTM D 445	1,9	24	10,2	21
Lubricidad	Micrómetros	ASTM D 6079		1,2	6,8	1,5
Azufre	Ppm		30-50	140	279	170
Densidad	(kg/m^3)		825-835	24	29	24
API			38-40			

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo

La cromatografía del gas de pozo utilizado se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Reporte de composición del gas.

Condiciones de la muestra		120.0 psig @ 87.0 °F	
Componente		Molar %	Peso %
H_2	Hidrogeno	0,00	0,00
H_2S	Hidrogeno Sulfhídrico	0,00	0,00
CO_2	Dióxido de Carbono	5,18	10,06
N_2	Nitrógeno	0,59	0,73
C_1	Metano	73,47	52,05
C_2	Etano	10,93	14,51
C_3	Propano	6,20	12,06
iC_4	i-Butano	0,97	2,49
nC_4	n-Butano	1,49	3,81
iC_5	i-Pentano	0,29	0,93
nC_5	n-Pentano	0,27	0,85
C_6	Hexanos	0,29	1,09
C_7	Heptanos	0,18	0,70
C_8	Octanos	0,11	0,50
C_9	Nonanos	0,02	0,15
C_{10}	Decanos	0,01	0,05
C_{11}	Undecanos	0,00	0,02
	Total : Propiedades calculadas del gas	100,00	100,00
	Gravedades pecifica gas	0,7832	(Air=1 @ 14.73 psia& 60°F)
	Poder calorífico real	1227,6	BTU.ft^3 @ 14.65psia, 60°F
	Poder calorífico neto	1114,1	BTU.ft^3 @ 14.65psia, 60°F

Fuente: Core Laboratories Colombia

Medición de carga eléctrica

La potencia entregada por el equipo se midió con un analizador de calidad de energía marca AEMC, modelo 3945-B, se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Datos técnicos del analizador AEMC 3945-B

Medida	Rango	Resolución	Precisión
Voltaje	15 - 480 V	0,1V	0,5% ± 2 cts
Frecuencia	40 - 69 Hz	0,01 Hz	± 0,01 Hz
Corriente	0-1200 A	0,1 A	± (0,5% + 2 cts)
Potencia Real	0 - 9999 kW	4 dígitos	± 1%
Potencia Reactiva	0 - 9999 kVAR	4 dígitos	± 1%
Potencia Aparente	0 - 9999 kVA	4 dígitos	± 1%
Factor de potencia	"-1 ,00 a 1,00"	0,001	± 1,5%
Energía Eléctrica	0 - 9999 mWh	4 dígitos	± 1%

Medición de gases de escape del motor

Se realizaron mediciones de gases de escape del motor, se utilizó el analizador de gases de combustión y emisiones, modelo E4400-C, marca E Instruments, las características se presentan en la tabla 7:

Tabla 7. Características técnicas del analizador de gases de combustión

Parámetro	Sensor	Rango	Resolución	Precisión
O_2	Electroquímico	0 - 25%	0.1%	±0.2% vol
CO	Electroquímico	0 - 8000 ppm	1 ppm	±10 ppm
CO_2	Calculado	0 - 99.9%	0.1%	
NO	Electroquímico	0 - 5000 ppm	1 ppm	±5 ppm
NOx	Calculado	0 - 5000 ppm	1 ppm	
CxHy	Pellistor	0 - 5 %	0.01 %	±5 %
Exceso de aire	Calculado	0 - 850 %	1%	
Eficiencia	Calculado	0 - 100 %	0.1%	
Temperatura	Tc K	(- 20 a 1250 °C)	0.1 °C	

Medición de consumo de combustible diesel

Para la medición del flujo y consumo de combustible diesel se utilizó contadores marca GW modelo TM-10 que permitió medir flujo, volumen y tiempo, se instalaron en la línea de alimentación del motor y la línea de retorno. En la tabla 8 se presentan las características técnicas del contador.

Tabla 8. Características técnicas del contador de flujo

Presión máxima servicio	300 psi
Precisión	1,50%
Rango flujo	18.9 a 190 LPM
Rango temperatura	-40 °C a +121 °C

Medición presión y temperatura

La medición de los parámetros de temperatura y presión se realizó con instrumentos marca WIKA. Las características técnicas del manómetro WIKA, se presentan en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Características técnicas del manómetro WIKA

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	233 -34
	Parámetro	Presión
	Última Calibración	Julio 2013
Presión máxima servicio	10 psi	
Precisión	0,50%	
Rango presión	"- 20 °C a +65 °C"	

Tabla 10. Características técnicas del termómetro WIKA

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	A50
	Parámetro	Temperatura
	Última Calibración	Julio 2013
Temperatura máxima servicio	75 °C	
Precisión	clase 2	
Rango temperatura	"- 20 °C to +60 °C"	

Medición del consumo de gas natural

El consumo de gas natural se midió con un Rotámetro marca WIKA. En la tabla 11 se presentan las características técnicas.

Tabla 11. Características técnicas del rotámetro WIKA

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	LZB-4
	Parámetro	Flujo
	Última Calibración	Julio 2013
Presión máxima servicio	100	psi
Precisión	0,5%	
Rango	100 -500	ft^3/h
	500 -1000	ft^3/h
	1.000 - 5.000	ft^3/h

Resultados

El equipo se puso a prueba utilizando una carga variable de tipo eléctrica, constituida por un banco de resistencias variable para lograr los niveles requeridos de carga del equipo. Los datos se consignaron en las en tablas 12 y 13; se tomaron registros para diferentes niveles de sustitución obtenidos mediante el cambio de la presión del gas de admisión para el modo "dual de combustible". En la figura 6 se presenta el registro de los datos del analizador.

Tabla 12. Registro de consumo de combustibles

% Carga (kW)	Consumo de Combustible				
	Modo Diesel	Modo *dual -fuel*			Tasa de reemplazo de Diesel
	Diesel	Diesel	Gas Natural		
	(gal/h)	(gal/h)	ft³/h	Presión (psi)	(%)
25%	11,9	10,5	221	1	11,8
		10,4	236	2	12,6
		10,2	268	3	14,3
		10,1	284	4	15,1
		9,5	378	5	20,2
		9,8	331	6	17,6
50%	21,8	19,1	454	1	12,4
		18,9	488	2	13,3
		18,5	555	3	15,1
		18	639	4	17,4
		17,2	774	5	21,1
		17,4	740	6	20,2
75%	34,1	30,2	593	1	11,4
		29,9	639	2	12,3
		29,1	761	3	14,7
		28,7	821	4	15,8
		28,3	882	5	17,0
		27	1080	6	20,8
100%	49,7	43,8	821	1	11,9
		43,3	891	2	12,9
		42,3	1030	3	14,9
		41,8	1099	4	15,9
		40,9	1225	5	17,7
		39,2	1461	6	21,1

Tabla 13. Registro de datos analizador de gases de combustión

Parámetro	Carga del equipo							
	25%		50%		75%		10%	
	Diesel	Dual	Diesel	Dual	Diesel	Dual	Diesel	Dual
CO (ppm)	227	520	255	601	272	670	298	699
CO_2 (%)	3,9	6,1	4,3	7,9	5	8,9	5,6	9,4
NOx (ppm)	250	120	310	135	390	167	402	198
HC (ppm)	120	129	145	165	181	189	192	193

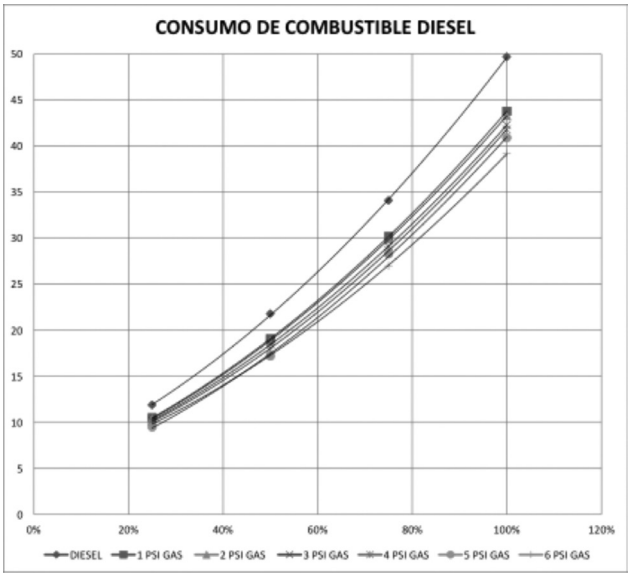


Figura 6. Registro de datos analizador

En la gráfica se observa cómo a medida que aumenta la carga, los niveles de sustitución de diesel van mejorando.

Conclusiones

El sistema *dual-fuel* es una herramienta útil para ser utilizada en motores diesel cuando se tiene disponibilidad de gas, con lo cual se pueden obtener ahorros importantes y reducir las emisiones en la mayoría de los casos.

Los resultados obtenidos en las pruebas del grupo electrógeno fueron inferiores a los niveles de sustitución obtenidos por investigadores en el laboratorio; la tasa máxima de sustitución fue del 21% mientras que en publicaciones como la de Uma *et al*. (2004) se logró hasta un 85% de sustitución del diesel por gas natural.

El máximo nivel de sustitución cambió para baja carga y alta carga del equipo; se observó que era necesario incrementar la presión del gas de entrada a medida que elevaba la carga, para lograr mejores tasas de sustitución.

Los resultados de la medición de emisiones obtenidas fueron similares a las de Uma *et al*. (2004), donde se observó

una disminución de los NO_x e incremento del CO y CO_2 con la operación en modo dual. Es necesario resaltar que los resultados de las distintas investigaciones publicadas difieren entre ellas, y esto obedece a la composición del gas natural usado en cada experimento y a las condiciones del equipo entre otras variables.

Con la información obtenida en una segunda fase se pretende analizar las variables de relación de compresión y tiempo de inyección para mejorar la tasa de sustitución, y lograr niveles alcanzados por otros investigadores; todo esto cambiando el reglaje del motor.

Referencias

AbdAlla, G.H.; Soliman, H.A.; Badr, O.A.; M.F. AbdRabbo, M.F. (2000). Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine. *EnergyConversion and Management*, Vol. 41, 559-572.

AltronicInc, *GTI-Bifuel*. Recuperado de www.gti-altronic.com, brochure of products.

Arango, Humberto Jorge. (2009). Calidad de los combustibles en Colombia. *Revista Ingenieria Universidad de los Andes*, ISSN 0121-4993.

Bedoya Caro Iván Darío; Arrieta, Andrés Amell; Cadavid, Francisco Javier; Pareja, Jhon Alexánder. (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. *Rev.fac.ing. univ*. Antioquia, (42), 79-93

Brachetti, Jürgen. (2010). *Dual-Fuel The best Fuel in the most efficient engine*, NGVA Europe position paper, mayo 2010.

Hountalas DT, Papagiannakis RG.(2000). Development of a simulation model for direct injection dual fuel diesel--natural gas engines, *SAE Trans.* 2000(1), 286.

Karim Ghazi, A. (1980). A review of combustion processes in the dual fuel engine -The gas diesel engine. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 6, 277-285.

Karim, G.A.; Zhigang, L.(1992). *A Predictive Model for Knock in Dual Fuel Engines*, SAE Paper 921550,

Karim G.A; Burn K.S.(1980). *The combustion of gaseous fuels in a dual fuel engine of the compression ignition type with particular reference to cold intake temperature conditions.* SAE 800263.

Kleinová, A.; Vailing, I; Lábaj,J.; Mikulec, J. Cvengroš, J.(2011). Vegetable oils and animal fats as alternative fuels for diesel engines with dual fuel operation. Fuel Processing *Technology*, 92(10), 1980-1986.

Korakianitis, T; Namasivayam, A.M.¸ Crookes, R.J. (2011). Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression–ignition engines *Fuel*, 90(7), 2384-2395.

Lafuente, M.; Genatios, C. (2005). *Crisis Petrolera y Cambio tecnológico*, Red Voltaire.

Lakshmanan, T.; Nagarajan, G.(2010). Experimental investigation on dual fuel operation of acetylene in a DI diesel engine. *Fuel Processing Technology*. 91(5), 496-503.

Liu, Z. (1998). *An examination of the combustion characteristics of compression ignition engines fuelled with gaseous fuels.* Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Calgary, Canada.

Liu,Z.; Karim, G.A. (1977). Simulation of combustion processes in gas-fuelled diesel engines. *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 211 (A); 159–169.

Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de kyoto de la convencion marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, fccc/informal/83*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_climatico.

Papagiannakis, R. G.; Hountalas D.T. (2004). 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, 2971-2987.

Parikh, P.P.; Bhave, A.G.; Kapse, D.V.; Shashikantha. (1989). *Study of thermal and emission performance of small gasifier–dual-fuel engine systems. Biomass.* Elsevier Science Publishers Ltd; .p.75 –97.

Payri F, Desantes J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos.* Editorial Universitat politécnica de valencia.

Pérez Súa, Sergio. (2011). *Factibilidad de Implementar un Sistema "Bi-Fuel" para Reducir el Consumo de Combustible Diesel en Los Motores Utilizados en las Facilidades de Producción.* Universidad Industrial de Santander UIS, Escuela de Petróleos.

Poonia, P.; Ramesh, A.; Gaur, R. R. (1999). *Experimental Investigation of the Factors Affecting the Performance of a LPG Diesel Dual Fuel Engine*. SAE Paper N.º 1999-01-1123.

Sahoo,B.B.; Sahoo, N.; U.K. Saha, U.K. (2009). of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review, Renewable and Sustainable *Energy Reviews* 13, 1151–1184.

Salazar Rosas, Jesus Ricardo. (2011). *Motor de Combustión Interna,* Apuntes clase, Mexico,

Sanz, S. (2007). *Motores*, Editex S.A., ISBN 9788497714792.

Sridhar G.; Paul P.J.(2001). MukundaHS.Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel—an experimental analysis. *Biomass and Bioenergy,* 21(1):61–72.

Silva Leal Vladimir; Arango Gómez, Jorge Eduardo; Sierra Vargas Fabio Emiro. (2012). *Exploratory Analysis of Research on Internal Combustion Engines Working with Biogas. Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética.* Universidad Nacional de Colombia.

Uma, R.; Kandpal, T.C.; Kishore, V.V.N. (2004). Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes. *Biomass and Bioenergy* 27, 195 – 203.

Unidad de planeación minero energética de Colombia. (2010). COGENERACION. Recuperado de web www.upme.gov.co, 2010.

Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Curso virtual de instalaciones y maquinas térmicas.* Recuperado de www.virtual.unal.edu.co.

U.S. Enviromental Protection Agency. (2012). *Emission Standards Reference Guide. Code of Federal Regulations* (CFR).

Xianhua D, Philip H. (1986). *Emissions and fuel economy of a prechamber diesel engine with natural gas duel fueling*. SAE 860069.