

Particularidades de los parámetros de desempeño de un moto-generador alimentado con GLP de elevado contenido de butano

Particularities of the output performance parameters of an engine-generator set fueled with LPG of high butane.

¹Carlos Alberto Romero Piedrahita, ²Edison de Jesús Henao Castañeda, ²Luz Adriana Mejía Calderón

¹Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

²Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

cromero@utp.edu.co

edisonhenao@utp.edu.co

adriamec@utp.edu.co

Resumen— El propósito del presente artículo es divulgar los resultados de aplicación de un protocolo de pruebas diseñado para valorar el desempeño de un moto-generador de 1200 kW nominales, operado originalmente con gas natural y convertido a gas licuado de petróleo, proveniente del secado del gas natural de los pozos de Cusiana en Colombia. La particularidad del gas licuado de petróleo de los pozos de Cusiana es su elevado contenido de butano (superior al 30%). Para la valoración del combustible GLP en el desempeño del moto-generador, éste se acopló a un banco de resistencias y se instrumentó para registrar información de variables lentas y rápidas, al igual que las emisiones. Se diseñó un protocolo de pruebas que combina cargas de arranque, en estados estacionarios y transitorios. Los análisis se enfocan principalmente en la calidad de la energía generada, el consumo de combustible y la potencia desarrollada. En general, sobre la operación del moto-generador, se concluye que ha operado normalmente con GLP manteniendo regímenes térmicos satisfactorios, en el estado de alistamiento en que fue ensayado, entregando potencia de manera estable bajo las condiciones de carga acorde con las previsiones de sus propietarios, aunque muy inferior a la potencia nominal. Los valores de vibración en aceleración, velocidad y desplazamiento no sobrepasan los valores límite dados por la norma ISO 8528-9. La operación del motor fue segura y en ningún punto de operación se detectó detonación para las cargas.

Palabras clave— Moto-generador, desempeño de motor, gas licuado de petróleo, GLP, Pruebas.

Abstract— The objective of this paper is to disclose the results of a field test protocol planned and implemented to evaluate the performance behavior of a 1200 kW engine-generator, originally operated with natural gas, converted to liquefied petroleum gas (LPG) from Cusiana oil wells in Colombia. The peculiarity of the liquefied petroleum gas from Cusiana, a byproduct in the drying

process of the natural gas, is its high butane content (above 30%). For the assessment of the LPG fuel on the performance of the engine-generator set, it was coupled a resistive load bank, and instrumented for low and high speed data, and emissions. It was designed an experimental procedure that combines starting, steady state, and transient loads. The analysis focuses mainly on the quantitative and qualitative analysis of the quality of the energy generated the fuel consumption, and the developed power. In general, the engine-generator has operated normally with Cusiana LPG fuel in the state of enlistment in which it was tested, maintaining satisfactory thermal regimes. It has delivered power in a stable manner under the conditions of load according to the forecasts of its owners, although much lower than the nominal rated power advertised for natural gas. The acceleration, velocity and displacement vibration values do not exceed the limit values given by the ISO 8528-9. The operation of the engine was safe, and at no point of operation detonation was detected for the loads.

Key Word — Engine-generator, engine performance, liquefied petroleum gas, LPG, Tests.

I. INTRODUCCIÓN

El GLP constituye en Colombia una alternativa al combustible Diesel con el que se alimentan los moto-generadores en las zonas no interconectadas y por esto importa mucho poder realizar la evaluación de la operación de los grupos electrógenos operando con GLP, con el fin de mostrar en primera instancia la viabilidad técnica de su utilización y apreciar los indicadores del rendimiento, las emisiones y las particularidades de desempeño [1]. Es corriente en la literatura de los motores de combustión la descripción del desempeño

de los motores comerciales y sobre todo de transporte, operando con combustibles alternativos, incluyendo el gas licuado de petróleo [2-6]. Sin embargo, el hecho de que el gas licuado de Cusiana tiene la particularidad de contener elevados porcentajes de butano, etano y heptano, demanda de una valoración particular del desempeño de motores cuando se pongan a operar con este combustible, considerando sus menores cualidades antidetonantes.

En la medida en que se buscan nuevas fuentes energéticas para los motores de combustión en el país y aparecen en el mercado nuevas tecnologías de conversión de sistemas de combustible y de control de los moto-generadores, se requieren pruebas experimentales con repetibilidad que den testimonio de la operación de los grupos electrógenos con GLP. En este artículo se presentan los resultados de un trabajo de investigación llevado a cabo sobre un motor de 1200 kW, originalmente diseñado para operar con gas natural y puesto a funcionar con GLP pero sin hacerse modificaciones o ajustes. Las pruebas se realizaron conforme a los puntos de operación especificados en la norma ISO 8178 [7] y tratando de acatar consideraciones relacionadas en otras normas de pruebas de motores [8-10].

Se ha instrumentado el moto-generador en su campo de utilización y se ha utilizado un banco de resistencias para medir los parámetros de energía generada, la eficiencia eléctrica y las emisiones atmosféricas, al igual que el desempeño mecánico y térmico, con consideración de los límites impuestos por la normatividad, los tiempos para las pruebas, las instalaciones y ambiente disponible, y también el tiempo disponible por los propietarios de la subestación.

En los siguientes apartes de este trabajo se describe el motogenerador ensayado, el protocolo de pruebas, los procedimientos, los resultados de la evaluación del moto-generador, sin entrar en detalles sobre las especificidades de todas las operaciones y actividades realizadas durante las pruebas. Se trató que los instrumentos utilizados fueran lo razonablemente apropiados dentro de lo que técnicamente y económicamente se puede adquirir en el medio; no todos los equipos utilizados tienen certificación, pero se han patronado en los laboratorios de las Universidades Nacional de Colombia y Tecnológica de Pereira

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta sección se describe el motor, el banco de resistencias de carga, la instrumentación utilizada y el procedimiento experimental de las pruebas.

A. Descripción del moto-generador evaluado.

El moto-generador integra un motor de combustión interna R16V300-H12 en "V" de cuatro tiempos y 16 cilindros, aspiración natural, cuatro válvulas por cilindro, árboles de levas partidos y ubicados en el bloque, con arranque por aire comprimido por presión sobre los pistones de uno de los bancos, válvula descompresionadora con acceso a la presión de cámara, sistema de alimentación de gas electrónico con

inyección secuencial a la entrada de las válvulas, sistema de encendido electrónico con control distribuido, sistema de lubricación a presión, sistema de refrigeración líquido con enfriamiento integrado del colector de gases de escape. Las especificaciones técnicas del moto-generador se resumen en la Tabla 1 [11].

Especificaciones del generador	
Modelo de MG	1200GFL-LPG
Modelo de motor	R16V300-H12
Modelo de generador	1FC6 636-5LA42
Método de acople	Acople elástico
Velocidad, min-1	600
Potencia (kW/KVA)	1200/1500
Voltaje (V)	0.45
Corriente (A)	1924.5
Frecuencia (Hz)	60
Factor de potencia	0,8
Método de arranque	Aire Comprimido
Refrigeración	Líquido
Eficiencia eléctrica	30%
Peso neto (kg)	44000
Especificaciones del motor	
Modelo de motor	R16V300-H12
Potencia (kW)	1300
Velocidad, min-1	600
Número y disposición de cilindros	16 cilindros, en V
Presión del gas (Pa)	2500
Diámetro (mm)	300
Carrera (mm)	380
MEP (MPa)	0,545
Relación de compresión	9:1
Cilindrada (L)	430
Presión máxima de combustión (MPa)	≤ 6.8
Temperatura de escape	≤ 580
Método de lubricación	Presión y salpique
Temperatura de aceite (°C)	≤ 80
Temperatura de salida del agua (°C)	≤ 75
Velocidad media del pistón (m/s)	7,6

Tabla 1. Especificaciones técnicas del moto-generador.

El suministro de gas se realiza desde un camión-cisterna, a través de un vaporizador eléctrico. A la salida del vaporizador se instala una válvula de alivio, un separador gas-aceite, un cortafuegos, la válvula reguladora de presión, válvula de control de presión realimentada o dependiente de la presión en el múltiple de admisión, la válvula solenoide de corte de combustible, un manómetro para la inspección en la línea y una válvula de globo para corte manual de combustible.

B. Instrumentación empleada

Para simular la carga al motor se empleó un banco de resistencias Avtron conectado al generador, obteniendo las

mediciones de energía con el equipo medidor de energía. Se emplea un analizador de potencia FLUKE 434/PWR, analizador de gases BACHARACH modelo 300, anemómetro de hilo caliente LT Lutron AM4204, caudalímetro Vortex OPTISWIRL 4070, sensores de temperatura Termocuplas tipo J y K, sensor de presión VEGA BAR14, termo higrómetro Amprobe TR300, sistema de adquisición de datos National Instruments NI CDAQ-9172, cámara termográfica Fluke Ti32, sonómetro UEI DSM 100, pirómetro para puntos calientes del motor Fluke FLK-568 y sensores acelerómetros para medición de vibraciones.

En la Figura 1 pueden observarse algunos detalles del trabajo experimental de instrumentación, se ilustra parte de los equipos de instrumentación, carga, monitoreo y registro de información. En particular se destacan los sensores de señal de voltaje del sistema de encendido, el medidor de vacío en el múltiple de admisión, el monitor de barras de las temperaturas de los gases de escape en los cilindros, la consola de información del generador, el sistema de adquisición de datos, el banco de resistencias Avtron y las conexiones del equipo medidor de energía.



Fig. 1. Detalles de instrumentación y equipos de monitoreo del moto-generador.

C. Protocolo de pruebas.

Al momento de la realización de las pruebas, se aceptó el valor de máxima carga definido y aceptado por el operador

del moto-generador, es decir el valor limitado por la estabilidad de operación y la temperatura de gases de escape ($T_{esc} \leq 580$, Manual de Operación JAE, pg.7 y 18 [11]). Este valor lo aproximamos a 680 kW, para las condiciones de puesta en operación (ajustes de relación de compresión, composición de la mezcla, avance y energía de encendido), previniendo la elevación de la temperatura de los gases de escape y el peligro de aparición de detonación.

Para la medición de las variables durante las pruebas se implementó un protocolo de pruebas como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 2. Ante la particularidad del moto-generador ensayado en las condiciones reales de explotación, se elaboró el protocolo presentado, sabedores de lo recomendable de seguir las normas de pruebas [7-10], pero al tiempo conscientes de la necesidad de ajustarse a las circunstancias concretas del moto-generador en explotación en zona rural no interconectada, con condiciones distantes a las requeridas para pruebas controladas de laboratorio. Aparte de la consideración de las recomendaciones previstas en las normas, se han seguido también algunos trabajos relacionados [12-16].

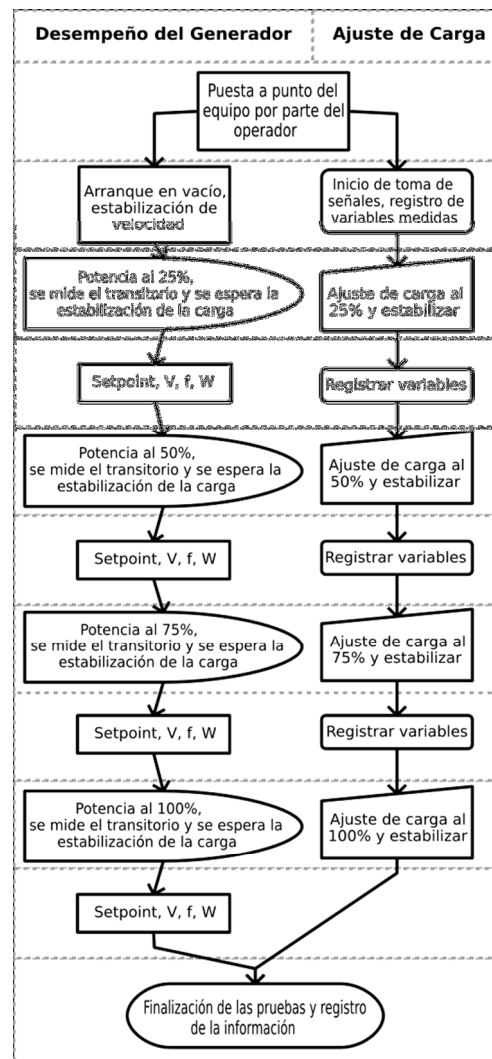


Fig. 2. Protocolo de pruebas para toma de datos.

Dado que el moto-generador está en servicio por parte de su propietario, la puesta a punto se realizó por parte del operador experto del equipo para asegurar que las variables eléctricas y mecánicas se encontraran dentro de los valores especificados por el fabricante. La prueba principal prevista en el protocolo se adaptó a las circunstancias y condiciones de campo y consistió, en lo global, de las siguientes fases: un transitorio hasta el punto de carga en turno, un tiempo de estabilización en el valor de la carga y dos mediciones durante el tiempo siguiente a la estabilización.

D. Características del combustible.

La cromatografía del gas utilizado es la detallada en la Tabla 2.

Análisis de composición del GLP to C12+			
Componente	Mole %		Peso %
CO ₂	Dióxido de carbono	0,01	0,01
N ₂	Nitrógeno	0,10	0,06
C1	Metano	0,01	0,00
C2	Etano	3,36	2,14
C3	Propano	71,45	66,84
iC4	i-Butano	13,13	16,20
nC4	n-Butano	11,91	14,70
iC5	i-Pentano	0,03	0,05
Gravedad del gas	1,6272	(Aire=1 @ 14.73 psia & 60°F)	
Peso total molar de la muestra	47.13	g mol-1	
Densidad ideal del gas	1,9831	kg m-3 @ 14.65psia, 60°F	
Poder calorífico bruto total	2665,7	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F	
Poder calorífico neto ideal	2454,5	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F	
Presión pseudo crítica	598.7	Psia	
Temperatura pseudo crítica	682.1	Rankine	
Factor de compresibilidad del gas, Z	0,979184	@ 14.65 psia & 60°F	

Tabla 2. Cromatografía del gas licuado de Cusiana.

III. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

La prueba se inició con los trabajos preliminares de diagnóstico y reconocimiento del moto-generador. Se midió la compresión, marcando un valor de 130 psi. Se alistó e instaló la instrumentación: sensores de temperatura en las culatas de los cilindros 2 y 3, se aprovechó el termopar propio del motor de la salida de gases de escape del cilindro 3. Se instalaron sensores de temperatura de refrigerante, los sensores de presión de cámara y de detonación en el cilindro 9. Se instalaron los medidores de presión en el múltiple de admisión y la sonda del medidor de gases de escape a la salida del

múltiple. Los acelerómetros para la medida de vibraciones se instalaron en los sitios referenciados por la norma, montando cuatro adicionales. Se instaló el sensor de revoluciones y se alistaron la cámara termográfica, el medidor de sistema de encendido, el medidor de nivel de ruido y el medidor de velocidad de aire de admisión. Simultáneamente se realizaron las adecuaciones correspondientes al banco de resistencias para la simulación de la carga del moto-generador. Se extrajeron valores entregados por el sistema de control del motor para cotejarla con los valores visualizados en los equipos de medición instalados.

En este aparte se presentan los resultados de las mediciones, describiendo primero el ciclo de operación, luego describiendo los comportamientos de las temperaturas y las emisiones. La “salud mecánica” se evalúa mediante el comportamiento de las vibraciones y la respuesta del motor a los cambios de carga. Para los puntos cercanos a los recomendados para el monitoreo de vibraciones, se dan los resultados de las velocidades, aceleraciones y espectro de frecuencia. Descritas las variables de comportamiento se ilustran las gráficas de evolución de las potencias eléctricas, los voltajes, las corrientes y la frecuencia entregados por el moto-generador, referenciadas al tiempo reloj o a la secuencia de la prueba. Finalmente, se cuantifica el consumo de combustible, emisiones y se valora el rendimiento.

A. Ciclo de carga, respuesta térmica del moto-generador y emisiones

Dado que el motor originalmente está diseñado para operar con gas natural y considerando la menor resistencia a la detonación del GLP por el alto contenido de butano, se confió en el valor de máxima carga definido y aceptado por el operador del moto-generador, valor limitado por la estabilidad de operación y la temperatura de gases de escape ($T_{esc} \leq 580$ °C) [11]. Este valor lo aproximan a 680 kW, para las condiciones de puesta en operación (ajustes de relación de compresión, composición de la mezcla, avance y energía de encendido), previniendo la elevación de la temperatura de los gases de escape y la aparición de detonación.

Definido el valor de potencia máxima para la prueba, se cargó el moto-generador según el ciclo de carga representado en la Figura 3.

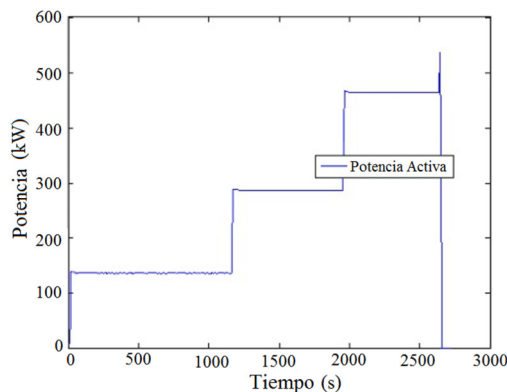


Fig. 3. Ciclo de potencia según protocolo.

B. Resultado de las mediciones lentas.

El comportamiento térmico del motor durante las pruebas ha sido normal, observando los valores crecientes y finalmente estabilizados de las temperaturas de los fluidos y de las paredes externas del motor (Figura 4). La temperatura del refrigerante es inferior a los 60 °C durante toda la prueba; la temperatura del aceite es inferior a 70 °C y la temperatura de gases de escape está por encima de los 560 °C.

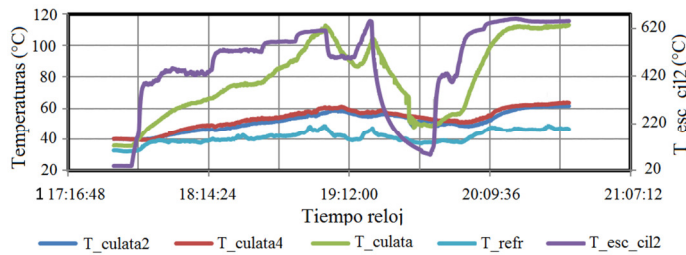


Fig. 4. Comportamiento de las temperaturas del motor durante el ciclo principal de carga.

C. Resultado de las mediciones rápidas.

Comportamiento de las temperaturas del motor durante el ciclo principal de carga.

1) Vibraciones y revoluciones. Para la evaluación del estado vibracional del moto-generador, se instalaron acelerómetros en las direcciones x, y e z, en puntos cercanos a los recomendados por la norma, como se ilustra en la Figura 5.

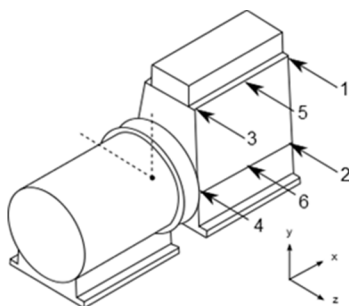


Fig. 5. Ubicación de los sensores de vibración en la evaluación del moto-generador.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de las mediciones para operación del moto-generador a 620 kW.

El análisis de vibraciones, permite concluir que el desempeño del moto-generador es satisfactorio, aunque se observa una alta vibración en la posición 5z y puede ser atribuible a un error del sensor, lo que no pudo verificarse por haberse realizado una sola medición.

Con una velocidad de muestreo de 100 kHz, se ha realizado el registro de la velocidad angular del cigüeñal durante todas las transiciones de carga del ciclo de prueba. Se ha observado que, a medida que se incrementa la carga al motor le cuesta más entrar en el estado estable. Las excursiones de velocidad

(de frecuencia para la entrega de energía eléctrica son bastante severos y se quedan por fuera de los valores de las normas).

Potencia: 620 kW		Temperatura del ambiente: 30°C				
Velocidad: 600 min ⁻¹		Tipo de combustible: GLP				
Punto	Valores rms generales (2 Hz a 300 Hz)					
	Dirección de la medida					
	(x)		(y)		(z)	
v	a	v	a	v	a	
mm/s	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	mm/s	mm/s ²	
1	0,51	0,53			0,54	0,67
2					0,56	0,75
3	0,78	0,60	33,7	8,5	0,95	0,72
4			0,9	0,9	3,38	3,74
5					3,9	34,6
6			0,9	0,9	3,3	3,69

Tabla 3. Resultados de las mediciones para operación del moto-generador a 620 kW.

En la Figura 6 se ve la manera como se desvanecen las revoluciones durante el transitorio de carga de 525 a 621 kW, el motor termina por apagarse.

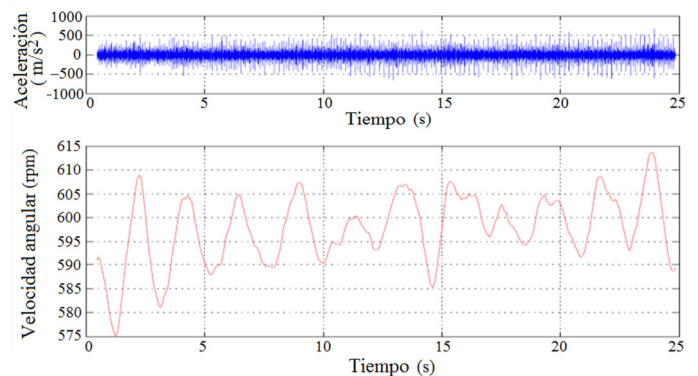


Fig. 6. Respuesta vibracional del punto 1 y de las revoluciones del motor para el cambio instantáneo de Carga 525 a 621 kW.

2) Variables de energía. Por la destinación de los motores, la valoración de la calidad de la energía generada es importante. Se ha registrado el comportamiento de las potencias (reactiva, activa y aparente), los voltajes y corrientes de línea, el factor de potencia y la frecuencia. El equipo utilizado cumple con las tolerancias mínimas exigidas por la norma ISO 8528-6 de 2005 [9].

En la gráfica de la Figura 7 se observa la variación de los voltajes de línea y frecuencia a la salida del generador. Durante la primera parte del ciclo (aproximadamente a 137 kW de carga) el moto-generador no ofrece valores parejos en los voltajes de línea. Además, estos mismos voltajes de línea tienen entre ellos diferencias significativas durante todos los puntos de operación. Podría argumentarse que las mayores fluctuaciones durante la primera fase de operación bajo ciclo se debe en parte a la baja temperatura del refrigerante.

Se ha registrado el comportamiento de las potencias (reactiva, activa y aparente), los voltajes y corrientes de línea, el factor

de potencia y la frecuencia. El comportamiento de las corrientes de línea es el mostrado en las gráficas de la Figura 8. Como es de esperarse, la corriente sigue bien el ciclo de carga resistivo.

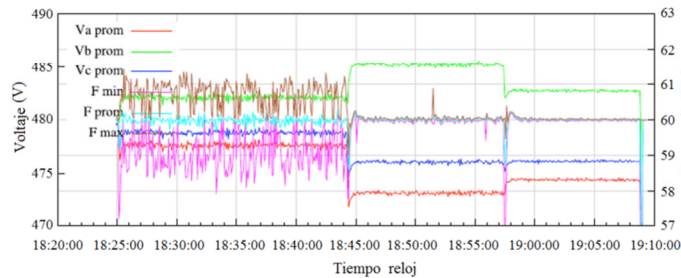


Fig. 7. Comportamiento de los voltajes de línea y la frecuencia durante el ciclo principal de carga.

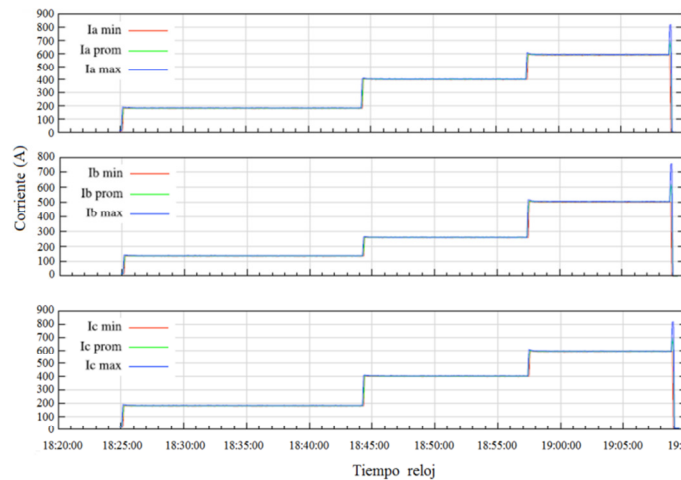


Fig. 8. Comportamiento de las corrientes de línea durante el ciclo principal de carga.

El moto-generador cumple con las tolerancias mínimas exigidas por la norma ISO 8528-6 de 2005 [9]. Para valorar la calidad de los parámetros de energía, se tienen en cuenta los límites establecidos por la norma ISO 8528-5, ordenados en la tabla 4 de esta norma, según la clase de desempeño de los generadores. A la luz de los resultados y considerando los valores de la tabla de valores permisibles, el moto-generador cumple con las especificaciones demandadas para los grupos electrógenos de clase G2.

3) Variables de sistema de encendido. El controlador y el sistema de información propio del motor permiten ajustar y monitorear automáticamente el ángulo de avance de la chispa y también la misma duración y la energía de ésta, en función de las condiciones de operación. Estas variables son indicadoras de la estabilidad de los procesos de combustión en los motores. Para el régimen de prueba seguido, la duración y energía de la chispa en las bujías de los cilindros tuvieron el comportamiento graficado en las Figuras 9 y 10.

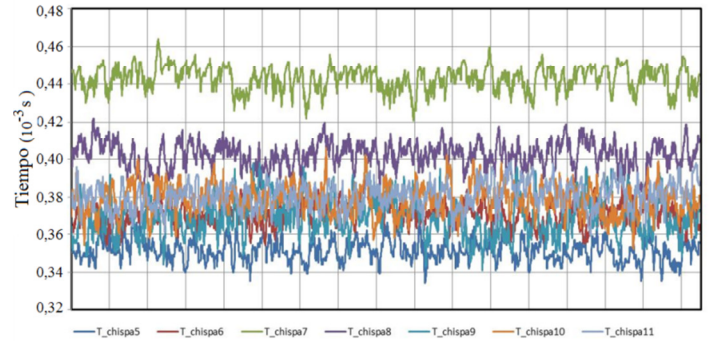


Fig. 9. Variabilidad de la chispa en los cilindros 5-11 del motor.

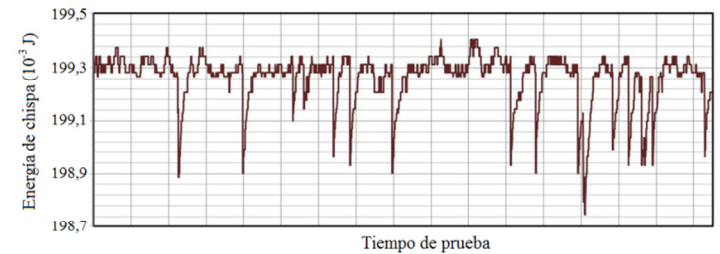


Fig. 10. Variabilidad de la energía chispa en el cilindro 5.

Se ve que hay mucha variabilidad en la energía de chispa y esto es atribuible a las fluctuaciones de las condiciones en las cámaras de combustión, a variabilidad de la combustión, a operaciones de mantenimiento y reglajes, pero también seguramente a la variabilidad del combustible (el combustible GLP con el que se alimenta el motor, proveniente de un camión-cisterna es pasado por un evaporador) y la composición de la mezcla. Debe recordarse que el controlador ajusta los tiempos y ángulos de chispa e inyección en función de desempeño de cada cilindro, para responder a las variables de control importantes para el fabricante. Para el caso del moto-generador en estudio, es decisiva la conservación de las temperaturas de escape por debajo de los 560 °C según recomendaciones del fabricante del motor (alarma ajustada para temperatura de 775 °C).

La gráfica de las revoluciones del motor, en la Figura 11, permite visualizar su gran variabilidad, con valores cercanos al 3%, lo que se enmarca dentro de los valores límite considerados por la norma ISO 8528-2 [9] para los generadores de clase 2.

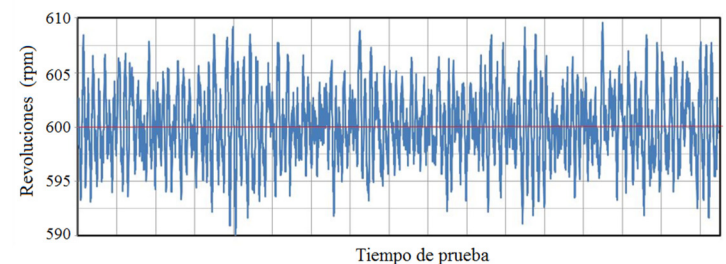


Fig. 11. Variabilidad de las revoluciones del motor, graficada con la información del controlador.

4) Presión en la cámara de combustión. Aprovechando que el motor dispone de una válvula indicadora, se instaló un transductor de presión en uno de los cilindros del motor y se registraron las variaciones mostradas en la Figura 12, para las cargas estabilizadas de la secuencia de carga. La señal de presión medida refleja el comportamiento de la presión en la cámara, pero su magnitud es atenuada por la resistencia fluidica del tubo adaptador previsto para el transductor de presión. Por dificultades de calibración y ante las incertidumbres de las mediciones, para valoración cualitativa de la influencia del combustible en el desempeño del motor, se ha preferido dejar la señal en su magnitud de voltaje (efectivamente los valores de las presiones se dan en voltios y su conversión a bares no puede hacerse, porque la presión no se toma directamente en la cámara y el valor sería inferior al real por la acción atenuadora del tubo adaptador). Sirve bastante la gráfica para ver la variación de la presión relativa a los cambios de carga y para visualizar la variabilidad cíclica de la combustión. Esta información permite conocer la manera como se quema el combustible.

En vacío se observa una uniformidad de combustión del motor, pero a 175 kW se presenta una gran irregularidad cíclica. No se puede atribuir esto aún al tipo de combustible porque no se ha registrado la operación con gas natural. Es bien evidente el crecimiento de la presión en la cámara con el crecimiento de la carga. Midiendo bien la presión en la cámara se podrá determinar el calor liberado, la variación de la masa quemada de combustible y la velocidad de desprendimiento de calor.

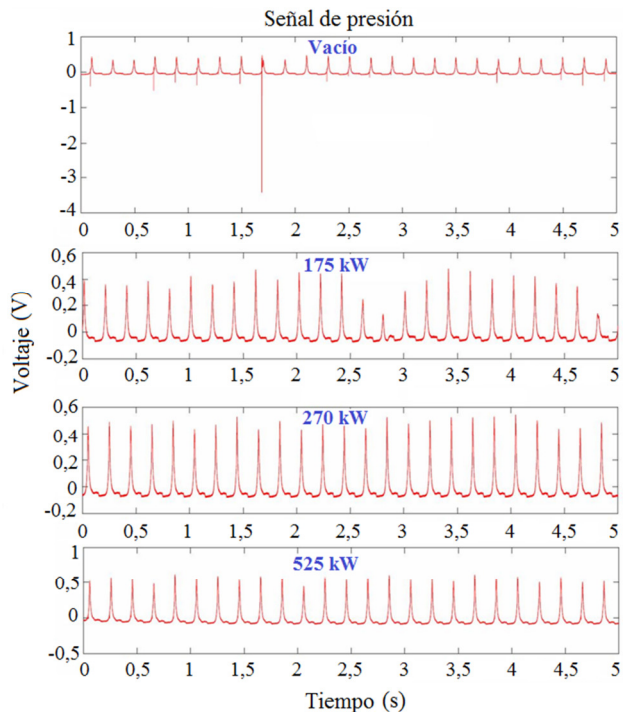


Fig. 12. Señal de presión en la cámara de combustión del motor obtenida con el sensor piezoeléctrico en la conexión de la válvula indicadora.

5) Consideraciones sobre las emisiones del motor. Los resultados de la cromatografía del combustible GLP utilizado para la prueba permitieron conocer la composición éste: [0,01 CO₂ + 0,1 N₂ + 0,01 CH₄ + 3,36 C₂H₆ + 71,45 C₃H₈ + 13,13 iC₄H₁₀ + 11,91 nC₄H₁₀ + 0,03 iC₅H₁₀]; masa molar de 47,13 kg/kmol.

Las emisiones medidas durante las pruebas arrojaron los valores reportados en la Tabla 4. Sin embargo, estos valores no pueden utilizarse para calcular el balance de masas debido a los altos niveles de dilución que presentan los productos secos, lo cual se refleja en los porcentajes de O₂.

Régimen	CO ₂	CO	O ₂
Marcha en vacío	3,85	0,12	20,41
Estable 25 %	4,60	0,247	19,76
Transitorio 50 %	4,41	2,22	20,1
Estable 50 %	5,24	2,78	20,02
Estable 75 %	5,42	2,85	20,01
Inicial a 100 %	5,29	1,36	20,90

Tabla 4. Emisiones medidas durante las pruebas.

6) Rendimiento del generador. Entre los objetivos de las pruebas, se ha previsto medir el desempeño en generación eléctrica del moto-generador, midiendo el consumo de combustible y relacionándolo con la potencia eléctrica generada. El motor operó de manera gruesa en los tiempos presentados en la Figura 13. La primera parte corresponde al protocolo de pruebas, la segunda parte a una prueba de larga duración bajo carga máxima, y la tercera a un tiempo en el que se realizó un estudio de sensibilidad. Entre las dos primeras partes se tuvo dos arranques de motor durante tiempos muy reducidos y no se muestran.

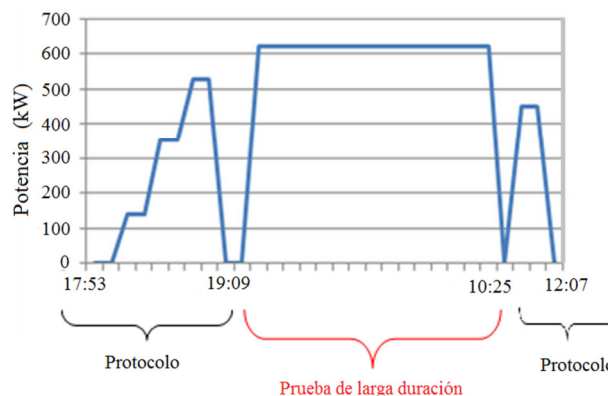


Fig. 13. Esquema global de las pruebas del moto-generador.

La energía gastada en los ciclos adicionales a la prueba de larga duración corresponde a la suma de las cuatro áreas de la Figura 14. La suma total de estas energías constituye 265,25 kWh.

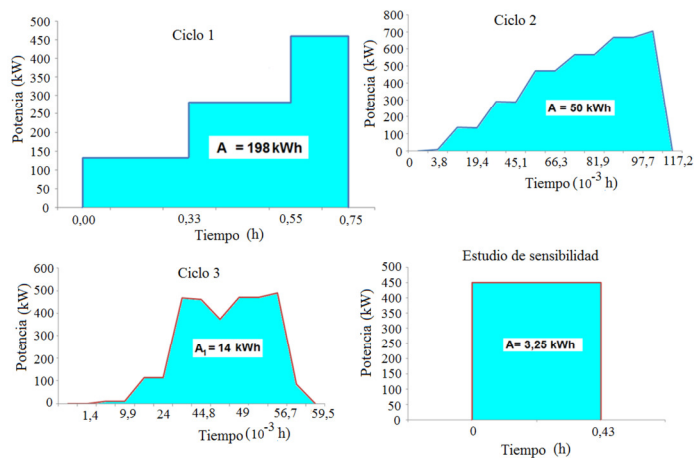


Fig. 14. Ciclo principal y ciclos menores de operación del moto-generador durante las pruebas.

La energía de larga duración se representa en la Figura 15.

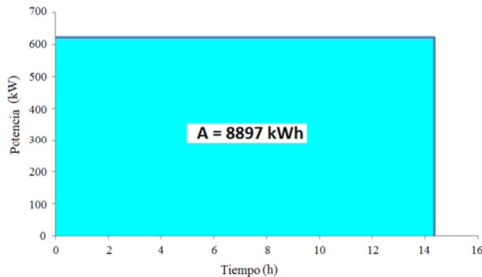


Fig. 15. Consumo de energía durante el período de larga duración del moto-generador.

Durante las pruebas se consumió un total de 3720 kilogramos del combustible descrito por la tabla de cromatografía. Con la densidad de 1,9831 kg/m³ y el poder calorífico de 2506,6 BTU/pie³ (convertidos a 47094,5852 kJ/kg) se ha obtenido una energía liberada durante el tiempo equivalente de la prueba de 175,191857 GJ. Este es el combustible que se ha gastado durante el ciclo de carga o prueba principal (45 minutos = 0,75 horas), dos microciclos de carga posteriores (0,18 horas), la prueba de larga duración (14,31 horas a 620 kW de carga) y el estudio de sensibilidad (0,43 horas a 450 kW).

Todas las pruebas pueden llevarse a un régimen de carga equivalente de 620 kW y un tiempo de 14,774 horas, asumiendo que el rendimiento del motor en los microciclos, durante el ciclo principal y el tiempo del experimento es el mismo. Esta asunción puede hacerse dado que la relación entre energías realizadas a tiempos secundarios a carga equivalente y tiempo de larga duración es de 0,0278 (265,25/9428,25 = 0,0278), lo que se traduce en un error de aproximación de 2,78 %. Considerando estas aproximaciones, la energía convertida en potencia por el motor ha sido de 32,975568 GJ. La eficiencia eléctrica del moto-generador es: $EC = \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Energía aportada por el combustible}} = \frac{32975568}{175191857} = 0,18822546$.

Es decir, el rendimiento del motor a las condiciones de la prueba, a 350 metros sobre el nivel del mar a las condiciones

ambientales de las pruebas y bajo las condiciones técnico-mecánicas a las que se encontraba el motor, ha sido de 18,823 %.

En el manual de operación del motor [11], se reporta un gasto de combustible de 12MJ/kWh, que, llevado a energía, es equivalente a un rendimiento de 12000J/3600 kW*s = 0,3. Es decir, un rendimiento o “eficiencia” de 30% operando con gas natural.

El valor de 18% obtenido, distante del 30%, debe considerar varias cosas, entre ellas:

- La eficiencia de cualquier motor de encendido por chispa se reporta a un régimen de carga nominal base (para el caso, el motor no está operando cerca de la máxima potencia nominal de catálogo).
- El motor no se ha afinado para las condiciones de operación y el combustible GLP a sus mejores valores de sintonización y regulación.
- El combustible GLP difiere del gas natural, en sus propiedades calóricas y limita el desempeño térmico del motor.
- El sistema de control del moto-generador en su conjunto impone restricciones dinámicas y de control al motor mismo y parte de esto es el forzamiento de unas revoluciones dadas por el tipo de generador.

IV. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CONTROLADOR HEINZMAN DEL MOTOR

La información provista por el controlador del motor puede usarse para identificar los sistemas del motor y para estudios posteriores al aquí descrito. En la gráfica de la Figura 16 se ve la acción seguidora de la presión en el múltiple de admisión con relación a la carga. Con esta información de presión MAP, las revoluciones y la temperatura de admisión, podría calcularse el flujo de aire aspirado. Un intento de correlación se presenta en la Figura 17.

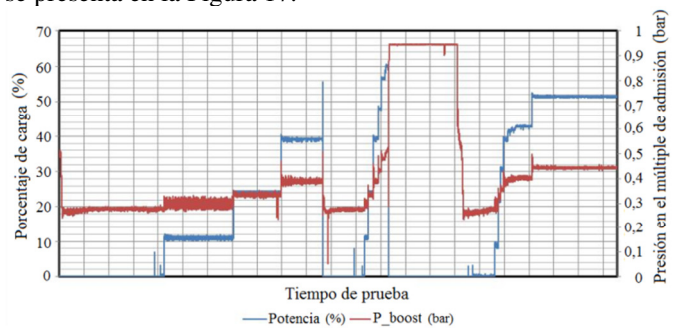


Fig. 16. Presión en el múltiple de admisión a medida que varía la carga del motor.

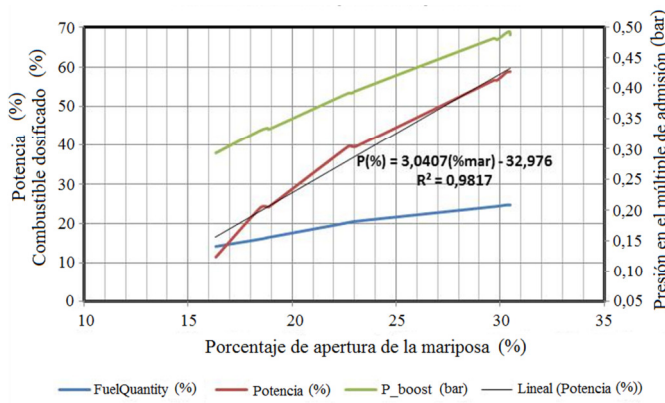


Fig. 17. Posible correlación entre el combustible dosificado y la potencia con la apertura de la mariposa de aceleración.

Del controlador se puede ver la relación entre la carga y las variables de inyección y mariposa de aceleración que se presentan en las Figuras 18 y 19.

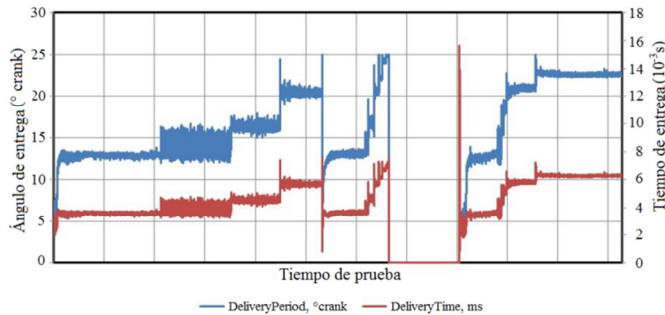


Fig. 18. Parámetros de dosificación de combustible a medida que corre el ciclo de prueba.

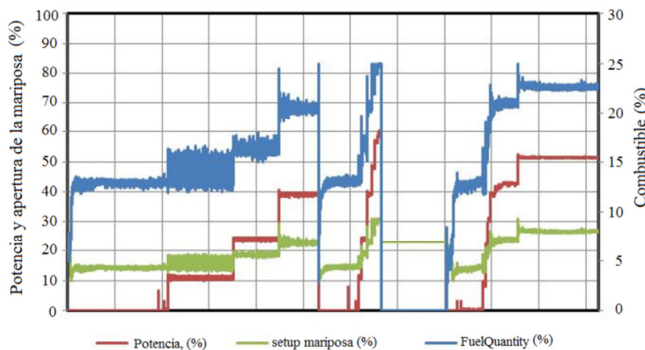


Fig. 19. Excursión de la apertura de la mariposa, la dosificación del combustible y su relación con la potencia entregada por el motor durante el ciclo de prueba.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado en este artículo el trabajo de evaluación experimental adaptada a las circunstancias y condiciones de campo de un moto-generador, originalmente operado con gas natural, operando con gas licuado de petróleo con alto contenido de butano, a partir de un protocolo diseñado para tal fin y admitiendo que no se permite realizar al moto-generador operaciones de ajuste al operar con el combustible de prueba.

Instrumentando in-situ el moto-generador, la evaluación experimental se realizó a partir del seguimiento de los comportamientos de las temperaturas y las emisiones, el comportamiento de las vibraciones, el consumo de combustible, la respuesta mecánica y eléctrica del moto-generador a los cambios de carga.

Aprovechando la versatilidad y riqueza del controlador Heinzman del motor, pudo observarse la calidad de la energía en el sistema de encendido de cada uno de los cilindros y también la temperatura de los gases de escape. Son estas variables importantes a partir de las cuales podría realizarse una búsqueda experimental de los valores de control mejorados según la composición y calidad de combustible utilizado. Sin embargo, debe aclararse que el moto-generador de manera primaria está destinado a operar principalmente con gas natural, por lo que los ajustes no han sido alterados.

En general, como conclusión sobre la operación del moto-generador, puede decirse que ha operado normalmente en estado estacionario con GLP en el estado de alistamiento en que fue ensayado y hasta la potencia en la que se pudo ensayar. Ha entregado potencia de manera estable bajo las condiciones de carga acorde con las previsiones de sus operadores (620 kW, cerca de la mitad de la potencia de catálogo), manteniendo regímenes térmicos satisfactorios, aunque limitados en potencia a un valor muy por debajo del valor nominal realizable con el gas natural como combustible de diseño.

A la máxima carga se ha podido llevar el motor por incrementos graduales. Operando con GLP y sin realizar ajustes en el controlador, la respuesta en los transitorios de alta carga es defectuosa, demostrando esto pérdida de adaptabilidad del motor (efectivamente, se observó la reducción rápida del motor hasta apagarse durante el transitorio de carga de 525 a 621 kW), y traduciéndose esto en pérdida de calidad de la energía durante los transitorios a medida que aumenta la carga en el sistema. Le cuesta al controlador recuperar la sincronía para este generador cerca del límite de su cargabilidad.

Los valores de vibración en aceleración, velocidad y desplazamiento no sobrepasan los valores límite dados por la tabla C1 de la norma 8528-9. La operación del motor fue segura y no se detectó detonación para las cargas aplicadas.

Operando con GLP, las excursiones de velocidad (de frecuencia para la entrega de energía eléctrica) son bastante severas y se quedan por fuera de los valores de las normas. A la luz de los resultados y considerando los valores de la tabla de valores permisibles de la norma ISO 8528-6 de 2005, el moto-generador cumple con las especificaciones demandadas para los grupos electrógenos de clase G2. Las desviaciones de la frecuencia, están por debajo de los máximos dictados para los grupos clase G2.

Aunque los valores del monóxido de carbono, CO, parecen bajos para el tipo de motor, no se puede confiar mucho en ellos, por las concentraciones tan altas del oxígeno. Estas se pueden deber a niveles de dilución grandes con aire, ocasionados por entradas de aire hacia el sistema de escape en la localidad de inserción de la sonda del analizador (dada la

ubicación del moto-generador y las condiciones abiertas del campo de explotación, no fue fácil aislar las mediciones). No obstante esto, mediciones posteriores con la sonda lambda permitieron observar resultados estequiométricos de la mezcla ($\lambda = 1,05$). Los valores de hidrocarburos emitidos son altos. Sin embargo, estos valores no pueden utilizarse para calcular el balance de masas debido a los altos niveles de dilución que presentan los Productos Secos, lo cual se refleja en los porcentajes de O_2 .

La observación de la presión de combustión permitió, por el muestreo de la forma de la señal en cámara en uno de los cilindros del motor, concluir que la combustión es buena con el GLP y que no se presenta variabilidad cíclica significativa en los estados estacionarios en los que el moto-generador fue cargado, excepto para la carga de 175 kW.

La eficiencia obtenida del motor alimentado con GLP de Cusiana, 18%, es muy inferior al valor de catálogo a plena carga, 30%, reportado para el gas natural, lo que se explica en parte por la operación relativa a carga parcial durante la presente experimentación, acotada por la limitación impuesta de no realizar ajustes al motor, por la limitación de las temperaturas de escape y, lo más importante, por las limitaciones propias del combustible, menor resistencia a la detonación del GLP de Cusiana por su alto contenido de butano.

REFERENCIAS

- [1] Ecopetrol, "Consultancy to Determine the Schemes for Use of Derived Liquid Petroleum Gas Surplus for Electricity Generation in Oil Fields", Tech. Rep, april 18, 2013, Bogotá.
- [2] M. Masi. "Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas)", *Energy* 41, 2012, pp. 252-260.
- [3] J.E. Arango, F.E. Sierra and V. Silva. "Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogas", *Tecnura*, vol 18, no 39, 2014, pp. 152-164.
- [4] M.Y. Sulaiman, M.R. Ayob, and I. Meran. "Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG", *Procedia Engineering* 53, 2013, pp. 579 – 585.
- [5] C.A. Forero, J.E. Arango and F.E. Sierra. "Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo" *Ingeniería Mecánica*, vol 19, no 3, 2014.
- [6] D. Kalra, V. Babu , M. Vijay. "Effects of LPG on the performance and emission characteristics of SI engine - An Overview", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol 2, Issue 3, 2014.
- [7] *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement*, International Organization for Standardization - ISO 8178:2002, 2002.
- [8] *Internal combustion engines – Determination and method for the measurement of engine power -- General requirements*, International Organization for Standardization - ISO 15550:2002, 2002.
- [9] *Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets - Part 1: Application, ratings and performance*, International Organization for Standardization - ISO 8528:2005, 2005.
- [10] *Reciprocating internal combustion engine s– Performance*, International Organization for Standardization - ISO 3046:2002, 2002.
- [11] R16V300 Gas Engine Operation & Maintenance Manual, 2010.
- [12] Cummins Westport. Cummins Westport fuel quality calculator, <http://www.cumminswestport.com/fuel-quality-calculator>.
- [13] *Liquefied petroleum gas code*, National Fire Protection Association, NFPA 58:2011, 2011. Disponible en: <https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/58/FI58-2011.pdf>
- [14] H.E., Saleh. "Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine". *Fuel*, vol 87, Issues 13–14, 2008, pp. 3031 - 3039. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.04.007.
- [15] M.P. Poonia, A. Ramesh, R.R. Gaur. "Experimental investigation of the factors affecting the performance of a LPG-Diesel dual fuel mode", *SAE Technical Paper* 1999-01-1123, 1999. DOI: 10.4271/1999-01-1123.
- [16] C. S. Mistry, C.K. Pithawalla. "Comparative Assessment on Performance of Multi cylinder Engine Using CNG, LPG and Petrol as a Fuel". *SAE Technical Paper* 2005-01-1056, 2005.