

Evaluación del desempeño de un motor-generador que utiliza GLP de alto contenido de butano como combustible

Performance evaluation of an engine-generator set operating on high butane content LPG fuel

Carlos Alberto Romero-Piedrahita ^{1a}, Luz Adriana Mejía-Calderón ^{1b}

¹ Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correos electrónicos: ^a cromero@utp.edu.co, ^b adriamec@utp.edu.co. Orcid: ^a [0000-0001-5647-1918](https://orcid.org/0000-0001-5647-1918), ^b [0000-0003-3008-2476](https://orcid.org/0000-0003-3008-2476)

Recibido: 2 agosto, 2021. Aceptado: 13 noviembre, 2021. Versión final: 3 enero, 2022.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del diagnóstico de desempeño de un grupo motor-generador de 6 cilindros, originalmente diseñado para funcionar con combustible diésel o con gas natural, operando en modo de encendido por chispa y alimentado con gas licuado de petróleo (GLP) de alto contenido de butano. Con el fin de evaluar la operación en estados estacionarios y transitorios del motor-generador, se ha diseñado un protocolo original de prueba y registro de variables de operación, basado en una secuencia escalonada de cargas, que comprende el arranque en frío, la operación en vacío, la operación en unos puntos de carga media y a una limitada plena carga. Durante las pruebas se registraron continuamente la variación de la velocidad de rotación del cigüeñal, el tiempo de calentamiento, las temperaturas del motor, las vibraciones del bloque, la potencia activa/reactiva y frecuencia del motor-generador, así como las emisiones de escape. Los resultados evidencian que, durante el arranque en frío el motor tarda en alcanzar la velocidad nominal, su tiempo de calentamiento es largo y su respuesta de revoluciones durante los transitorios de carga también es lenta, reflejándose esto último en las desviaciones de voltaje y frecuencia de la energía de salida; también durante los transitorios se intensifican los niveles de vibración, aunque los valores se inscriben dentro de los rangos aceptables según la normativa. El desempeño del par del grupo motor-generador es bueno cuando opera con GLP, satisfaciendo las exigencias para las unidades de motor-generador de clase G2, pero durante los cambios transitorios no cumple con las especificaciones requeridas para la clase G1, en términos de desviaciones de frecuencia y voltaje. A la luz de los límites de emisiones sugeridos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para las unidades estacionarias, se puede concluir que, sin ajustes y regulaciones apropiados particulares para el GLP, el conjunto motor-generador no cumple con los límites de emisión de monóxido de carbono.

Palabras clave: motor de combustión; GLP de alto butano; protocolo de ensayo; diagnóstico de operación; tiempo de calentamiento; desempeño transitorio; estabilidad dinámica; vibraciones; emisiones contaminantes de escape; calidad de energía generada.

Abstract

This paper presents the results of the performance diagnosis of a 6-cylinder engine-generator set, originally designed to run on diesel fuel or natural gas, operating in spark ignition mode and fueled with high butane content liquefied petroleum gas (LPG). In order to assess the steady-state and transient operation of the engine-generator, an original protocol for testing and recording of operating variables was designed, based on a stepped sequence of loads,

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: C. A. Romero-Piedrahita, L. A. Mejía-Calderón, "Evaluación del desempeño de un motor-generador que utiliza GLP de alto contenido de butano como combustible," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 143-162, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022012>.

comprising cold start, idling, operation at some mean load points and at a limited full load. During the tests, the variation of crankshaft rotational speed, warm-up time, engine temperatures, block vibrations, active/reactive power and engine-generator frequency, as well as exhaust emissions were continuously logged. The results show that, during the cold starting process, the engine is slow to reach nominal rated speed, its warm-up time is lengthy and its speed response during load transients is also sluggish, the latter being reflected in the voltage and frequency deviations of the output power; also, during transients, vibration levels are intensified, though the values are within the acceptable ranges according to the regulations. The torque performance of the engine-generator set is good when operating with LPG, satisfying the requirements for class G2 engine-generator units, but during transient processes it does not meet the specifications required for class G1, in terms of frequency and voltage deviations. In light of the emission limits suggested by the Environmental Protection Agency (EPA) for stationary units, it can be concluded that, without appropriate adjustments and regulations particular to LPG, the engine-generator set does not meet the carbon monoxide emission limits.

Keywords: combustion engine; high butane LPG; test protocol; operation diagnostics; warm-up time; transient performance; dynamic stability; vibrations; exhaust pollutant emissions; generated power quality.

1. Introducción

El gas licuado de petróleo (GLP), según la definición contenida en la Resolución MME 40246 de 2016 [1], es “una mezcla de hidrocarburos extraídos del procesamiento del gas natural o del petróleo, gaseosos en condiciones atmosféricas, que se licúan fácilmente por enfriamiento o compresión, principalmente constituido por propano y butano”, con una alta proporción del primero, que se obtiene del proceso de refinación del crudo o del tratamiento de los líquidos del gas natural (secado). El GLP es uno de los recursos importantes que posee actualmente Colombia en su canasta energética, usándose mayormente para cocción, tanto a nivel industrial como residencial. Se dispone de GLP con alto contenido de butano de diferentes calidades, obtenido como subproducto en el secado del gas natural, en diferentes campos de extracción como Rancho Hermoso, Toqui-Toqui, La Punta, La Gloria y Campo Corcel. Este GLP puede aprovecharse para la generación de energía eléctrica con grupos electrógenos basados en motores de combustión interna, sustituyendo el combustible diésel o el gas natural, en las instalaciones de los pozos petroleros en Colombia, pero debe asegurarse la fiabilidad de desempeño de los motores de combustión empleando las variedades en composición de GLP y, para esto, se requiere realizar pruebas.

Según el reporte de la UPME [2], Cartagena, Apiay y Cusiana producen el GLP con mayor contenido de propanos, contrastando con el contenido de butanos del GLP producido en los campos de Cusiana, Dina y Toqui-Toqui, el cual varía entre 40 y 50% aproximadamente. Con corte a julio de 2016 se tiene un 63% de la producción total de GLP a partir del secado de gas natural, lo que constituye un combustible potencial en la generación de electricidad, aunque tiene como inconvenientes su alto nivel de butano, su alta densidad y difícil vaporización. Precisamente, mediante la Ley 1715

de mayo 13 de 2014 (Artículo 35), se establece el uso del GLP y el subsidio determinado por el Ministerio de Minas y Energía en las Zonas No Interconectadas (ZNI). Cuando sea más eficiente emplear GLP para la generación de energía eléctrica en lugar del combustible diésel, se puedan implementar esquemas de generación distribuida de energía a partir de GLP. La Resolución CREG 002 de 2019 formaliza la participación del GLP como alternativa para respaldar la generación de energía de plantas de generación de energía que participen en las subastas del cargo por confiabilidad.

El GLP, en general, es una alternativa de combustible que genera una menor huella de carbono en sistemas energéticos [3]. A diferencia de la atención prestada al estudio de los motores de combustión alimentados con propano y GLP con altos contenidos de butano en el transporte en diferentes países, no son muchos los estudios publicados sobre el uso de GLP de alto butano en grupos motor-generadores (MG) [4], [5], [6], [7]. Compañías como Cummins y Caterpillar, entre otras, diseñan algunos de sus motores para operar con GLP con composiciones de propano/butano muy diferentes de las del GLP de Cusiana. Más relacionados con el uso de GLP para la generación de energía son los trabajos experimentales y de investigación en motores de encendido por chispa con potencia de salida inferior a 180 kW, que funcionan con GLP. Algunos de estos trabajos fueron cubiertos en la revisión llevada a cabo por Lawankar et al. [8].

El objetivo final del trabajo aquí expuesto es proporcionar evidencia en relación con el desempeño en campo de un grupo motor-generador diésel/gas natural, cuando se le hace trabajar en modo de encendido provocado, alimentándolo con GLP de elevado contenido de butano y sin realizar recalibraciones (simulación de cambio de combustible por contingencia en un motor-generador). Se busca mostrar en primera instancia la

viabilidad técnica de su utilización y dar unos primeros indicadores de las particularidades de desempeño mecánico y eléctrico durante el arranque en frío del motor, el calentamiento en vacío, la respuesta dinámica ante los cambios de carga, la calidad de la energía eléctrica generada en estado estable y durante los transitorios, las emisiones de escape y el rendimiento.

Las pruebas se realizan, conforme con los puntos de operación especificados en la norma ISO 8178 [9], pero obtenidos de manera continua en una secuencia progresiva de carga, bajo condiciones ambientales no normalizadas y condiciones operacionales no controladas, en razón a la *naturaleza de campo* de los ensayos. Así, los resultados no pueden entenderse como definitorios de certificación en un contexto formalmente legal. Sin embargo, los parámetros monitoreados y evaluados permiten la valoración funcional general del desempeño dinámico del motor y de la energía eléctrica generada. La normatividad relativa a los grupos electrógenos ha servido de base para considerar las especificaciones de la instrumentación y para ponderar los alcances de los resultados. Las pruebas tomaron como referencia la información relacionada con los requisitos de aceptación (conformidad) *-acceptance tests-* provistas para fabricantes de motores y motor-generadores, conforme a las normas ISO 15550 [10], ISO 8528 [11] e ISO 3046 [12].

Las pruebas de desempeño global del MG se han desarrollado siguiendo un protocolo y procedimiento particular diseñado, atendiendo la normatividad relacionada [9], [10], [11], [12] en la medida en que las condiciones de campo y el tiempo dado lo han hecho posible; el protocolo diseñado tiene naturaleza genérica y prevé repetibilidad para este tipo de ensayos, pero debe aclararse que el trabajo experimental sobre el MG debió reducirse por razones de logística y limitaciones para la utilización del MG impuestas por los facilitadores de los equipos y el espacio de trabajo (no han sido precisamente condiciones de laboratorio). Las mediciones de variables se efectuaron durante el régimen de arranque en frío, de calentamiento en vacío y de arranque en caliente de los motores, y durante cuatro condiciones de generación en estado estabilizado de carga (100, 75, 50 y 25% de la carga eléctrica máxima permitida con el combustible utilizado) con sus respectivos transitorios de carga.

El protocolo de ensayo contempla la medición del consumo de combustible, pero dificultades técnicas para medirlo de manera fiable al momento de las pruebas, han hecho necesario recurrir a la información de consumo de combustible del fabricante del motor, para tener una estimación de la eficiencia eléctrica bajo las condiciones de operación en campo del motor-generator (MG); se

han medido las emisiones en el escape, al igual que el desempeño mecánico y térmico, con consideración de los límites impuestos por la normatividad.

En los siguientes apartes de este trabajo se aborda la metodología del trabajo, describiendo el equipo experimental, las características del combustible y pormenorizando el procedimiento o protocolo de pruebas concebido. Después de esto se resumen y comentan el comportamiento temporal de las variables medias, las vibraciones y los parámetros de energía eléctrica del generador. Finalmente, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. Metodología

El trabajo experimental se ha desarrollado contando con un motor-generator basado en un motor diésel, adecuado por el proveedor para operar también con gas natural; la alimentación del combustible GLP ha sido ofrecida por un operador comercial. A continuación, en este aparte se describirá el motor con sus características, el sistema de carga, la instrumentación utilizada y el procedimiento experimental de las pruebas. Dado que el motor se recibe originalmente ajustado para operar continuamente con gas natural y que se trata de simular una contingencia en la cual temporalmente el motor debe operar con GLP sin oportunidad de ajustes ni regulaciones en el sistema, anticipando los peligros de detonación y las probablemente mayores temperaturas de los gases de escape asociadas al combustible con alto contenido de butano, la máxima carga a aplicar al motor conservadoramente la ha limitado el proveedor comercial a 104 kW.

2.1. Equipo de prueba

El motor Cummins 6CTA8.3-G2 es un motor de 6 cilindros en línea, turbocargado de 8,3 litros de cilindrada, diseñado originalmente para plantas electrogeneradoras para operar con combustible diésel (relación de compresión de 16,8) y recomendado para operar con gas natural (versión con relación de compresión de 8,5). Este motor es acoplado a un generador sincrónico marca Weg®; para operar con gas natural dispone de un control de encendido Altronic® y un sistema de control de potencia Intelligent NT® de ComAp®. A diferencia de un sistema dual tradicional, el GLP es calentado y vaporizado con el mismo refrigerante del motor, antes de la entrada al regulador, lo que le permite ser alimentado en fase líquida.

A manera de información, en la [tabla 1](#) se presentan las principales características del motor-generator alistado para operar con gas y encendido por chispa (respetando

la información técnica y los consumos específicos en las unidades originales del fabricante [13]) adaptadas de la ficha técnica original del fabricante [13], [14], [15], mientras que en la **tabla 2**, como información complementaria, se pueden comparar los consumos de combustible y los consumos específicos del motor operando con combustible diésel bajo diferentes grados de carga del MG, en los modos de emergencia, “prime” y “continua”.

Es pertinente observar que, en el caso de los motogeneradores de encendido provocado o encendido por chispa, los consumos de combustible por unidad de potencia suelen expresarse en unidades de energía consumida en el tiempo (MJ/h, lo que deja abierta la posibilidad para diferentes gases utilizados – gas natural,

propano, etc.) por unidad de potencia (kW del motor – kWm); en los motores de automoción lo más corriente es expresar el consumo de combustible en unidades de flujo másico (g/h) por unidad de potencia realizada.

2.2. Característica del combustible

Las características y propiedades del combustible GLP fueron obtenidas de la cromatografía realizada por el laboratorio especializado consultado, el cual reportó la información presentada en la **tabla 3**. La prueba se realizó en la estación Alsabana en Facatativa, Latitud-Longitud 4,843029,-74,342994, a 2614 m.s.n.m y una temperatura promedio de 14 °C.

Tabla 1. Datos generales del motor original (operación con gas natural, gas de campo y propano, modo de encendido por chispa)

Tipo:	6 cilindros en línea		
Aspiración:	Turbocargado y con postenfriador		
Diámetro y carrera:	114x135 mm		
Cilindrada, l:	8,3		
Relación de compresión:	16,8 – operación diésel; 8,5 - operación gas		
Momento de inercia componentes rotativos:	1,58 Kg·m ²		
Frecuencia de rotación del cigüeñal:	1800 min ⁻¹		
	100% Carga	75% Carga	50% Carga
Potencia de salida, kW	142	107	71
Par, N·m	751	565	376
Presión en el múltiple de admisión, kPa	44	22	2
Presión de salida turbo compresor, kPa	61	41	24
Temperatura de salida del turbo-compresor, °C	152	122	87
Flujo de aire a la entrada, l/s	192	141	96
Flujo de los gases de escape, l/s	585	449	314
Temperatura de los gases de escape, °C	734	733	719
Calor disipado refrigerante, kW	88,11	79,29	68,37
Calor disipado refrigerante postenfriador, kW	20,33	12,63	6,24
Calor disipado al ambiente, kW	26,76	22,37	18,11
Calor disipado escape, kW	135,6	103,6	71,83
Consumo de combustible, MJ/kWh	10,45	10,96	12,06
Relación aire combustible (seco)	21,8	20,4	19,3
Avance de encendido (antes del punto muerto superior, APMS), grados	30	30	30
Hidrocarburos totales, g/ kWh	1,33	1,29	1,6
NOx, g/kWh	21,99	24,41	23,74
CO, g/kWh	2,28	2,15	2,41
CO ₂ , g/kWh	571	593	653
O ₂ , %	6,1	5,1	4,1

Fuente: traducción y adaptación propia de la información reportada por el fabricante [13].

Tabla 2. Relaciones potencia-consumo del motor-generator (operación con Diésel)

Potencia a la salida			Consumo de energía (kg/kWh) o de combustible (l/h y gal/h)			
%	kW	BHP	kg/kWh	lb/BHP-h	l/h	U.S. gal/h
Potencia emergencia						
100	207	277	0,219	0,361	53	14,1
Potencia Prime						
100	188	252	0,216	0,355	48	12,6
75	141	189	0,211	0,346	35	9,2
50	94	126	0,216	0,355	24	6,4
25	47	63	0,247	0,406	14	3,6
Potencia continua						
100	159	213	0,213	0,350	40	10,5

Fuente: traducción y adaptación propia de la información reportada por el fabricante.

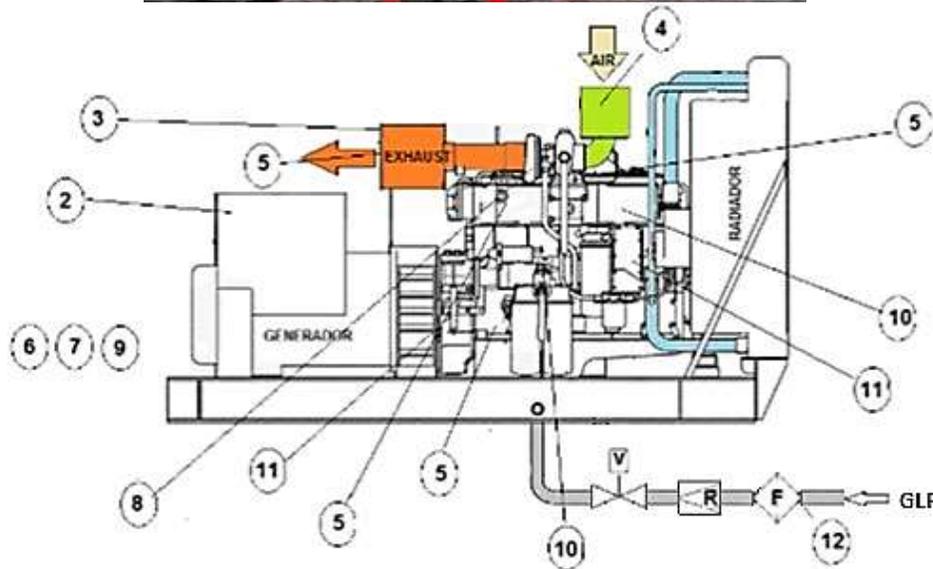
Tabla 3. Caracterización del combustible

Descripción de la muestra		GAS GLP	
Condiciones de muestreo		50.0 psig @ 56.8°F (3,45 bar, 13,7 °C)	
Componente		Mol [%]	Peso [%]
CO ₂	Dióxido de carbono	0,00	0,00
N ₂	Nitrógeno	0,01	0,01
C1	Metano	0,00	0,00
C2	Etano	1,00	0,62
C3	Propano	65,39	59,23
iC4	i-Butano	17,44	20,82
nC4	n-Butano	16,12	19,26
iC5	i-Pentano	0,04	0,06
nC5	n-Pentano	0,00	0,00
C6,...C12+	Hexanos	0,00	0,00
Totales:		100,00	100,00
Nota: 0.00 implica menos de 0.005.			
Propiedades integrales del gas			
Gravedad específica: 1,6806 (Air=1 @ 14.73 psia & 60°F; 1 bar, 15,5 °C)			
Peso molar de la muestra: 48,68 g mol ⁻¹			
Densidad ideal del gas: 2,0481 kg/m ³ @ 14.65psia, 60°F (kJ/m ³ ; 1 bar, 15,5 °C)			
Poder calorífico neto ideal: 2532,1 BTU/ft ³ @ 14.65psia, 60°F (37,6 ; 1 bar, 15,5 °C)			
Presión seudocrítica: 590.0 psia (40,68 bar)			
Temperatura seudocrítica: 692.4 Rankine (111,5 °C)			
Factor del compresibilidad del gas, Z: 0,977687 @ 14.65 psia & 60°F (1 bar, 15,5 °C)			
GPM (C2+)		28,93	
GPM (C3+)		28,66	
Información Adicional			
Poder calorífico neto real: 2589,9 BTU/ft ³ @ 14.65psia, 60°F (37,26 kJ/m ³ ; 1 bar, 15,5 °C)			

Fuente: Core Laboratories.

El suministro de GLP se realizó del campo petrolero de Cusiana, transportado hasta el lugar de las pruebas por cisterna. Se utiliza un tanque pulmón para disminuir las fluctuaciones de presión debidas al consumo y se usa un by-pass en la línea de suministro de GLP con sus respectivas válvulas reguladoras de presión antes de la

entrada de combustible gaseoso del motor para garantizar la presión, como puede seguirse en las fotos de la **figura 1**, en la que también se ha integrado un esquema del MG con elementos de instrumentación.



1. Sensor de presión de admisión	2. Analizador de potencia FLUKE 434/PWR	3. Analizador de gases y sensor de temperatura	4. Anemómetro de hilo caliente	5. Sensores de temperatura termocupla tipo J y K	6. Termo higrómetro
7. Sistema de adquisición de dato	8. Cámara termográfica	9. Sonómetro	10. Pirómetro	11. Sensor de vibraciones y sensor de revoluciones	12. Línea de combustible con accesorios y medidor de consumo

Figura 1. Cisterna, tanque pulmón y by-pass del suministro de GLP (arriba); esquema de MG instrumentado (abajo). Fuente: elaboración propia.

2.3. Equipos e instrumentación utilizados

Para simular la carga al motor-generator se emplea un banco de resistencias Avtron 1000 conectado al generador, obteniendo las mediciones de energía con el equipo medidor de energía FLUKE 434/PWR. Los trabajos de la prueba se inician con los chequeos de diagnóstico y reconocimiento del motor-generator. Se realizan mediciones previas de la compresión en los cilindros con un manómetro análogo de carátula, con rango de medición entre 0 y 300 lb/pulg², obteniendo un valor promedio de 140 lb/pulg². La alimentación del

motor se realiza en forma líquida dado que el sistema de alimentación incorpora un vaporizador calentado por el refrigerante del motor. Se instalan termocuplas tipo J (rango de medición de 0 a 1000 °C, exactitud de $\pm 0,01$ °C) para la medición de las temperaturas de los flujos de mezcla (antes de la válvula mariposa), del refrigerante (ubicada a la salida del refrigerante del bloque del motor en paralelo con el sensor original del motor), del aceite (acceso a través del orificio de la varilla medidora de nivel), del flujo de los gases de escape (ubicada a la salida de la turbina del turbocompresor) y de bloque y culata del motor (exteriores de los cilindros 2 y 3).

Se monitorean adicionalmente los puntos calientes del moto-generator con un pirómetro digital marca Fluke FLK-568, con rango de medición entre $-40 - 800$ °C, exactitud de $\pm 1\%$ ó ± 1 °C, particularmente empleado para la visualización de puntos importantes del turbo y múltiple de salida del motor; también se ha dispuesto el monitoreo y registro fotográfico de las temperaturas locales del motor mediante una cámara termográfica marca Fluke Ti32, con rango de medición de -20 °C a $+600$ °C, exactitud (según emisividad) de ± 2 °C ó 2% (a 25 °C nominales, el valor que sea mayor). Se mide la presión en el múltiple de admisión con un sensor de presión análogo marca VEGA BAR14, señal de salida de 4 a 20 mA, rango de medición de 0 a 6 bar; exactitud de $\pm 3\%$.

Para monitorear las emisiones de escape se utiliza un analizador de gases digital marca BACHARACH modelo 300, con rangos y exactitud de medición para oxígeno (O) de 0 a 25% ($\pm 0,6\%$), para monóxido de carbono (CO) de 0 a 3000 ppm ($\pm 5\%$), para óxidos de nitrógeno (NOx) de 0 a 2000 ppm ($\pm 5\%$); para dióxido de azufre (SO₂) de 0 a 2000 ppm ($\pm 5\%$). Para la registrar las vibraciones del motor en los sitios referenciados por la norma norma ISO 8528-9 [18], se instalan sensores de montaje magnético Shinkawa RN-AC 102A con sensibilidad de vibración se 100 mV/g (siendo g el valor estándar de la aceleración de la gravedad terrestre), amplitud de medida de $0-50$ g, frecuencia de señales entre $0-12800$ Hz, frecuencia del analizador/filtro entre $0-2000$ Hz; los sensores se acoplan al sistema de adquisición y acondicionamiento de señal cDAQ 9174 y NI 9234.

Se miden las revoluciones del motor ubicando un sensor de velocidad adaptado de un vehículo Chevrolet Corsa y también un sensor óptico reflex. Las condiciones ambientales se monitorean con un termo-higrómetro digital marca Amprobe TR300 con rango de medición de la humedad relativa entre $0,0 - 100,0\%$ (exactitud de $\pm 3\%$ @ $10-90\%$; $\pm 5\%$ @ otros), de temperatura entre -20 °C y 70 °C (exactitud de $\pm 0,6$ °C @ $0-50$ °C; $\pm 1,2$ °C @ otro); el instrumento se ubica a 3 metros de las posiciones del moto-generator. Se prevé la estimación del flujo de admisión de manera indirecta a través de la medición velocidad del aire, mediante un anemómetro digital de hilo caliente marca LT Lutron AM4204, de rango de medición de $0 - 30$ m/s, con exactitud de $0,1$ m/s; el instrumento se hace llegar hasta el centro del orificio del conducto de admisión antes del filtro de aire.

La medición de la potencia eléctrica se realiza con un analizador de red eléctrica FLUKE 434/PWR que cumple las tolerancias mínimas exigidas por la norma ISO 8528y cuyos rangos de medición (exactitud) son voltaje Vrms

(AC+DC)- $1...1000$ V ($0,5\%$ del Vnom); voltaje Vpico: $1... 1400$ V (5% del Vnom); amperaje (AC + DC) - $0...20$ kA ($\pm 0,5\% \pm 5$); amperaje pico Apico- $1.4x$ rms (5%); frecuencia nominal- $40...70$ Hz ($\pm 0,01$ Hz). Se ha elaborado un software para adquirir y almacenar la información adquirida de los sensores basado en un sistema de adquisición de datos de National Instruments NI cDAQ-9172 con módulo de 16 canales análogos con niveles de ± 80 mV, cuatro entradas y cuatro salidas de corriente de 20 mA y 4 salidas análogas de ± 10 V; el módulo tiene una capacidad de muestreo de 500 kS/s.

2.4. Característica del combustible

2.4.1. Transitorio de arranque en frío y calentamiento

Previo a las pruebas principales en los puntos de potencia escogidos, se evaluó la dinámica de arranque y encendido del motor, buscando con ello observar la variación transitoria una vez arrancado. Estabilizado el motor en marcha mínima, con el objeto de evaluar su proceso de calentamiento, se midió, segundo a segundo, las temperaturas medias de admisión y escape, la temperatura de la culata del motor, la velocidad del aire, el flujo y la temperatura de combustible. Se miden también las emisiones de CO₂, CO, O₂, NOx y HC. Las variables instantáneas del generador se registran con el equipo analizador de energía.

2.4.2. Búsqueda de la potencia máxima (carga máxima) sin detonación

Para las condiciones de puesta en operación del motor (ajustes traídos de relación de compresión, composición de la mezcla, avance y energía de encendido) se consideró, bajo las consideraciones antes anotadas de asegurar los niveles permisibles de temperatura de gases de escape y la ausencia de detonación, como potencia máxima para el motor 100 kW, valor que fue tomado por 100% . Tras empezar las pruebas, el valor ajustado real ha sido de 104 kW.

2.4.3. Pruebas principales

El procedimiento en el protocolo previsto para todas las pruebas paso a paso se ilustra en la [figura 2](#).

El ciclo de carga principal, consiste globalmente de las siguientes operaciones:

- Un transitorio hasta el punto de carga en turno.
- Un tiempo de estabilización en el valor de la carga.
- Dos mediciones durante el tiempo siguiente a la estabilización, dando un tiempo suficiente para estas mediciones.

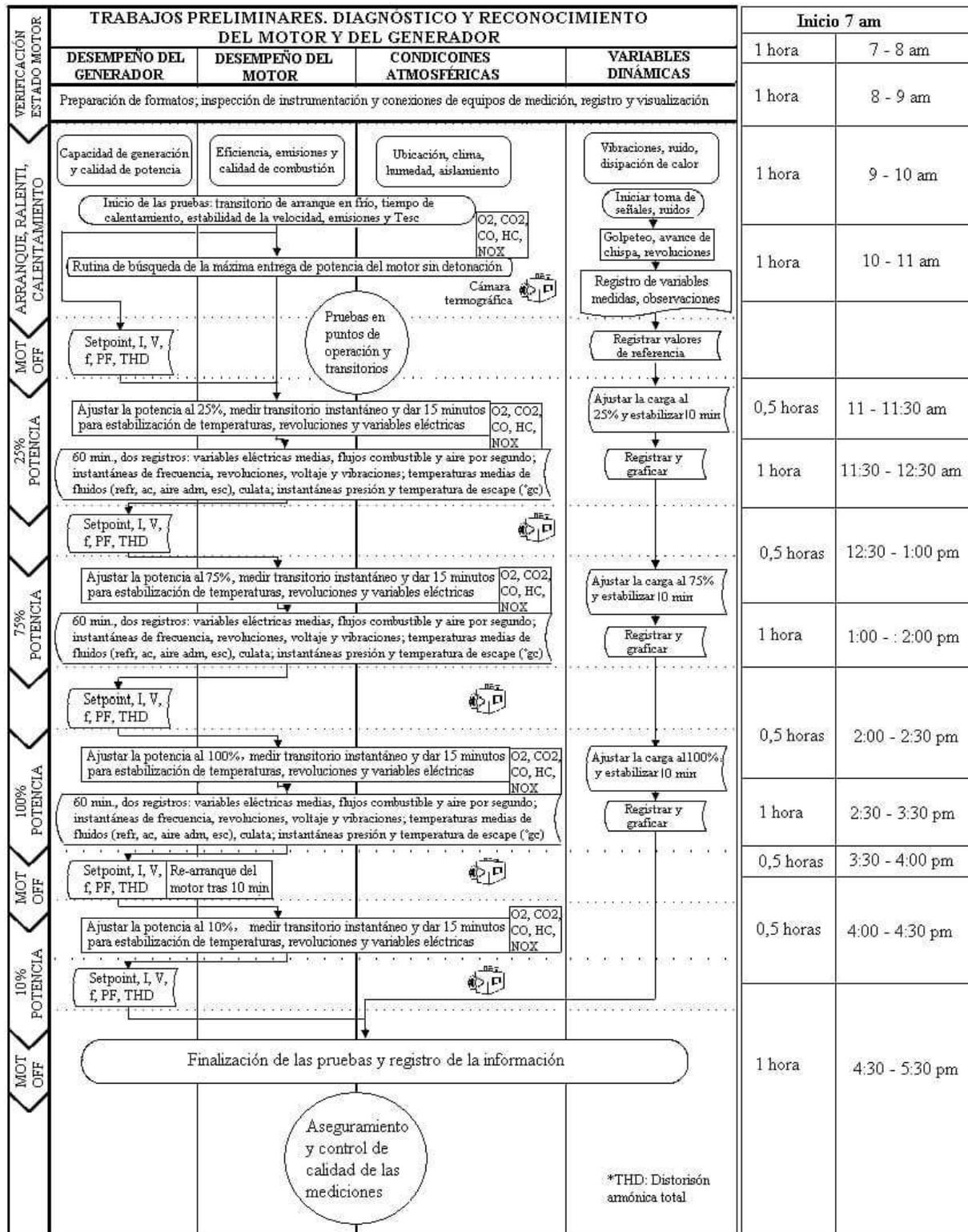


Figura 2. Protocolo diseñado para valorar el desempeño de grupos electrógenos. Fuente: elaboración propia.

1. Verificación del estado y respuesta de todos los instrumentos y sensores instalados.
2. Inicialización los equipos de registro (dataloggers y DAQs), visualización, analizadores de gases, medición de energía y de calidad de la energía. Alistamiento de los medidores portátiles.
3. Sincronización de los relojes y los registradores. Registro de los datos ambientales e iniciales de la prueba.
4. Arranque y calentamiento del motor en vacío por un tiempo de 6-10 minutos. Medición del transitorio de arranque. Simultáneamente, anotación en formatos de la información medida en el equipo (consignación de valores manualmente) y la visualizada con los equipos portátiles, conforme con un consecutivo único con observación de la hora, tiempo de inicio, tiempo final.
5. Evaluación de la dinámica del transitorio de puesta en carga 25%, observando y registrando el modo de crecimiento de las revoluciones del motor. Atención a la información de la variación del voltaje del generador (variaciones de frecuencia, voltaje y amperaje). Espera de estabilización del motor-generador.
6. Operación del MG al 25 % de la potencia plena por el tiempo suficiente (por un tiempo de 6-10 minutos) para adquirir toda la información y muestras. Registro manual de los resultados de las mediciones en los formatos. Sin abandonar el monitoreo de las revoluciones instantáneas (lectura del tacómetro, señal del generador), registro de las temperaturas medias de admisión y escape, la temperatura del aceite, la temperatura de la culata, las emisiones de CO₂, CO, O₂, y HC y las variables instantáneas del generador. Simultáneamente, medición del ruido y la temperatura de escape.
7. Medición del consumo de combustible (está previsto en el protocolo general diseñado, pero por razones técnicas no pudo llevarse a cabo).
8. Al finalizar la prueba, revisión de la información registrada para asegurar la plenitud de la información y la seguridad del registro, al igual que la consistencia de los resultados; revisión de los valores máximos y mínimos de las potencias, la temperatura, presión, humedad ambiental. Anotación de las discrepancias entre las medidas manuales con relación a las provistas por el propio controlador del motor-generador.
9. Repetición de los pasos 5-8 para las cargas incrementales 50, 75 y 100 % de la capacidad, con atención especial de los transitorios y desacoplando el sensor de gases de escape para cada transición.
10. Apagado del motor y nuevo transitorio de arranque en caliente para evaluar la evolución de las revoluciones y las emisiones del motor. Operación

- posterior del motor por 10 minutos bajo una carga del 10% de su capacidad plena.
11. Apagado del MG y grabación de las revoluciones en descenso.
12. Desenergización de los sensores y revisión del estado y conservación de la instrumentación en general.
13. Diligenciamiento de formatos y almacenamiento de la información en memoria.

3. Resultados

A continuación se presentan los resultados de las mediciones, describiendo primero el ciclo de operación, luego dando a conocer las condiciones ambientales, después describiendo los comportamientos de las temperaturas y las emisiones como variables que hablan de la “salud” térmica del motor. 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 (norma ISO 8528-9 [18]), se dan los resultados de los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y espectro de frecuencia. Describitas las variables de comportamiento se ilustran las gráficas de evolución de las potencias eléctricas, los voltajes, las corrientes y la frecuencia entregados por el motogenerador, referenciadas al tiempo reloj o a la secuencia de la prueba. Es importante comentar que las pruebas de emisiones corresponde a una segunda secuencia de pruebas realizada prioritariamente para registrar emisiones, dado que el analizador de gases presentó problemas durante la primera secuencia y debió reemplazarse. Por esta razón los puntos de carga en las [figura 3](#) y [10](#) se diferencian.

3.1. Ciclo de carga real ejecutado

La secuencia de carga durante la prueba se presenta en la [figura 3](#). El proceso de arranque del motor se realiza sin que se observen anomalías en caliente.

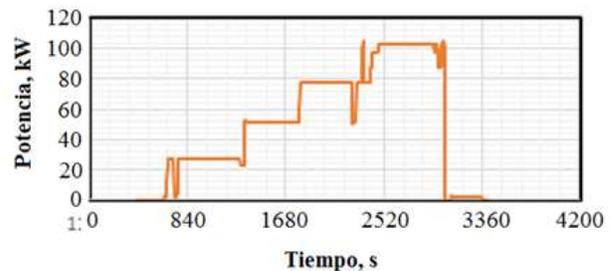


Figura 3. Diagrama de carga durante la secuencia de pruebas con sostenimiento en cuatro puntos de carga.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Medición de las variables medias

Durante las pruebas el comportamiento térmico del motor ha sido normal, a juzgar por los valores de las temperaturas de los fluidos y de las paredes externas del motor referidas en la [figura 4](#). Las temperaturas del refrigerante y del aceite son lentas en su crecimiento, pero alcanzado el estado permanente se mantuvieron en torno a los 88 °C y los 100 °C, respectivamente, durante el tiempo de muestreo; el promedio de la temperatura de gases de escape (entrada y salida de la turbina) fue inferior a los 675 °C, aun a la máxima carga prevista, mostrándose las temperaturas a la entrada de la turbina mayores que las temperaturas de los gases ya en el tubo de escape.

3.3. Medición rápidas o dinámicas

Se presenta en esta sección el comportamiento y la evaluación de las vibraciones del motor, conforme a la norma ISO 8528-9 [18], la variación de las revoluciones, la variación de la carga y las variables de energía.

3.3.1. Vibraciones

Para monitorear las vibraciones del motor, se instalaron acelerómetros en las direcciones x y z según los puntos indicados en las normas ISO 8528-9 [18] e ISO 10816-6 [19], [figura 5](#).

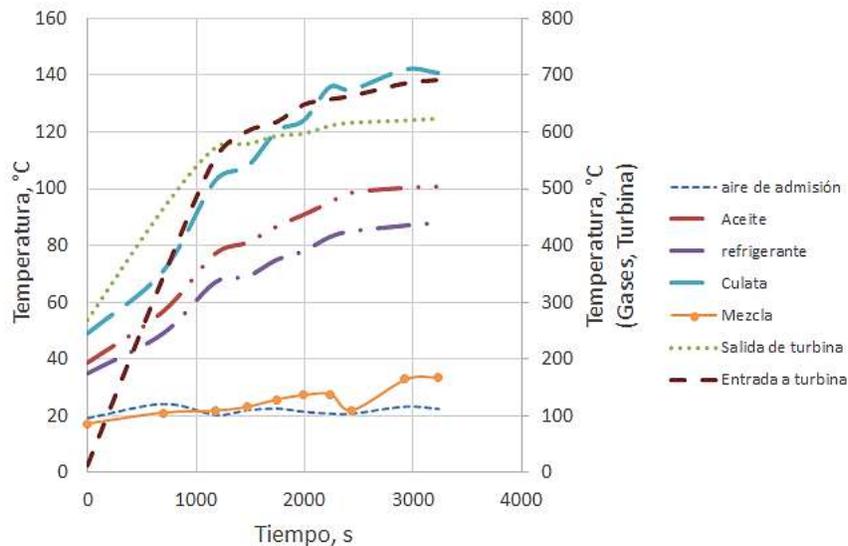


Figura 4. Temperaturas del motor Cummins 6CTA8.3-G2 durante las pruebas de operación con GLP de Cusiana. Fuente: elaboración propia.

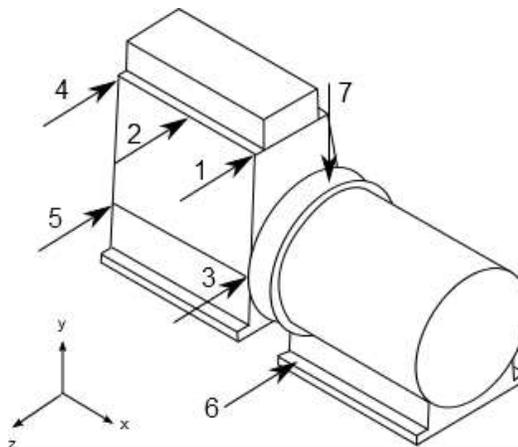


Figura 5. Ubicación de los sensores de vibración. Fuente: elaboración propia.

En la **tabla 4** se muestran los resultados de vibración (en los puntos y direcciones x, z de la norma), obtenidos a una potencia de 104 kW (100%). En todos los casos analizados, desde vacío, 25%, 50%, 75% y 100% de la carga, los valores de vibración en aceleración, velocidad y desplazamiento no sobrepasan los valores límite dado por la tabla C1 de la norma ISO 8528-9 [18]. La información obtenida con los acelerómetros ha sido procesada, permitiendo identificar los espectros en frecuencia del desplazamiento, la velocidad y la aceleración para los puntos requeridos por la norma. Para

el punto 4 en régimen de carga de 104 kW se puede observar el comportamiento de las variables mencionadas en baja y alta frecuencia, **figura 6**.

3.3.2. Revoluciones y vibraciones durante los transitorios de carga

La rapidez de adquisición de la información se realiza con una frecuencia de muestreo de 100 kHz y se registra simultáneamente la frecuencia angular del cigüeñal por medio de un sensor óptico réflex.

Tabla 4. Resultados de las mediciones para operación a 104 kW (100% de carga) del motor-generator

Potencia: 104 kW			Temperatura del ambiente: 14 °C			
Frecuencia de rotación: 1800 min ⁻¹			Tipo de combustible: GLP			
#	Valores rms generales (2 Hz a 300 Hz)					
	Dirección de la medida					
	(x)			(z)		
	s mm	V mm/s	a m/s ²	s mm	V mm/s	a m/s ²
1	0,044	17,556	8,742	0,0022	1,0619	1,1410
2	-	-	-	0,0012	0,5227	0,6664
3	-	-	-	0,0446	17,4417	8,7385
4	-	-	-	0,0019	1,0331	0,9746
5	-	-	-	0,2794	33,7211	11,5018
7	-	-	-	0,0214	6,9485	5,0189

Fuente: elaboración propia.

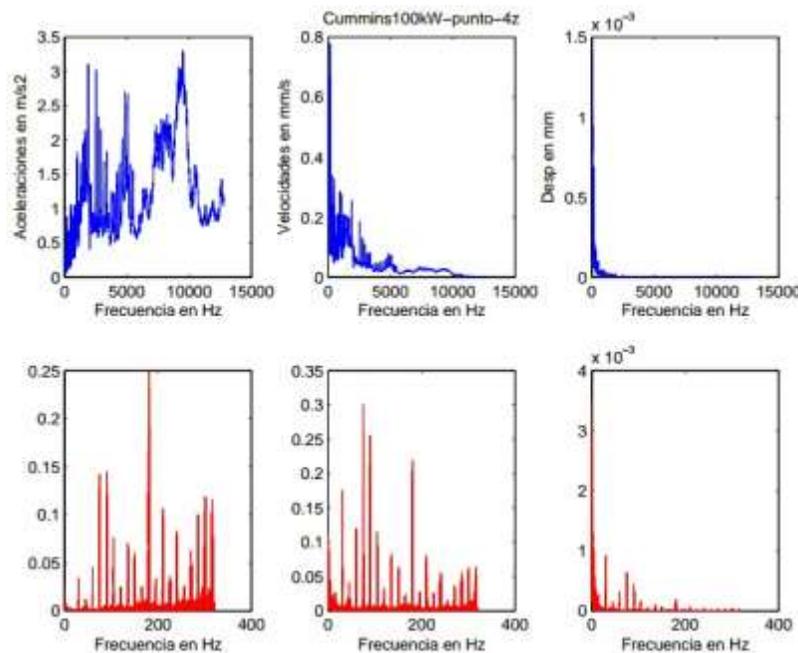


Figura 6. Comportamiento del desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el espectro de frecuencia.

En la [figura 7](#) se observa el incremento en las aceleraciones en todos los puntos de muestreo, mientras el motor alcanza su velocidad de rotación ralenti, tras el arranque en frío. Las limitaciones de muestreo del equipo no permitieron capturar el momento en que se alcanzan las 1800 min^{-1} , tras tres segundos con el motor de arranque encendido se alcanzan las 200 min^{-1} , a los cinco segundos inestablemente alcanza las 600 min^{-1} ; tras un sobre-impulso de 1200 min^{-1} , cae por un largo período a 1000 min^{-1} , lejos de las 1800 nominales, valor que no se alcanzó a registrar.

Lo lento en alcanzar las revoluciones nominales se debe, seguramente a problemas asociados con la estabilidad del combustible en su vaporización, pues el refrigerante aún está frío y tardará en adquirir la temperatura que asegura un trabajo homogéneo del vaporizador y una uniformidad de combustión. La amplitud de las vibraciones es mayor en el punto 3, extrañamente, pues es el punto más limitado por estar cerca al generador. La respuesta de la velocidad angular del motor-generador a los cambios de carga se relaciona en la [figura 8](#).

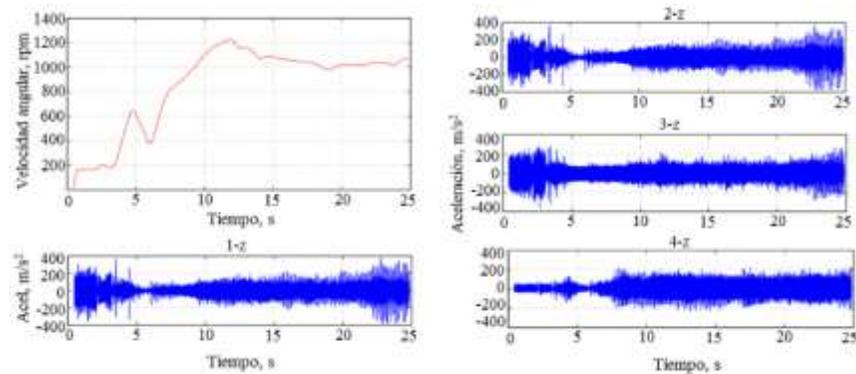


Figura 7. Comportamiento de las vibraciones y las revoluciones del motor durante el arranque en frío para el punto 1z. Fuente: elaboración propia.

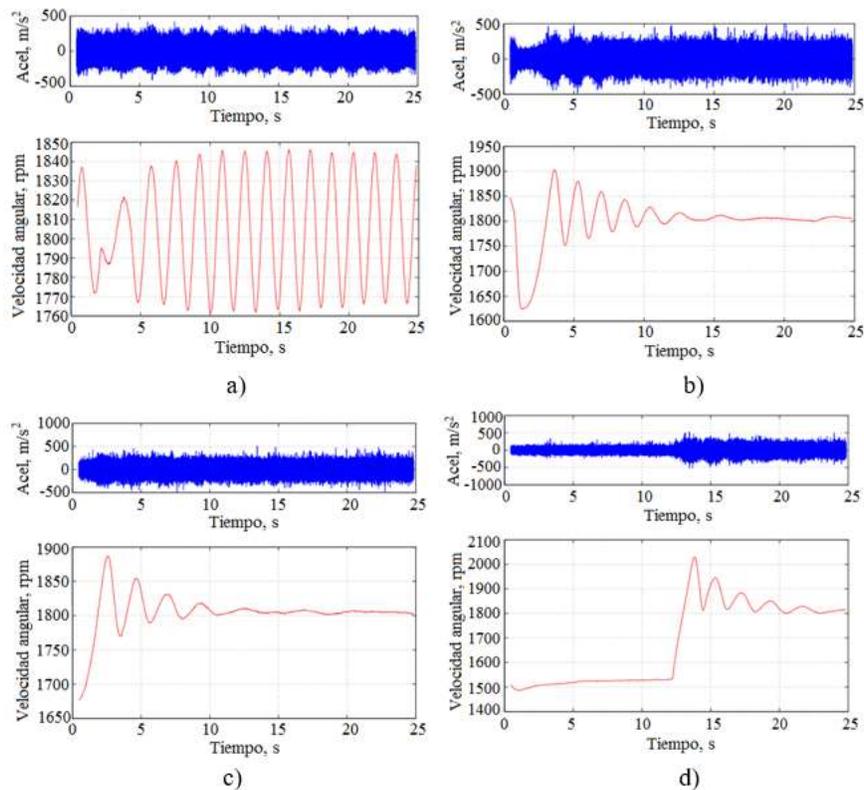


Figura 8. Respuesta vibracional del punto 4 y de las revoluciones del motor para el cambio instantáneo de a) 0 a 28 kW, b) 28 a 50 kW, c) 50 a 75 kW, d) 75 a 100 kW. Fuente: elaboración propia.

En la transición de 0 a 25% de la carga, se observa inestabilidad por encima y por debajo de las revoluciones nominales del motor sin exceder una variación de 5% entre picos. La impuntualidad al momento de iniciar la adquisición de los datos no permitió observar el momento del cambio, por lo que no se conoce el tiempo de recuperación, habría que haber empezado el muestreo antes (muestrear al menos 75 segundos en los transitorios fríos del motor). Los períodos de inestabilidad son relativamente largos comparados con otros motor-generadores evaluados. A condiciones de carga por encima del 50%, los periodos de inestabilidad se reducen a tan sólo 10 s y la variación de la velocidad angular no excede el 12% entre picos. El cambio de carga de 75% a 100% le ha costado mucho al motor, habiéndose caído las revoluciones a cerca de 1500 min^{-1} . En la figura 9 puede verse la dificultad del motor para sostenerse encendido luego de aumentársele la carga de 100 a 110 kW. De las figuras queda claro que el motor-generator tiene dificultades para asumir los transitorios de carga. Los niveles de vibración son relativamente insensibles a los transitorios.

3.3.3. Mediciones de energía

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 [11] e ISO 10816-6 [19].

Para valorar la calidad de los parámetros de energía, se tienen en cuenta los límites establecidos por la norma ISO 8528-5, según la clase de desempeño de los generadores. A la luz de los resultados, figura 10, y considerando la tabla de valores permisibles, el motor-generator no cumple con las especificaciones demandadas para los grupos electrógenos de clase G1, en cuanto a las desviaciones de frecuencia y de voltaje durante los procesos transitorios.

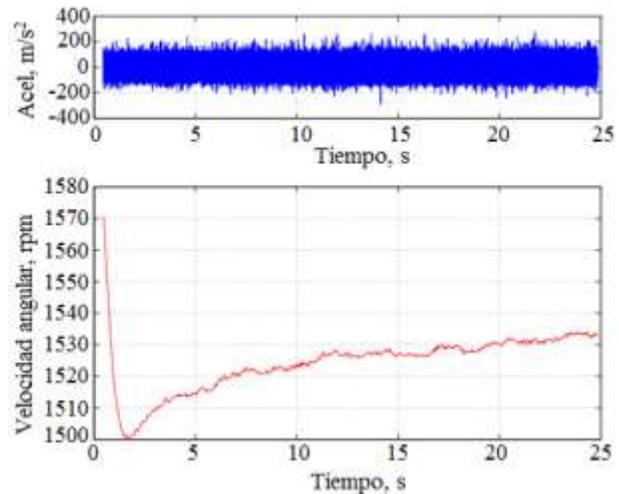


Figura 9. Respuesta vibracional del punto 4 y de las revoluciones del motor para el cambio instantáneo de 100 a 110 kW. Fuente: elaboración propia.

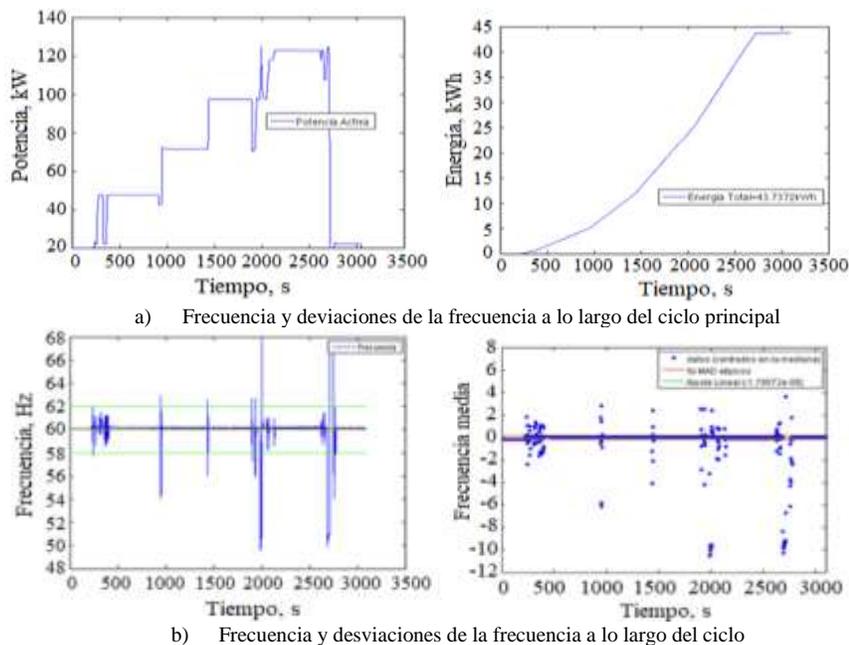


Figura 10. Comportamiento de la frecuencia a medida que transcurre el ciclo principal de la prueba.

En la **figura 11** puede verse la variación de la frecuencia a lo largo de la prueba, con grandes variaciones en los momentos de cambio de carga.

A pesar de los transitorios, se observa que la frecuencia permanece dentro de los niveles establecidos por la CREG. “Según la regulación vigente, la frecuencia nominal del sistema colombiano es de 60 Hz y su rango de variación, en condiciones normales de operación, comprende una franja de calidad 59,8 - 60,2 Hz.

Frente a perturbaciones, estados de emergencia, déficit energético y períodos de restablecimiento, la frecuencia puede variar entre 57,5 y 63,0 Hz por un período de quince (15) segundos.” Las potencias observadas tienen un rizado, aun en los tiempos de carga estabilizada, y esto

podría derivarse de las inestabilidades del sistema de alimentación o la variabilidad cíclica de la combustión.

Como puede deducirse de la **figura 12**, las corrientes de línea siguen bien la demanda de potencia y las líneas están muy bien balanceadas.

4. Aproximación hipotética del consumo de combustible del motor y de las emisiones específicas del motor-generador a las condiciones altimétricas de los ensayos, recurriendo a los datos de consumo del fabricante

Durante las pruebas del motor-generador no fue posible medir el consumo de combustible por incompatibilidades técnicas de los equipos disponibles por el tiempo del ensayo.

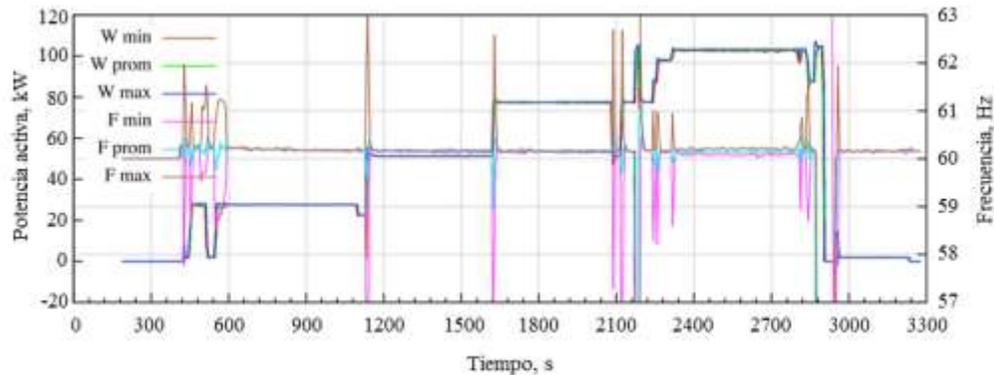


Figura 11. Variaciones de la frecuencia durante los cambios de carga del motor-generador Cummins 6CTA8.3-G2. Fuente: elaboración propia.

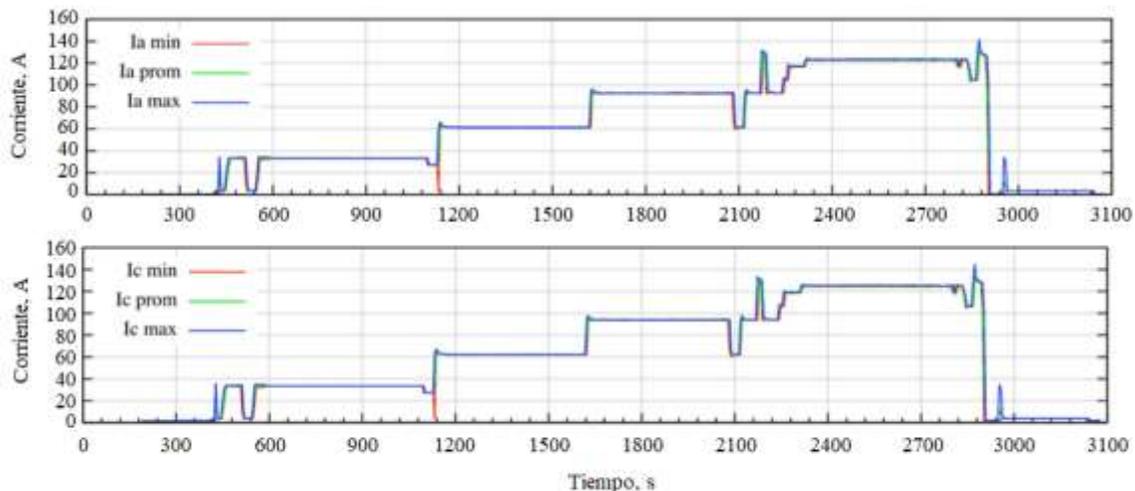


Figura 12. Comportamiento de las corrientes de línea según el transcurso de las potencias del motor-generador. Fuente: elaboración propia

Para estimar el orden del consumo de combustible, se han hecho aproximaciones a partir de los consumos de diésel (relación de compresión 16,8) y de gas natural (operación del motor con encendido por chispa y relación de compresión de 8,5) reportados en catálogo (tabla 2); en ambos casos se asume que el motor operaría de manera regular y gastaría la cantidad de GLP energéticamente equivalente al consumo de combustible diésel, o de natural, respectivamente, lo que equivale a asumir la conservación de la eficiencia en ambos casos para la operación con GLP (*es claro que es una suposición lejana con relación al diésel, pero cercana con relación al gas natural*). Se asume también para esta estimación teórica, como hipótesis, que la relación aire-combustible relativa (real/estequiométrica) es la misma.

Se construyen las gráficas de consumo y eficiencia en condiciones estándar (nivel del mar) y en condiciones de operación (corregidas para la altura sobre el nivel del mar, correspondientes al sitio de operación del motor) para el supuesto de versión diésel, así como las relativas a la versión para gas natural, versión que es la que interesa para el propósito final de la prueba. Se hacen las dos presentaciones imaginando que aun la versión diésel podría operar con GLP, siempre y cuando no se sobrepase la carga de 104 kW, con un rendimiento que sería mejor y en consecuencia las emisiones específicas serían menores.

4.1. Caso de motor motor-generator, relación de compresión 16,8

Utilizando la información de la tabla 2, se calculan, los valores de consumo de combustible, siendo el motor operado con diésel. Bajo condiciones estándar de prueba, los valores de eficiencias teóricas son también calculados y presentados en la figura 13. Dado que el motor ha sido operado con GLP como combustible, se calcula el consumo de GLP energéticamente equivalente a la entrega del diésel.

En la figura 14 se presenta la gráfica de consumo teórico equivalente de GLP para las mismas condiciones de eficiencia relacionadas en el motor original. En ella se aprecia que el consumo equivalente de GLP no difiere significativamente respecto al diésel en flujo másico (kg/h), por tener valores de poder calorífico del mismo orden de magnitud. Sin embargo, al tener una densidad considerablemente diferente al diésel, para el consumo en unidades l/h, las diferencias sí son muy apreciables.

Los valores obtenidos de catálogo corresponden a las condiciones estándar de operación contempladas en la norma ISO 3046-1.

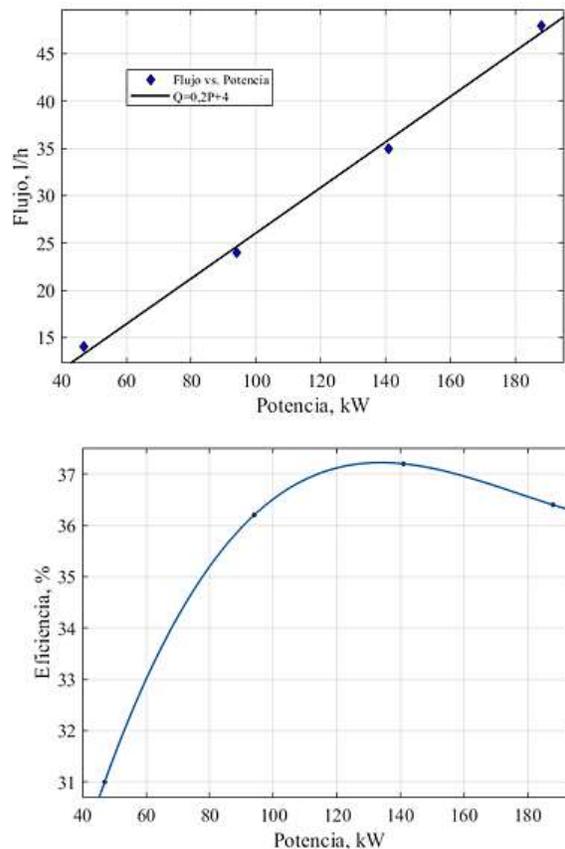


Figura 13. Característica de consumo del Motor-generator, obtenida con los datos de catálogo y eficiencia obtenida teóricamente, bajo la consideración de uso de diésel como combustible. Fuente: elaboración propia.

En el caso de ser comparados los valores teóricos con las pruebas realizadas al motor de estudio, es necesario realizar la correspondiente corrección de potencia por altura. En la figura 15 se presentan las potencias y eficiencias esperadas para el motor en el lugar de operación, si operase con combustible diésel. El factor de conversión de potencia usado es $\alpha = 0,8177$ (norma ISO 3046-1).

Una vez corregida la eficiencia en el lugar de operación, se han determinado los nuevos consumos de GLP y obtenida su correlación. Estos resultados se resumen en las gráficas de la figura 15.

Con los resultados de la correlación obtenida para consumo de GLP en el motor de supuesta relación de compresión 16,8 (asumiendo que el GLP podría tolerar esta relación de compresión), los consumos teóricos para los puntos de carga de las pruebas serían los reportados en la tabla 5, en la que, adicionalmente se reportan los

valores de las energías equivalentes (poder calorífico equivalente liberado por el combustible), los rendimientos (relación entre potencia del motor y energía equivalente liberada por el combustible por unidad de tiempo) y las eficiencias.

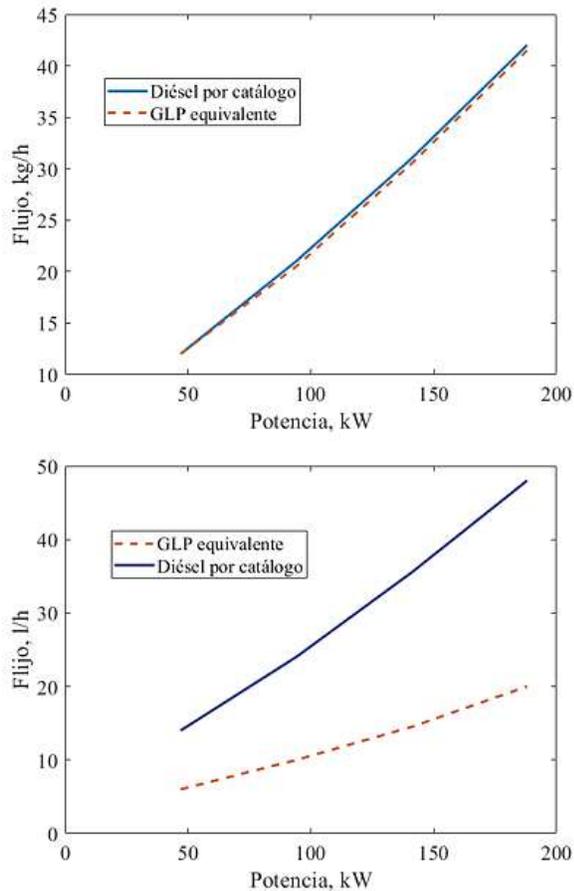


Figura 14. Consumos teóricos de combustible diésel y GLP equivalente obtenidos de datos de catálogo.
Fuente: elaboración propia.

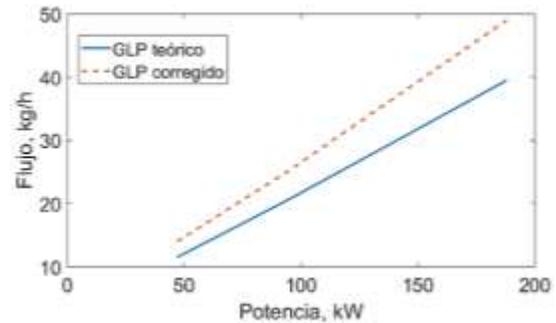


Figura 15. Consumo de GLP teórico para las condiciones estándar y de operación. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Consumo másico y consumo energético equivalentes teóricos del motor para condiciones de operación y relación de compresión 16,8

Carga	Potencia [kW]	Consumo de GLP [kg/h]	Consumo de energía [kJ/h]	Rendimiento	Eficiencia [%]
25	17,61	6,30	29697	0,213	21,35
50	39,22	11,55	544388	0,26	25,94
75	57,05	15,89	748523	0,27	27,44
100	78,08	21,00	989294	0,28	28,41

*En el supuesto de que el motor alimentado con GLP pudiera operar con esta relación de compresión.

Las emisiones específicas del motor, si su relación de compresión correspondiera a 16,8 se reproducen en la [tabla 6](#), junto con las emisiones específicas.

Tabla 6. Emisiones netas y específicas (emisiones por unidad de potencia), coeficiente de exceso de aire y caudal de aire para el ciclo de carga

Potencia	CO		O ₂		CO ₂		NO _x		Exc. aire	Flujo Aire	CO ₂ /POT	CO/POT	O ₂ /POT	NO _x /POT
	[kW]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]						
17,61	0,2043	0,225	1,4	1,545	12,9	14,24	0,1913	0,211	6	104,118	304,55	12,81	17,79	3,92
39,22	0,2545	0,528	2,1	4,364	12,4	256	0,2463	0,511	9	196,261	363,19	13,48	39,41	5,38
57,05	0,2912	0,860	2,7	7,982	11,9	35,18	0,2463	0,728	13	279,758	451,69	15,09	76,49	8,97
78,08	0,2988	1,196	3,2	12,81	11,7	46,86	0,2445	0,979	16	379,562	450,58	15,32	102,23	9,32

Fuente: elaboración propia.

Por dificultades técnicas con el equipo de medición de emisiones, no se pudieron medir éstas para el punto de máxima carga permisible, con lo que en estas tablas las mediciones de emisiones se reportan hasta cerca de 80 kW de carga.

4.2. Caso de motor motor-generator, relación de compresión 8,5

Del catálogo de fabricante, se ha obtenido el consumo de gas natural para el motor, relación de compresión 8,5. Los valores de consumos equivalentes de GLP para los puntos característicos de carga han permitido construir la curva de consumo representado en la figura 16.

Bajo condiciones estándar y corregidas, utilizando la información del fabricante [13], se han construido las características de consumo energético de combustible (MJ/kWh) de combustible y con ellas se han calculado los consumos referidos de combustible GLP (para comparación, también los de diésel y gas natural), las energías realizadas y las eficiencias como se refieren en la tabla 7. Conociendo esta característica referida de consumos de GLP, se calcula y reporta en la tabla 8 la energía realizada en los puntos de carga del ciclo con el combustible GLP. El motor a plena carga ofrece una eficiencia de 28,41 %.

Para las emisiones emitidas reales, en el motor con relación de compresión 8,5, las magnitudes de las emisiones recalculadas son las presentadas en la tabla 9. En esta misma tabla se presentan el coeficiente de exceso de aire, el caudal de aire para el ciclo de carga y las emisiones específicas.

Como se ve, también en el caso real de la prueba y con el motor de 8,5 de relación de compresión, con la simulación a partir de los datos de catálogo y en condiciones de Facatativá, el motor-generator Cummins 6CTA8.3-G2 no se ajusta a los límites de emisiones de monóxido de carbono sugeridos por la EPA [16], [17] ($CO > 5,0 \text{ g/kWh}$). Las emisiones han aumentado aún más en este caso.

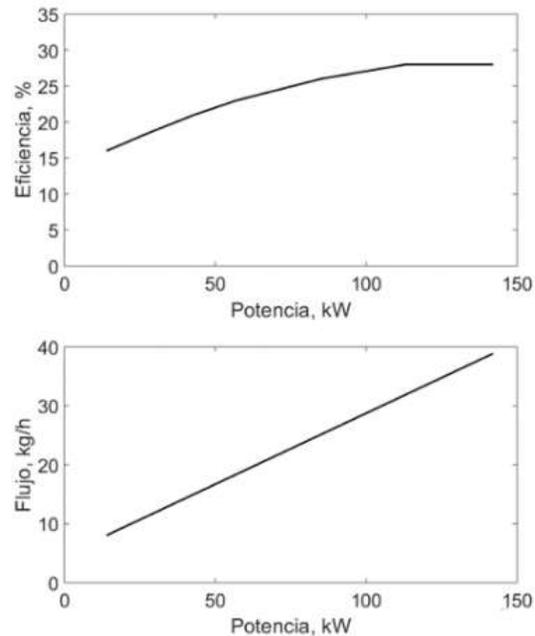


Figura 16. Consumo y eficiencia corregida del motor operando con combustible GLP (versión con relación de compresión 8,5) a las condiciones de altitud y ambientales de operación. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Consumos de combustible y eficiencia del motor para diferentes combustibles

Carga	Potencia	Consumo energético específico	Consumos referidos			Eficiencia
			Diésel	GLP	Gas Natural	
	[kW]	[MJ/kWh]	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]	[%]
10	14	18,64	6,04	5,54	5,77	19,31
20	28	16,11	10,44	9,57	9,97	22,35
30	43	13,86	13,80	12,65	13,18	25,97
40	57	12,59	16,61	15,23	15,87	28,59
50	71	12,06	19,82	18,17	18,93	29,85
60	85	11,56	22,75	20,86	21,73	31,14
70	99	11,16	25,58	23,45	24,43	32,26
80	113	10,73	28,07	25,73	26,81	33,55
90	128	10,55	31,26	28,66	29,86	34,12
100	142	10,46	34,38	31,53	32,84	34,42

*A partir de los consumos en MJ/kWh de combustibles reportados en la ficha técnica del fabricante a las condiciones de referencia.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Parámetros de consumo y realizaciones energéticas del motor Cummins 6CTA8.3-G2 para condiciones de operación y relación de compresión 8,5

Carga	Potencia	Consumo de GLP	Consumo específico de GLP	Energía	Consumo específico de Energía	Eficiencia
	[kW]	[kg/h]	[kg/kWh]	[kJ/h]	[kJ/kWh]	[%]
25	17,61	6,30	0,35	296976,681	16864,093	21,35
50	39,22	11,55	0,29	544388,383	13880,377	25,94
75	57,05	15,89	0,28	748523,072	13120,475	27,44
100	78,08	21,00	0,27	989294,386	12670,266	28,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Emisiones registradas, emisiones específicas calculadas, coeficiente de exceso de aire y caudal de aire para el ciclo de carga real y motor de relación de compresión 8,5

Potencia	CO	CO	O ₂	O ₂	CO ₂	CO ₂	NO _x	NO _x	CO /POT	O ₂ /POT	CO ₂ /POT	NO _x /POT	Exc.aire
[kW]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg/h]	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	[%]
0	0,328	0,263	0,900	0,721	15,400	12,345	0,198	0,159	-	-	-	-	4
17,61	0,204	0,318	1,400	2,181	12,900	20,095	0,191	0,298	18,07	40,97	701,00	9,03	6
39,22	0,255	0,645	2,100	5,321	12,400	31,418	0,246	0,624	16,44	55,61	512,37	7,60	9
57,05	0,291	0,996	2,700	9,232	11,900	40,688	0,246	0,842	17,45	93,26	550,71	10,94	13
78,08	0,299	1,335	3,200	14,302	11,700	52,293	0,245	1,093	17,10	118,23	521,10	10,79	16

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Se han presentado los resultados de los ensayos adaptados a las circunstancias y condiciones de campo de un motor-generador al alimentarlo con GLP de Cusiana de alto contenido de butano. Para evaluar la operación en estados estacionarios y transitorios, se ha diseñado un protocolo original para realizar las pruebas en el motor-generador, basado en una secuencia escalonada de puntos de carga con registro de información continua de las variables medias y dinámicas. Las pruebas del motor han permitido observar su comportamiento térmico y dinámico, la respuesta mecánica y eléctrica del motor-generador durante los estados estacionarios y transitorios de carga, para analizar las particularidades y posibles inconvenientes de usar el GLP de Cusiana en motores no alistados previamente para operar con este combustible.

Para lograr los objetivos técnicos, se diseñó un protocolo de prueba basado en una secuencia paso a paso de cargas desde transitorio de arranque en frío y en caliente, marcha

en vacío, 25, 50, 75 y 100% de carga máxima de seguridad (estipulada por el dueño del motor-generador), durante un corto tiempo de operación a la velocidad nominal dada para el grupo electrógeno.

El grupo electrógeno fue instrumentado en el sitio para valorar el comportamiento durante el arranque en frío, la variación de las revoluciones, las temperaturas en los sistemas, las revoluciones, las vibraciones, la potencia y calidad de energía entregada. Por fallos técnicos del medidor no pudieron realizarse las mediciones de consumo de combustible, recurriendo a la estimación teórica.

La principal conclusión extraída del estudio es que el GLP de alto contenido de butano usado es aceptable para alimentar el motor particular ensayado, *bajo los regímenes de carga estable experimentados*, prudentemente reducidos para anticipar la aparición de detonación. Se demuestra que los motores diésel pueden operar con GLP, anticipando una menor utilización de su

potencia por la necesidad de reducir su relación de compresión. En cuanto al impacto del uso de GLP en la eficiencia, no se han obtenido resultados experimentales por haber tenido dificultades con los sensores de medición al momento de la prueba (debe considerarse que los ensayos se realizaron en un motor-generator prestado por el lapso de un día, específicamente para los ensayos). Para tener una idea del consumo de GLP se ha recurrido a los consumos de diésel (relación de compresión 16,8) y de gas natural (relación de compresión 8,5) para obtener el consumo de GLP energéticamente equivalente, lo cual técnicamente no es sustentable, pero permite entrever los órdenes de magnitud [20], [21], [22].

Puede decirse que el motor-generator ha operado normalmente en estado estacionario con GLP en el estado de alistamiento en que fue ensayado y hasta la potencia ensayada. Ha entregado potencia de manera estable bajo las condiciones de carga acorde con las previsiones de sus operadores, manteniendo las temperaturas de refrigerante, aceite y culata similares a los reportados en las especificaciones del fabricante; las temperaturas de gases de escape obtenidas son inferiores a los máximos prescritos en las especificaciones técnicas del motor operando con gas natural previstas por el fabricante ($623,4\text{ }^{\circ}\text{C} < 733\text{ }^{\circ}\text{C}$).

En condiciones de arranque en frío el motor tarda más de 25 segundos (25 segundos fue el tiempo muestreado y aún no se habían alcanzado las 1800 min^{-1}); esta lentitud se debe mayormente a problemas asociados con la estabilidad del combustible en su vaporización, pues el refrigerante aún está frío y tardará en adquirir la temperatura que asegura un trabajo homogéneo del vaporizador y una uniformidad de combustión. En la transición de 0 a 25% de la carga, se observa inestabilidad por encima y por debajo de las revoluciones nominales del motor sin exceder una variación de 5% entre picos. A condiciones de carga por encima del 50%, los periodos de inestabilidad se reducen a tan sólo 10 s y la variación de la velocidad angular no excede el 12% entre picos. El cambio de 75 a 100 le ha costado mucho al motor, habiéndose caído las revoluciones a cerca de 1500 min^{-1} . La lentitud de respuesta en los transitorios de carga en escalón demuestra la baja adaptabilidad del motor (recuperación lenta de las revoluciones nominales), traduciéndose esto en baja calidad de la energía durante los transitorios a medida que aumenta la carga en el sistema. Aun así, 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 motor-generator cumple con las especificaciones de calidad de energía 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. Los valores de vibración en aceleración, velocidad y desplazamiento son aceptables según 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.

El motor-generator Cummins 6CTA8.3-G2, en las condiciones en las que se ensayó, es decir, sin realizar afinamientos para el combustible dado, no se ajusta a los límites de emisiones de monóxido de carbono sugeridos por la EPA ($\text{CO} > 5,0\text{ g/kWh}$). Debe anotarse que las pruebas se han realizado para evaluar situaciones de cambio de combustible eventuales o por razones de contingencia.

La eficiencia obtenida del motor alimentado con GLP de Cusiana cercana al 28%, hallada a partir de consideraciones teóricas, es inferior al valor correspondiente a la operación con combustible Diésel (según información de fabricante).

Referencias

- [1] *Reglamento técnico aplicable al recibo, almacenamiento y distribución de gas licuado de petróleo, GLP*, Ministerio de Minas y Energía, Resolución 40246 de 7 de marzo de 2016.
- [2] *Cadena del gas licuado del petróleo (GLP)*, Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, 2017.
- [3] E. P. Johnson, "Carbon footprints of heating oil and LPG heating systems", *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 35, p 11-22, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.01.004>.
- [4] "LPG code", National Fire Protection Association, NFPA 58, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/58/F158-2011.pdf>
- [5] H. E. Saleh, "Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diésel engine", *Fuel*, vol. 87, pp. 3031 – 3039, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.007>.
- [6] M. P. Poonia, A. Ramesh, R. R. Gaur. "Experimental investigation of the factors affecting the performance of an LPG-diésel dual fuel mode", *SAE Technical Paper*, 1999-01-1123, 1999, doi: <https://doi.org/10.4271/1999-01-1123>.

- [7] 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, doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-1056>.
- [8] A. H. Pundkar, S. M. Lawankar, S. Deshmukh, “Performance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, Issue 3, 2012.
- [9] *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement*, ISO 8178:2002.
- [10] *Internal combustion engines - Determination and method for the measurement of engine power -- General requirements*, ISO 15550:2002.
- [11] *Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets - Part 1: Application, ratings and performance*, ISO 8528-1:2005.
- [12] *Reciprocating internal combustion engines – Performance*, ISO 3046:2002.
- [13] Cummins Engine Company, Inc. G-Drive C8.3. 6CTA8.3-G2 Engine Data Sheet, 1999.
- [14] *Cummins Westport fuel quality*, Cummins Westport. calculator, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.cumminswestport.com/fuel-quality-calculator>.
- [15] *Reference Guide*, ComAp Electronic Engines Support, 2011.
- [16] B. Meisner. “EPA Emission Standards for Diesel generators”, *Power System Topics*, vol. 124, 2020. [En línea]. Disponible en: http://resources.kohler.com/power/kohler/industrial/pdf/Emission_Std_White_Paper.pdf.
- [17] *Emission Standards Reference Guide*, U.S. Environmental Protection Agency, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-nonroad-engines-and-vehicles>.
- [18] *Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets - Part 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations*, ISO 8528-9:2017.
- [19] *Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on nonrotating, Part 6 - Reciprocating machines with power ratings above 100 kW*, ISO 10816-6: 1995.
- [20] Ł. Warguła, M. Kukła, P. Lijewski, M. Dobrzynski, F. Markiewicz, “Influence of the Use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Systems in Woodchippers Powered by Small Engines on Exhaust Emissions and Operating Costs”, *Energies*, vol. 13, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13215773>.
- [21] F. Synák, K. Čulík, V. Rievaj, J. Gaňa. “Liquefied petroleum gas as an alternative fuel”, *Transportation Research Procedia*, vol. 40, 527–534, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.012>.
- [22] A. Ngang, N. Abbe, “diesesss”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, pp.462-474, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.022>.