

Adaptation of a 200 cc Internal Combustion Engine for Operation with Different Syngas Proportions

Edwin Jácome^{1,2} ; Marco Ordoñez^{1,2} ; Luna Jonathan³ ; Nazareno Steven³ 

¹ Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur km 1 1/2, Riobamba, 060155,

Ecuador, edwin.jacome@esPOCH.edu.ec y marco.ordonez@esPOCH.edu.ec

² Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas y Mantenimiento (GITEMAN), Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur km 1 1/2, Riobamba, 060155, Ecuador, edwin.jacome@esPOCH.edu.ec y marco.ordonez@esPOCH.edu.ec

³ Investigadores Independientes, Ecuador, lunafabricio766@gmail.com y joaonc98@gmail.com

Abstract– This paper presents the adaptation of a 200 cc Bajaj NS internal combustion engine to operate with synthesis gas produced from biomass using an experimental gasifier. A dual-fuel supply system incorporating an Emmegas vaporizer was implemented, and engine performance was experimentally evaluated using 85-octane gasoline, liquefied petroleum gas (LPG), and a fuel blend consisting of 90% LPG and 10% syngas. The results indicate that, relative to gasoline operation, engine power decreased by 14.9% when fueled with LPG and by 37.1% when using the LPG–syngas blend, while torque decreased by 60.6% and 67.7%, respectively. Despite these reductions, the results confirm the technical feasibility of utilizing synthesis gas in small-displacement internal combustion engines, highlighting its potential as a cleaner alternative fuel.

Keywords– Syngas; Internal combustion engine; Dual-fuel system; Biomass gasification; Alternative fuels.

ADAPTACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 200 CC. PARA LA OPERACIÓN CON DIFERENTES PROPORCIONES DE GAS DE SÍNTESIS

Edwin Jácome^{1,2} ; Marco Ordoñez^{1,2} ; Luna Jonathan³ ; Nazareno Steven³ 

¹ Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur km 1 1/2, Riobamba, 060155, Ecuador, edwin.jacome@espoch.edu.ec y marco.ordonez@espoch.edu.ec

² Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas y Mantenimiento (GITEMAN), Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Panamericana Sur km 1 1/2, Riobamba, 060155, Ecuador, edwin.jacome@espoch.edu.ec y marco.ordonez@espoch.edu.ec

³ Investigadores Independientes, Ecuador, lunafabricio766@gmail.com y joaonc98@gmail.com

Resumen– Este trabajo presenta la adaptación de un motor Bajaj NS 200 CC para operar con gas de síntesis obtenido a partir de biomasa mediante un gasificador experimental. Se implementó un sistema de alimentación dual con vaporizador EMMEGAS, evaluando el desempeño del motor con gasolina de 85 octanos, GLP y una mezcla de 90% GLP – 10% syngas. Los resultados muestran que, respecto a la gasolina, la potencia se redujo un 14,9% con GLP y un 37,1% con la mezcla de syngas; mientras que el torque disminuyó un 60,6% y 67,7%, respectivamente. Pese a estas reducciones, la conversión demuestra la viabilidad técnica del uso de gas de síntesis en motores de pequeña cilindrada, abriendo perspectivas hacia el desarrollo de combustibles alternativos más limpios.

Palabras clave– Gas de síntesis; Motor de combustión interna; Energías renovables; GLP; Potencia; Torque.

I. INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de combustibles fósiles ha generado serias repercusiones ambientales y una fuerte dependencia energética a nivel mundial. En Ecuador, más del 80% de la demanda energética se sustenta en combustibles fósiles, mientras que las energías renovables aún tienen una participación limitada. En este contexto, el gas de síntesis (syngas), derivado de la gasificación de biomasa, representa una alternativa sostenible para diversificar la matriz energética y reducir la huella de carbono. El presente trabajo tiene como finalidad adaptar un motor Bajaj NS 200 cc, diseñado originalmente para operar con gasolina, a fin de evaluar su comportamiento con diferentes mezclas de GLP y gas de síntesis. Esta investigación no solo busca comprobar la viabilidad técnica de la conversión, sino también aportar evidencia experimental para impulsar soluciones energéticas limpias y de bajo costo aplicables en pequeña escala. [1]

La transición energética no ocurre de forma homogénea: aun con el avance de la electrificación, los motores de encendido por chispa (SI) de pequeña cilindrada continúan siendo una plataforma dominante en aplicaciones de movilidad ligera (p. ej., motocicletas) y de generación distribuida (p. ej., grupos electrógenos portátiles), especialmente en contextos donde pesan más el costo inicial, la facilidad de mantenimiento, la disponibilidad de repuestos y la infraestructura de recarga/abastecimiento. Esta persistencia tiene implicaciones ambientales relevantes porque muchos motores SI pequeños—en particular los no viales/estacionarios—presentan desafíos de emisiones ligados a mezclas ricas, control limitado de la relación aire–combustible y, en algunos casos, ausencia de postratamiento avanzado, lo que deriva en emisiones elevadas de CO y HC y en marcos regulatorios que, en general, surgieron más tarde que los de automoción ligera. [2]

En el caso de motocicletas, su contribución a la contaminación urbana puede ser significativa en ciudades con alta motorización de dos ruedas. Estudios experimentales en banco (chasis dinamométrico) muestran factores de emisión de motocicletas de distintas cilindradas y condiciones de arranque en frío, lo cual refuerza la necesidad de estrategias de mitigación, ya sea mediante control de combustión, postratamiento o sustitución parcial/total del combustible. [3] En paralelo, revisiones enfocadas en combustibles alternativos destacan que el desempeño ambiental depende fuertemente de la tecnología de motor y de la compatibilidad fisicoquímica del combustible con los regímenes de combustión, por lo que soluciones “drop-in” no siempre son directas y requieren ingeniería de integración. [4]

En este escenario, dos rutas de descarbonización incremental han ganado tracción en motores SI pequeños:

Primero, la sustitución de gasolina por combustibles gaseosos de mayor número de octano, como el gas licuado de petróleo (LPG), con potencial de reducción de ciertos

contaminantes y, dependiendo de la calibración, mejoras operativas. En motocicletas con inyección, se ha reportado la viabilidad de sistemas bi-fuel (gasolina-LPG) mediante rediseño del sistema de suministro y optimización del proceso de operación. [5] Además, en motores adaptados a LPG se investigan métricas emergentes como el número de partículas (PN), lo cual es importante para comprender impactos ambientales más allá de los regulados históricamente. [6]

Segundo, la valorización termoquímica de biomasa mediante gasificación para producir gas de síntesis (syngas) y su uso energético local, típicamente en generación distribuida. En análisis de plantas piloto de pequeña escala (gasificador downdraft acoplado a un motor SI–generador), se ha argumentado que la gasificación es especialmente adecuada para despliegues por debajo de ~150 kW_e y para comunidades aisladas, aunque el cuello de botella suele estar en la caída de eficiencia al convertir el gas pobre en electricidad. [7]

La convergencia de ambas rutas—LPG como combustible “ancla” de alta energía y syngas como fracción renovable producida localmente—plantea un espacio de investigación particularmente relevante para motores SI pequeños: validar hasta qué punto mezclas LPG–syngas pueden sostener operación estable, qué penalización de potencia/torque se observa y cómo evoluciona el perfil de emisiones y eficiencia.

Sistemas dual-fuel y estrategias LPG–syngas en motores SI

El concepto dual-fuel puede referirse a la operación (a) con dos combustibles simultáneos o (b) conmutables (bi-fuel), dependiendo del diseño del sistema de suministro y del objetivo (seguridad energética, mitigación de emisiones, reducción de costos o incremento de estabilidad de combustión). En motores SI, el dual-fuel suele implementarse como mezcla de gases en admisión o inyección separada con control de equivalencia y avance de chispa. En motores de encendido por compresión (CI), el dual-fuel típicamente usa un piloto diésel para iniciar la combustión de un combustible gaseoso principal, pero la literatura dual-fuel CI es útil para comprender límites de sustitución, trade-offs de emisiones y estrategias de control. [8]

Para syngas en motores SI, una limitación estructural es la baja densidad energética volumétrica del combustible (especialmente cuando el syngas proviene de gasificación con aire y contiene fracciones relevantes de N₂/CO₂). Las revisiones sobre motores alimentados con syngas resaltan que esto conduce a “power derating” por restricciones de llenado y por la necesidad de desplazar volumen de aire con combustible gaseoso de bajo PCI, afectando la masa de mezcla fresca en el cilindro. [9]

Una estrategia reiterada en la literatura para mitigar esta penalización es “complementar” el syngas con un combustible de mayor PCI (metano/gas natural, propano o LPG), o bien aplicar sobrealimentación y/o ajustes de relación de compresión y chispa. En un estudio experimental en motor SI operando con mezclas syngas–gas natural, se reporta que el derating típico de syngas en motores SI puede cuantificarse alrededor de 15–40% de la potencia máxima, lo que justifica

el uso de un combustible complementario cuando la carga requerida supera la potencia efectiva disponible. [10] Bajo condiciones de carga parcial, el mismo estudio muestra que el aumento de la fracción energética de syngas puede imponer disminuciones de potencia relativamente pequeñas (rango 2–6%) en ciertos puntos de operación, lo que indica que el “impacto práctico” del derating depende fuertemente del régimen, del combustible complementario y del diseño del sistema de mezcla. [11]

La operación con LPG en motores SI pequeños también cuenta con antecedentes claros: en motocicletas con inyección, se ha descrito un sistema de suministro innovador para operar de forma flexible con gasolina o LPG, con mejoras reportadas en parámetros de combustión y características de emisiones al usar LPG (frente a gasolina), aunque los resultados dependen del control y calibración. [12] Estas contribuciones son especialmente pertinentes para un estudio que integra un vaporizador/regulador (p. ej., tipo automotriz) y mezcla en admisión, porque conectan la ingeniería de retrofit (hardware) con el desempeño cuantificable (software/calibración).

La adopción de syngas en motores SI de baja cilindrada enfrenta desafíos técnicos en múltiples escalas:

A nivel de combustible, la variabilidad de composición (H₂/CO/CH₄, CO₂, N₂) y la presencia de tar/partículas exigen estrategias robustas de acondicionamiento. Revisiones recientes de tar describen que su control requiere mitigación “desde el reactor” (diseño y operación) y “en línea” (limpieza y/o cracking), y que la falla en esta etapa afecta directamente la confiabilidad del motor (ensuciamiento de admisión, depósitos en válvulas, degradación de lubricante). [13]

A nivel de motor y combustión, la baja densidad energética volumétrica del syngas reduce la potencia máxima alcanzable (derating) y cambia la sensibilidad a avance de chispa y a dilución, lo cual puede amplificar la variabilidad ciclo a ciclo en motores pequeños (más sensibles por su menor inercia y menor margen térmico). [14] La evidencia experimental indica que estas sensibilidades pueden mitigarse con estrategias de mezcla: complementar syngas con un combustible de mayor PCI (metano, gas natural, propano/LPG) o trabajar con ventanas de carga donde el syngas sea suficiente para sostener estabilidad y eficiencia aceptables. [15]

A nivel de sistema, la eficiencia global gasificador–motor puede degradarse de forma marcada respecto a la eficiencia del gasificador por sí solo, de modo que el beneficio ambiental debe analizarse con una mirada de sistema: disponibilidad de biomasa, consumo específico, mantenimiento del tren de limpieza, y curvas de carga típicas (p. ej., micro-generación de baja a media carga). [16]

No obstante, también hay oportunidades claras:

La primera es que el LPG puede funcionar como combustible estabilizante y de alto octanaje, habilitando (i) retrofit relativamente simple (especialmente en motores SI) y (ii) operación bi-fuel como ruta de transición. [17] La segunda es que el syngas puede aportar un componente renovable y

local, con beneficios potenciales en NO_x/CO/HC bajo ciertas condiciones, y con valor estratégico para generación distribuida o resiliencia energética. [18] La tercera es que la investigación con motores ópticos y modelado CFD está refinando la comprensión de cómo CO/H₂ y diluyentes afectan combustión, lo que puede traducirse en reglas de diseño para mezclas syngas-LPG y calibraciones de chispa/AFR más efectivas en motores pequeños. [19]

Síntesis, brechas y justificación del estudio en un motor SI de 200 cc

La síntesis de la literatura reciente sugiere que el uso de syngas/producer gas en motores SI es técnicamente viable, pero su adopción práctica en motores pequeños está condicionada por: (1) derating de potencia/torque cuando el syngas domina el aporte energético, (2) exigencias de limpieza del gas (tar/partículas) para confiabilidad, y (3) necesidad de estrategias de control/mezcla para estabilidad y emisiones. [20]

Al mismo tiempo, varios resultados apuntan a una brecha específica que justifica el estudio propuesto:

- Aunque existen comparaciones gasolina-LPG-syngas en motores generadores pequeños (p. ej., Honda GX270) con datos útiles de eficiencia, BSFC y reducciones de NO_x/CO/HC, falta evidencia focalizada en motores de cilindrada aún menor (≈ 200 cc) y de arquitectura “motocicleta”, donde el margen de torque disponible y las necesidades de transitorios pueden ser más exigentes.
- La literatura enfatiza “complementar” syngas con combustibles de alto PCI (metano/gas natural, propano/LPG), y muestra cuantitativamente reducciones fuertes del derating al enriquecer producir gas con CH₄; sin embargo, hay menos evidencia sistemática sobre mezclas LPG-syngas en proporciones bajas de syngas (como estrategia incremental de sustitución renovable en sistemas retrofit simples), y sobre cómo esas proporciones inciden en potencia/torque y en ventanas operables de carga.
- Finalmente, el desempeño del conjunto gasificador experimental-motor depende de la calidad del gas producido y de la integración de limpieza y mezcla; las plantas piloto muestran que la eficiencia global puede caer a valores modestos, lo cual vuelve esencial medir (en una misma campaña experimental) tanto desempeño mecánico (potencia/torque) como señales indirectas de calidad de combustión (estabilidad, emisiones disponibles), para orientar mejoras de diseño.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema experimental se basó en un motor Bajaj NS de 200 cc, monocilíndrico, de cuatro tiempos y encendido por chispa, el cual fue adaptado para operar bajo una

configuración de doble combustible. El suministro de gas licuado de petróleo (GLP) se realizó mediante un vaporizador-reductor de presión Emmegas HP107, encargado de transformar el combustible desde su fase líquida a fase gaseosa utilizando la energía térmica recuperada del circuito de refrigeración del motor. Este dispositivo permitió la reducción y estabilización de la presión del combustible a valores adecuados para su inyección, garantizando una alimentación gaseosa continua y segura. El GLP vaporizado fue conducido a través de un filtro de fase gaseosa hacia una rampa de inyectores, los cuales dosificaron el combustible directamente en el múltiple de admisión, próximos a la válvula de admisión del cilindro. El sistema fue controlado por una unidad electrónica auxiliar (ECU), lo que permitió la operación del motor con gasolina, GLP y mezclas de GLP con gas de síntesis, asegurando condiciones estables para la evaluación de parámetros de desempeño como potencia y torque.



Fig. 1 Banco para pruebas estáticas.

Las pruebas experimentales se realizaron en un dinamómetro de rodillos, registrando parámetros de potencia, torque, consumo específico y temperatura de operación. Se evaluaron tres condiciones de combustible: gasolina de 85 octanos, GLP y una mezcla de 90% GLP – 10% syngas. Los datos fueron procesados para obtener curvas características del motor y comparaciones de desempeño energético.



Fig. 2 Banco para pruebas dinámicas.

III. RESULTADOS

Las pruebas estáticas realizadas con una mezcla compuesta por 90% GLP y 10% gas de síntesis evidencian el comportamiento del consumo de combustible en función del régimen de giro del motor.

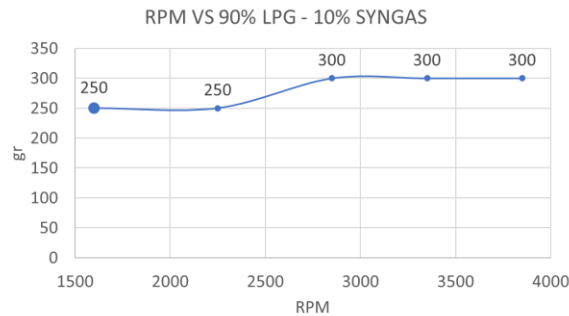
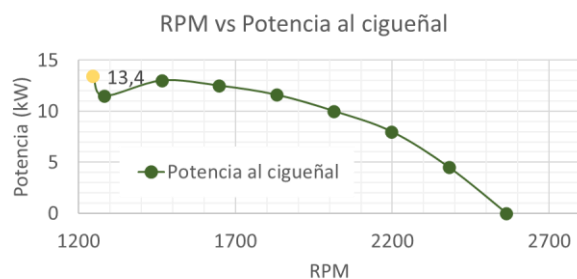


Fig. 3 Consumo vs revoluciones en pruebas en banco estático

Como se observa en la Fig. 3, el consumo másico se mantiene en un valor aproximado de 250 g/h a regímenes bajos y medios, correspondientes a 1600 rpm y 2200 rpm, lo que indica una operación relativamente estable del motor bajo condiciones de carga reducida. Al incrementar el régimen de giro hasta 2800 rpm, se registra un aumento del consumo hasta aproximadamente 300 g/h, asociado a una mayor demanda energética y a la necesidad de compensar el menor poder calorífico del gas de síntesis presente en la mezcla. A partir de este punto, el consumo se mantiene prácticamente constante en torno a 300 g/h para regímenes superiores (3200 rpm y 3800 rpm), lo que sugiere una estabilización del proceso de combustión y una adecuada regulación del sistema de alimentación gaseosa. Este comportamiento indica que, bajo condiciones estáticas, la mezcla GLP-syngas permite una operación estable del motor en un amplio rango de revoluciones, aunque con un incremento del consumo a regímenes elevados debido a las características energéticas del combustible alternativo.



RPM vs Potencia en la Rueda



RPM vs Torque

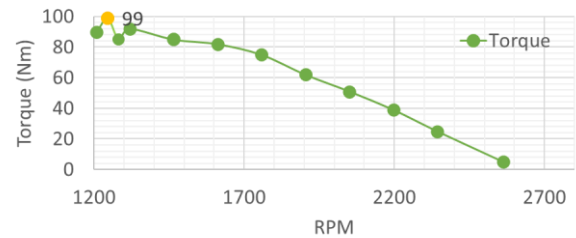
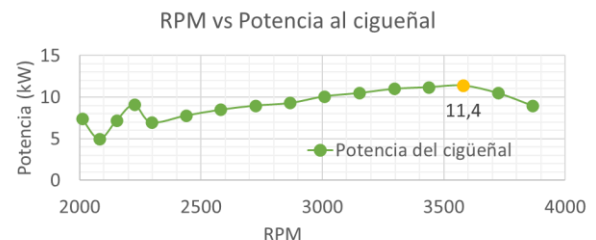


Fig. 4 Pruebas dinámicas con gasolina 85 octanos

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas dinámicas evidencian que la potencia máxima del motor alcanza un valor de 13,4 kW (17,9 Hp) a un régimen de 1300 rpm, correspondiente al desempeño del motor medido durante su operación en movimiento. No obstante, al analizar la potencia efectivamente transmitida a las ruedas, se registra un valor de 2,2 kW (2,95 Hp) a 2250 rpm, lo que pone de manifiesto una pérdida significativa de potencia entre el motor y la rueda. Esta diferencia se asocia principalmente a las pérdidas mecánicas generadas en la cadena cinemática de transmisión, incluyendo fricción en la transmisión por cadena y otros elementos mecánicos intermedios. Asimismo, bajo estas condiciones dinámicas, se determina que el torque máximo obtenido es de 99 Nm a 1259 rpm, lo que indica una elevada entrega de par a bajas revoluciones durante la operación del sistema. Estos resultados permiten caracterizar el comportamiento real del conjunto motor-transmisión bajo condiciones de funcionamiento dinámico.



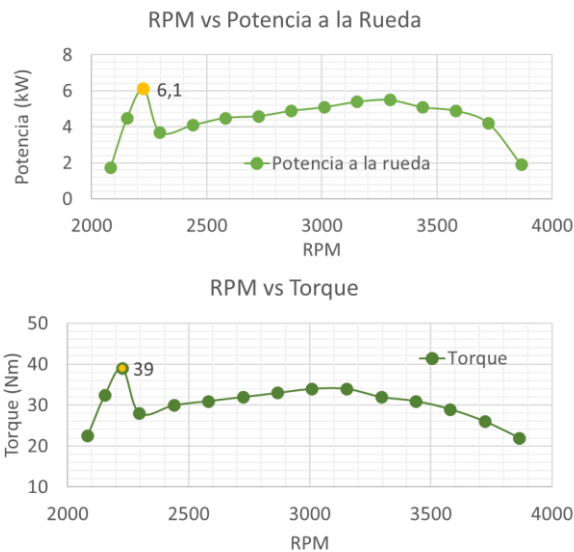


Fig. 5 Pruebas dinámicas con GLP

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas dinámicas realizadas con GLP como único combustible muestran que la potencia máxima del motor alcanza un valor de 11,4 kW (15,29 Hp) a un régimen de 3585 rpm, lo que evidencia el comportamiento del motor bajo condiciones de operación real utilizando combustible gaseoso. Por otro lado, al analizar la potencia efectivamente transmitida a las ruedas, se registra un valor de 6,1 kW (8,18 Hp) a 2226 rpm, lo que pone de manifiesto una pérdida de potencia significativa entre el eje del motor y la rueda. Esta diferencia se atribuye principalmente a las pérdidas mecánicas asociadas a la transmisión y a la fricción generada a lo largo de la cadena cinemática del sistema, incluyendo la transmisión por cadena y sus componentes. Asimismo, en estas condiciones dinámicas se determina que el torque máximo obtenido es de 39 Nm a 2226 rpm, reflejando una adecuada entrega de par del motor cuando opera con GLP y permitiendo caracterizar su desempeño mecánico bajo este tipo de combustible.

Con GLP, la potencia se redujo a 11,4 kW y el torque a 39 Nm, lo que representa una disminución del 14,9% y 60,6% respectivamente.

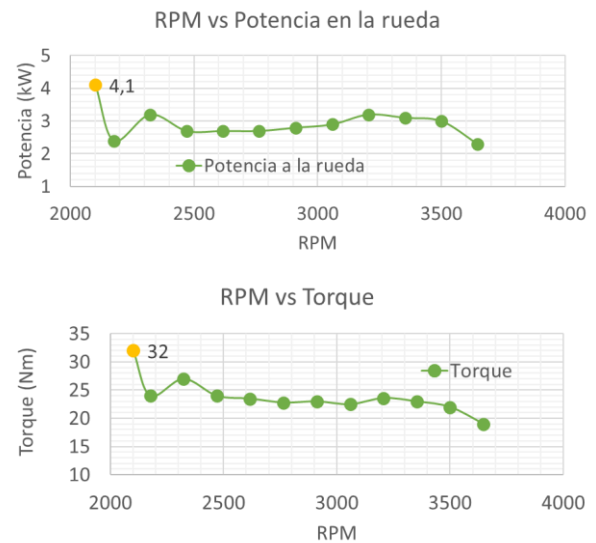
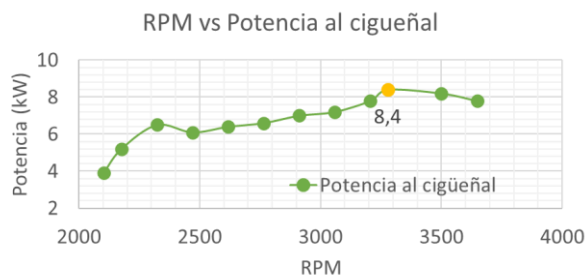


Fig. 5 Pruebas dinámicas con GLP 90% y SYNGAS 10%

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas dinámicas realizadas con una mezcla compuesta por 90 % de GLP y 10 % de gas de síntesis muestran que la potencia máxima del motor alcanza un valor de 8,4 kW (11,26 Hp) a un régimen de 3771 rpm, evidenciando una reducción en comparación con la operación con GLP puro, atribuida al menor poder calorífico del gas de síntesis. En cuanto a la potencia efectivamente transmitida a la rueda, se registra un valor de 4,1 kW (5,50 Hp) a 2079 rpm, lo que pone de manifiesto una pérdida de potencia significativa entre el motor y la rueda. Estas pérdidas se asocian principalmente a la fricción y a las ineficiencias mecánicas presentes en la cadena cinemática de transmisión. Asimismo, bajo estas condiciones de operación, se determina que el torque máximo obtenido es de 32 Nm a 2079 rpm, reflejando una disminución del par motor respecto a otras configuraciones de combustible, pero manteniendo una operación estable del sistema durante las pruebas dinámicas.

La mezcla de 90% GLP y 10% syngas mostró una potencia de 8,4 kW y un torque de 32 Nm, es decir, reducciones del 37,1% en potencia y del 67,7% en torque respecto a la gasolina. Estos resultados evidencian el impacto del bajo poder calorífico del syngas en el desempeño del motor. Sin embargo, la estabilidad de operación confirma la viabilidad técnica de la conversión. La discusión destaca la necesidad de optimizar la composición del gas y considerar sistemas de mezcla dinámicos con control electrónico para mejorar la eficiencia.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las pruebas dinámicas evidencian diferencias significativas en el desempeño del motor cuando se opera con GLP puro y con la mezcla 90 % GLP–10 % gas de síntesis, particularmente en términos de potencia y torque. Durante la operación con GLP, el motor

alcanzó una potencia máxima de 11,4 kW a 3585 rpm y un torque máximo de 39 Nm a 2226 rpm, valores que se encuentran dentro de rangos reportados en la literatura para motores de encendido por chispa adaptados a combustibles gaseosos. El GLP, al poseer un poder calorífico relativamente elevado y una combustión más homogénea que los combustibles líquidos, permite un desempeño estable del motor, aunque con una ligera reducción de potencia respecto a la gasolina debido a su menor densidad energética volumétrica.

En contraste, al operar con la mezcla 90 % GLP–10 % syngas, se observa una disminución adicional de la potencia máxima, la cual alcanza 8,4 kW a 3771 rpm, así como una reducción del torque máximo a 32 Nm a 2079 rpm. Este comportamiento puede atribuirse principalmente al menor poder calorífico del gas de síntesis, el cual, al contener elevadas fracciones de CO₂ y N₂, reduce la energía liberada durante la combustión. La introducción de syngas también afecta la relación aire–combustible y la velocidad de propagación de la llama, lo que se traduce en una combustión menos energética y, por tanto, en una reducción del par motor disponible.

Asimismo, en ambos casos se evidencia una diferencia notable entre la potencia generada por el motor y la potencia efectivamente transmitida a la rueda. Para la operación con GLP, la potencia en rueda fue de 6,1 kW, mientras que para la mezcla GLP–syngas se redujo a 4,1 kW, lo que confirma la presencia de pérdidas mecánicas significativas asociadas a la cadena cinemática de transmisión. Estas pérdidas están relacionadas con la fricción en la transmisión por cadena, engranajes y rodamientos, y se ven amplificadas cuando el motor opera con menores niveles de torque, como ocurre al utilizar combustibles de menor densidad energética.

Los resultados obtenidos concuerdan con estudios previos que reportan una disminución progresiva de potencia y torque en motores de encendido por chispa al incrementar la fracción de gas de síntesis en mezclas dual-fuel. Sin embargo, a pesar de la reducción en el desempeño, el motor mantuvo una operación estable en todo el rango de revoluciones evaluado, lo que demuestra la viabilidad técnica del uso de gas de síntesis como combustible complementario en motores de pequeña cilindrada. En este contexto, los resultados respaldan el potencial del syngas como un combustible alternativo de origen renovable, especialmente cuando se emplea en mezclas controladas con GLP, donde es posible mitigar parcialmente las pérdidas de rendimiento y avanzar hacia sistemas de combustión más sostenibles.

V. CONCLUSIONES

La adaptación del motor Bajaj NS de 200 cc para operar con GLP y mezclas GLP–gas de síntesis demostró ser técnicamente viable, permitiendo una operación estable bajo

condiciones dinámicas mediante un sistema de vaporización e inyección gaseosa.

El uso de una mezcla 90 % GLP–10 % gas de síntesis provocó una reducción de potencia y torque debido al menor poder calorífico del syngas; sin embargo, los resultados confirman su potencial como combustible alternativo renovable en motores de pequeña cilindrada.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, por el apoyo logístico y técnico brindado en el desarrollo del proyecto

REFERENCES

- [1] "Internal combustion engines powered by syngas: A review," *Applied Energy*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115415>
- [2] "Potential of fueling spark-ignition engines with syngas or syngas blends: A review," *Journal of Energy Storage*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103950>
- [3] "Complementing syngas with natural gas in spark ignition engines for power production: Effects on emissions and combustion," *Energies*, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14123688>
- [4] "Experimental based comparative exergy analysis of a spark-ignition Honda GX270 genset engine fueled with LPG and syngas," *Energy Science & Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1002/ese3.1125>
- [5] "Emission characteristics and efficiency assessment of biomass-derived syngas in a spark-ignition generator compared to LPG and gasoline," *Results in Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106393>
- [6] "Effect of fuel and air dilution on syngas combustion in an optical spark-ignition engine," *Energies*, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12081566>
- [7] "Small-scale power generation analysis: Downdraft gasifier coupled to engine generator set," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.033>
- [8] "Analysis of particle number emissions in a retrofitted heavy-duty spark ignition engine powered by LPG," *Atmosphere*, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15060704>
- [9] "Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.05.001>
- [10] "Experimental study of methane and producer gas blends in an optical spark ignition engine: Combustion characteristics, thermodynamics and emissions," *International Journal of Engine Research*, 2023. <https://doi.org/10.1177/14680874221131117>
- [11] "Performance and emission characteristics of a spark ignition engine fueled with biomass-derived producer gas," *Energy Conversion and Management*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.034>
- [12] "Experimental investigation of combustion and emission characteristics of syngas-fueled spark ignition engine," *Fuel*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.081>
- [13] "Effect of hydrogen-rich syngas on combustion, performance and emissions of a spark ignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.092>
- [14] "Assessment of syngas utilization in internal combustion engines for distributed power generation," *Applied Thermal Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.067>
- [15] "Influence of syngas composition on performance and emissions of a spark ignition engine," *Energy*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.121>
- [16] "Combustion characteristics of low calorific value syngas in spark ignition engines," *Fuel Processing Technology*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.02.015>

- [17]“Performance evaluation of producer gas fueled spark ignition engine for decentralized power generation,” *Renewable Energy*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.060>.
- [18]“Numerical and experimental analysis of syngas combustion in spark ignition engines,” *Applied Energy*, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113997>.
- [19]“Emission reduction potential of syngas utilization in spark ignition engines,” *Energy Procedia*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.234>.
- [20]“Techno-environmental assessment of biomass gasification coupled with internal combustion engines,” *Journal of Cleaner Production*, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121089>.