

ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE UNA MOTOCICLETA CON EL USO DE MEZCLAS GASOLINA/ISOBUTANOL

MATEO SERNA RUDA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
MEDELLÍN - COLOMBIA
2026



SC 7134-1



SA-CER901605



Tradición - **Transformación** - Innovación

Acreditados en Alta Calidad. Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.

Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador

Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: +57 (604) 448 0520



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE UNA MOTOCICLETA CON EL USO DE MEZCLAS GASOLINA/ISOBUTANOL

Mateo Serna Ruda

trabajo de grado en modalidad investigación, presentado como requisito parcial para
optar al título de:

Tecnólogo en Mecánica Automotriz

Director:

Ing. Anderson Gallego Montoya, PhD.

Línea de Investigación:

Semillero de investigación en vehículos de dos ruedas (SIV2R)

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
MEDELLÍN - COLOMBIA
2026

A quienes creyeron en mí y me impulsaron a no rendirme. Este logro es el resultado de horas de estudio, práctica y perseverancia, con la firme convicción de que la pasión por la mecánica es el motor que impulsa mis metas.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi abuela, que en paz descanse, y a mi madre, quienes con sus enseñanzas y ejemplo de vida me inculcaron la perseverancia y la fidelidad a todo aquello que me apasiona. Su apoyo y valores han sido el motor que me impulsa a seguir creciendo personal y profesionalmente.

Expreso mi sincero agradecimiento al docente Anderson Gallego Montoya, por compartir su conocimiento, brindarme su orientación y acompañarme con paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, al docente Frank Alexander Ruiz Holguín, en compañía de la Universidad de Antioquia, por su respaldo académico y aporte fundamental en este proceso investigativo.

A Juan Esteban Madrid Blandón, a mis amigos y compañeros de trabajo, gracias por su apoyo constante, motivación y acompañamiento a lo largo de esta etapa significativa. Agradezco a la institución Universitaria Pascual Bravo por permitirme realizar mi trabajo de investigación en el laboratorio de investigación y Diagnóstico Automotriz (LIDA) y por todo su proceso de formación.

Resumen

En este trabajo se evaluó experimentalmente el rendimiento y las emisiones de una motocicleta de inyección electrónica que opera con mezclas de gasolina e isobutanol. Para esto se usó una Kawasaki ER-6N, con la cual se siguió el ciclo de conducción urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), simulando situaciones reales de aceleración, desaceleración, velocidad crucero y ralentí. En la ejecución del estudio se midieron variables como la potencia, el consumo de combustible y las emisiones de gases, utilizando mezclas de gasolina comercial colombiana con isobutanol en porcentajes volumétricos de 10%, 20% y 30%. Los hallazgos obtenidos a través de las pruebas en el dinamómetro muestran un buen comportamiento mecánico y buena respuesta al uso de isobutanol de la motocicleta Kawasaki ER-6N. El aporte de oxígeno al alcohol ayudó a la mejorar la eficiencia de la combustión, logrando una reducción de 62,87% y 92% en las emisiones contaminantes de hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO), alcanzando su máximo beneficio ambiental en las fases de alta velocidad del ciclo evaluado. Paralelamente, se registró un incremento desde 20% hasta 80% en el consumo de combustible dado el incremento de isobutanol en la mezcla. Este comportamiento representa la respuesta adaptativa del sistema de inyección electrónica para equilibrar la deficiencia de poder calorífico del alcohol. Se concluye que el isobutanol representa una alternativa viable de ingeniería para mitigar el impacto ambiental de las motocicletas en el AMVA.

Palabras clave: Mezclas gasolina-isobutanol, Kawasaki ER-6N, Ciclo de conducción AMVA, Emisiones contaminantes, Potencia.

Abstract

In this study, the performance and emissions of an electronic fuel injection motorcycle operating with gasoline–isobutanol blends were experimentally evaluated. A Kawasaki ER-6N motorcycle was used to perform the tests following the urban driving cycle of the Aburrá Valley Metropolitan Area (AMVA), simulating real-world operating conditions such as acceleration, deceleration, cruising speed, and idling.

During the experimental campaign, variables including engine power, fuel consumption, and exhaust emissions were measured using blends of Colombian commercial gasoline and isobutanol at volumetric concentrations of 10%, 20%, and 30%.

The results obtained from dynamometer testing demonstrated satisfactory mechanical performance and a positive response of the Kawasaki ER-6N motorcycle to the use of isobutanol. The oxygen content provided by the alcohol contributed to improving combustion efficiency, achieving reductions of 62.87% and 92% in pollutant emissions of unburned hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO), respectively. The greatest environmental benefits were observed during the high-speed phases of the evaluated driving cycle.

Simultaneously, an increase in fuel consumption ranging from 20% to 80% was recorded as the proportion of isobutanol in the blend increased. This behavior reflects the adaptive response of the electronic fuel injection system, which compensates for the lower heating value of the alcohol by adjusting the fuel supply.

It is concluded that isobutanol represents a viable engineering alternative for mitigating the environmental impact of motorcycles operating within the Aburrá Valley Metropolitan Area.

Keywords: Gasoline–isobutanol blends, Kawasaki ER-6N, AMVA driving cycle, pollutant emissions, power.

Contenido

1. Introducción	13
2. Marco teórico y estado del arte	15
2.1 Motores operando con alcoholes	18
2.2 Isobutanol	20
2.3 Gasolina.....	21
2.4 Motocicletas.....	22
2.5 Dinamómetro	23
3. Metodología	25
3.1. Banco de pruebas.....	25
3.2. Ciclos de conducción.....	26
3.3. Equipo de medición.....	28
3.4. Preparación de las mezclas	29
3.5. Motocicleta utilizada en los ensayos.....	31
3.6. Desarrollo experimental	32
4. Resultados y análisis	36
4.1. Presentación de resultados de emisiones	36
4.1.1. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades bajas	36
4.1.2. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades medias	38
4.1.3. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades altas	40
4.1.4. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades extra altas ..	42
4.2. Comportamiento de la potencia del motor.....	45
4.3. Comportamiento del consumo de combustible.....	46
5. Conclusiones y recomendaciones.....	48
5.1. Conclusiones	48

8	Análisis de las emisiones de una motocicleta con el uso de mezclas gasolina/isobutanol	
---	--	--

5.2.	Recomendaciones	49
6.	Bibliografía	50

Lista de figuras

Ilustración 1. Montaje de la motocicleta en el dinamómetro.	28
Ilustración 2. Módulo analizador de gases de combustión.	29
Ilustración 3. Proceso de mezclado y pesado de gasolina – isobutanol	30
Ilustración 4. Ciclo área Metropolitana del Valle de Aburrá.	34
Ilustración 5. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades bajas.	38
Ilustración 6. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades medias. ...	40
Ilustración 7. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades altas	42
Ilustración 8. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades extra altas.	44
Ilustración 9. Curvas de potencia desarrolladas durante el ciclo de conducción.	46
Ilustración 10. Consumo de combustible en mililitros en el ciclo de conducción.	47

Lista de tablas

Tabla 1. Ficha técnica de dinamómetro Mustang MD 150.....	26
Tabla 2. Características técnicas del MD-Gas-5C	29
Tabla 3. Ficha técnica de la Kawasaki ER-6N.....	32
Tabla 4. Caracterización operativa de las fases del ciclo de conducción AMVA.....	35

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>IB</i>	Isobutanol	%	Cantidad de mezcla (IB 0%, IB 10 %, IB 20%, IB 30%)
<i>P</i>	Potencia	W-hp	Trabajo realizado por unidad de tiempo
<i>V</i>	Velocidad	Km/h	Velocidad por unidad de tiempo
<i>Vol</i>	Volumen de combustible	ml	Cantidad de combustible
<i>Prom</i>	Promedio	1	Cantidad seleccionada de una serie de datos.
<i>HC</i>	Hidrocarburos	ppm	Especie de gas emitido luego de

12 Análisis de las emisiones de una motocicleta con el uso de mezclas gasolina/isobutanol

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
CO	Monóxido de carbono		combustión interna gas tóxico que se produce por la combustión incompleta
CO ₂	Dióxido de carbono		gas principal causante del calentamiento global

Subíndices

Subíndice	Término
Max	Valor máximo observado
C	Combustible
Prom	Valor promedio

Abreviaturas

Abreviatura	Término
IB	Isobutanol en mezcla
E	Etanol en mezcla
Hp	Caballos de potencia
Ppm	Partes por millón
Vol	Volumen
AMVA	Ciclo de conducción representativo del valle de aburra
ECU	Unidad electrónica de control

1.Introducción

En Colombia, el parque automotor ha experimentado un crecimiento significativo, destacándose especialmente el aumento en el uso de motocicletas. De acuerdo con el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), circulan aproximadamente 13.5 millones de motocicletas, lo que representa cerca del 63 % del total de vehículos en el país (RUNT, 2026). Esta alta participación las convierte en un elemento fundamental para la movilidad, particularmente en ciudades como Medellín; sin embargo, también las posiciona como una fuente relevante de emisiones contaminantes. Las motocicletas, en su mayoría equipadas con motores de combustión interna, generan emisiones tales como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Las anteriores especies de gases inciden negativamente en la calidad del aire y en la salud pública (Agudelo et al., 2019; Londoño et al., 2026). El incremento del parque automotor ha intensificado esta problemática, en ciudades como Medellín la contaminación generada por fuentes móviles y fijas, en adición las condiciones topológicas de ciudad generan dos episodios de acumulación de contaminantes en la atmósfera generando la necesidad de implementar soluciones que permitan reducir el impacto ambiental sin afectar la eficiencia operativa de los vehículos (Agudelo et al., 2019).

El isobutanol ha emergido como una alternativa para su uso en mezclas con gasolina, debido a sus propiedades fisicoquímicas, como su mayor índice de octano y su menor higroscopicidad en comparación con el etanol, lo que facilita su almacenamiento y reduce riesgos de corrosión en los sistemas de combustible (Yilmaz & Atmanlı, 2017; Brandão & Suárez, 2018). El efecto del isobutanol en la reducción de emisiones se explica a partir de su influencia en el proceso de combustión dentro de los motores. La adición de compuestos oxigenados al combustible favorece una mezcla aire–combustible más homogénea, así como el quemado de combustible en regiones ricas en la cámara de combustión, esto genera una combustión más completa, lo que puede disminuir la formación de CO y de HC (Al-Dulaimi et al., 2019; Tsai et al., 2019). No obstante, la formación de NO_x puede variar dependiendo de la temperatura de combustión y de las condiciones de operación del motor, lo que hace necesario su análisis experimental (Rahman et al., 2024).

A pesar de los avances experimentales, en el contexto colombiano existe una limitada cantidad de estudios experimentales enfocados específicamente en motocicletas, lo que evidencia un vacío en la investigación aplicada. Algunos trabajos realizados en dinamómetros han mostrado resultados favorables en términos de consumo de combustible y reducción de emisiones, lo que resalta la necesidad de profundizar en este tipo de análisis bajo condiciones controladas. En este sentido, el presente estudio analiza experimentalmente las emisiones de una motocicleta de inyección electrónica utilizando diferentes proporciones de mezcla gasolina-isobutanol en un dinamómetro, comparando los resultados con los obtenidos mediante el uso de gasolina convencional. A partir de mediciones directas, se busca generar información técnica confiable que permita evaluar la viabilidad ambiental y operativa de estas mezclas en el contexto colombiano, contribuyendo al desarrollo de estrategias orientadas a la mejora de la calidad del aire y la movilidad sostenible.

Objetivo general

Evaluar experimentalmente el efecto de mezclas gasolina/isobutanol sobre las emisiones y el desempeño de una motocicleta con sistema de inyección electrónica, mediante pruebas en dinamómetro de chasis.

Objetivos específicos

-Evaluar el desempeño energético de una motocicleta mediante parámetros como consumo de combustible y respuesta operativa, al emplear mezclas gasolina/isobutanol en diferentes proporciones bajo condiciones dinámicas y estacionarias.

-Analizar el desempeño ambiental en torno a las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos sin quemar (HC) al utilizar mezclas gasolina/isobutanol en una motocicleta de inyección electrónica.

2.Marco teórico y estado del arte

El estudio del comportamiento de motores de combustión interna alimentados con mezclas gasolina–bio alcoholes se ha incrementado en las últimas décadas, evidenciado el aumento de compromisos ambientales e investigaciones orientadas a la reducción de emisiones mediante combustibles oxigenados. Diversos estudios experimentales reportan reducciones de entre un 10 % y un 40 % en emisiones de monóxido de carbono (CO) y entre un 5 % y un 30 % en hidrocarburos no quemados (HC) al emplear mezclas gasolina–bio alcoholes en motores de encendido por chispa (Tsai et al., 2019; Rahman et al., 2024). Este comportamiento se explica principalmente por el contenido de oxígeno presente en los alcoholes, sin embargo, los alcoholes son moléculas de hidrocarburos más simples que la gasolina, lo cual se evidencia en su menor cantidad de átomos de carbono en su composición. Estos factores favorecen una combustión más completa y por ende menores emisiones debido al menor contenido de carbono en el combustible. En el caso particular de las motocicletas, su impacto en la calidad del aire es relevante debido a su alta participación en el parque automotor. En Colombia, estas representan aproximadamente el 62 % del total de vehículos, con más de 12 millones de unidades en circulación (RUNT, 2024). En zonas urbanas como el Valle de Aburrá, se ha estimado que pueden aportar más del 50 % de las emisiones de CO y HC del sector transporte (Agudelo et al., 2019), lo que evidencia la necesidad de evaluar alternativas que permitan reducir su impacto ambiental sin comprometer su desempeño operativo.

En su estudio, Zhang et al. (2015) analizaron el efecto de mezclas de butanol–gasolina en motores de motocicleta de cuatro tiempos con sistema de inyección electrónica, evaluando concentraciones como B30 y B35. A partir de ensayos en dinamómetro, los autores identificaron variaciones en la combustión y en el consumo específico de combustible, reportando mejoras en la eficiencia térmica asociadas al contenido de oxígeno del butanol. Estos resultados evidencian que la incorporación de alcoholes puede modificar la dinámica de la combustión, afectando directamente el rendimiento del motor. De manera similar, Yusoff et al. (2018) evaluaron el uso de mezclas etanol–gasolina en motocicletas, evidenciando que el etanol favorece una mezcla aire–combustible más homogénea, lo que repercute en cambios en la potencia y el consumo de combustible. En términos de emisiones, se reportaron reducciones en CO y HC en rangos aproximados del 15 % al 35

Tradición - Transformación - Innovación

Acreditados en Alta Calidad. Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.

Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador

Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: +57 (604) 448 0520



SC 7134-1



SA-CER901605



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

%, lo cual se atribuye a la presencia de oxígeno en la estructura molecular del etanol y a una mayor eficiencia en el proceso de combustión.

Tsai et al. (2019) analizaron mezclas E15 y E30 en motocicletas con inyección electrónica mediante un dinamómetro de chasis, reportando reducciones de hasta un 30 % en CO y un 20 % en HC, así como incrementos en NO_x asociados a aumentos en la temperatura de combustión. Estos resultados fueron consistentes con los obtenidos por Al-Dulaimi et al. (2019), quienes evaluaron mezclas E30 y evidenciaron incrementos en la tasa de liberación de calor, mejoras en la eficiencia de combustión y una mayor velocidad de reacción química, lo cual influye tanto en el desempeño como en la formación de emisiones.

Por su parte, Duy et al. (2019) desarrollaron un estudio orientado a mejorar el desempeño de motocicletas mediante la implementación de un sistema de recuperación de calor en los gases de escape. Los resultados mostraron reducciones en emisiones de CO y HC superiores al 20 %, asociadas a una mejor vaporización del etanol. No obstante, también se evidenciaron incrementos en NO_x del orden del 5 % al 10 %, relacionados con el aumento de la temperatura en la cámara de combustión, lo que confirma que el comportamiento de este contaminante depende de factores térmicos. En estudios posteriores, Saisirirat et al. (2020) evaluaron mezclas E10 en motocicletas sin modificaciones en el sistema de inyección, reportando variaciones en torque, potencia y consumo específico de combustible entre un 5 % y un 15 %, dependiendo de las condiciones de operación tales como el régimen de giro del motor (RPM), la carga aplicada, la temperatura de operación y las variaciones de velocidad durante el ciclo de conducción. Estos resultados indican que el uso de combustibles oxigenados puede implementarse sin modificaciones significativas.

En el ámbito de ensayos dinámicos, Llanes et al. (2022) realizó una evaluación de emisiones en motores alimentados con mezclas gasolina-etanol mediante el protocolo IM-240, un ensayo dinámico realizado en un dinamómetro durante un ciclo de conducción de 240 segundos, en el que se reproducen condiciones de operación como arranque en frío, aceleraciones y variaciones de velocidad. A través de este procedimiento, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), es posible medir

contaminantes como CO, HC y NO_x. Los resultados mostraron reducciones en las emisiones de CO y HC al aumentar la proporción de etanol, así como variaciones en los niveles de NO_x asociadas a cambios en la temperatura de combustión. Este tipo de enfoque, al considerar condiciones dinámicas de operación, permite una mejor representación del comportamiento real del motor en entornos urbanos.

En el contexto colombiano, Pereira Rocha (2024) evidenció que variables como la altitud pueden generar variaciones superiores al 10 % en el consumo de combustible y en la formación de emisiones. Asimismo, Díaz (2020) demostró que factores como la pendiente y las condiciones del tráfico pueden incrementar las emisiones de CO y HC en más del 20 %, lo que resalta la importancia de evaluar los motores bajo condiciones reales de operación.

A nivel nacional, Pardo Oñate (2020) reportó reducciones en emisiones de hasta un 25 % al emplear mezclas gasolina-etanol, mientras que Agudelo et al. (2019) identificaron que las motocicletas pueden aportar más del 50 % de las emisiones de CO y HC en el Valle de Aburrá. Por su parte, Sánchez Ramírez (2024) destacó la importancia de la calibración y el control experimental en la obtención de resultados confiables en bancos dinámicos. En investigaciones más recientes, Ghurri et al. (2024) evaluaron mezclas desde E10 hasta E85, evidenciando variaciones en el desempeño del motor de hasta un 20 %, mientras que Rahman et al. (2024) confirmaron reducciones en CO y HC de entre un 15 % y un 35 %, dependiendo de la proporción de mezcla y las condiciones de operación.

Finalmente, el estudio desarrollado por Madrid Blandón (2025) evaluó mezclas gasolina-isobutanol I10, I20 e I30 en motocicletas, reportando incrementos de potencia y torque especialmente en mezclas del 20 % y 30 % de isobutanol, junto con reducciones en emisiones de CO y HC. Sin embargo, los resultados no se presentan como valores porcentuales únicos, ya que dependen del tipo de motocicleta. Estos resultados confirman que el uso de alcoholes superiores como el isobutanol puede representar una alternativa viable para mejorar el desempeño del motor y reducir emisiones en motocicletas bajo condiciones controladas.

De manera general, la evolución de los estudios evidencia una transición desde el análisis de mezclas con butanol hacia el uso de etanol e isobutanol, incorporando metodologías cada vez más avanzadas que consideran condiciones dinámicas de operación. En este contexto, los resultados coinciden en que los alcoholes, gracias a su contenido de oxígeno, favorecen una combustión más completa. Como consecuencia, se observa una reducción en las emisiones contaminantes, particularmente de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC), con disminuciones que, de forma general, se sitúan en rangos aproximados entre el 10 % y el 40 %. Esta mejora está directamente relacionada con una mayor eficiencia en el proceso de combustión.

Aunque existe una cantidad importante de estudios sobre este tipo de combustibles, la mayoría se ha desarrollado en contextos distintos a los ensayos nacionales, lo que limita la aplicación directa de los resultados. En el caso de motocicletas con sistema de inyección electrónica, aún se identifican vacíos en la evaluación bajo escenarios reales de operación, como los que se presentan en entornos urbanos.

En este sentido, trabajos como el de Madrid Blandón (2025) permiten ampliar la comprensión del comportamiento de mezclas gasolina–isobutanol I10, I20 e I30 en motocicletas, considerando variables de desempeño y emisiones bajo condiciones estacionarias y dinámicas. Este tipo de estudios aporta información útil para entender cómo responden estos sistemas en condiciones más cercanas a la realidad, lo cual resulta necesario para evaluar su posible aplicación en contextos locales.

2.1 Motores operando con alcoholes

Desde el punto de vista de la combustión, la presencia de alcoholes en la mezcla combustible introduce cambios dentro de la cámara de combustión. En particular, el contenido de oxígeno en compuestos como el etanol y el butanol favorece una oxidación más completa del combustible, lo que incide directamente en la formación de productos de combustión (Yilmaz & Atmanlı, 2017). Esta característica favorece una oxidación más completa de la mezcla aire–combustible, alterando variables internas del motor como la tasa de liberación de calor, la velocidad de combustión y la temperatura dentro de la cámara (Mentes & Celik, 2025). En este sentido, el uso de mezclas etanol–gasolina puede

contribuir a reducir emisiones asociadas a combustión incompleta, particularmente CO y HC. Sin embargo, el incremento en la temperatura de combustión también puede generar variaciones en la formación de NO_x, debido a que este contaminante depende en gran medida de las condiciones térmicas alcanzadas dentro del cilindro (Zhang et al., 2015).

Además del proceso de combustión, las propiedades fisicoquímicas de los alcoholes influyen directamente en el desempeño energético del motor. Combustibles como el etanol y el isobutanol presentan diferencias en parámetros como el poder calorífico, la volatilidad, la densidad y el índice de octano respecto a la gasolina convencional (Brandão & Suárez, 2018). Estas variaciones modifican el comportamiento de variables como la eficiencia térmica, el consumo específico de combustible y la eficiencia volumétrica del motor (Mentes & Celik, 2025). Como consecuencia, el uso de combustibles oxigenados genera cambios medibles en parámetros de desempeño como potencia, torque y consumo de combustible. No obstante, estos efectos dependen de factores como la proporción de mezcla, el régimen de giro del motor, la carga aplicada y las condiciones de operación (Ghurri et al., 2024). Por esta razón, el análisis del rendimiento no puede evaluarse únicamente desde la combustión, sino desde la interacción entre las propiedades energéticas del combustible y las condiciones de funcionamiento del motor.

En motocicletas, este comportamiento adquiere mayor relevancia debido a que sus condiciones de operación se caracterizan por constantes variaciones de velocidad y carga, especialmente en entornos urbanos (Díaz, 2020). Bajo estas condiciones, parámetros como aceleraciones, desaceleraciones y cambios de régimen influyen directamente tanto en el consumo de combustible como en la formación de emisiones contaminantes (Londoño et al., 2026). Por ello, los ensayos dinámicos permiten representar de manera más adecuada el comportamiento real del motor frente al uso de mezclas gasolina–alcohol. Los ciclos de conducción constituyen una herramienta fundamental para reproducir condiciones reales de operación en laboratorio. Estos ciclos permiten simular variaciones de velocidad y carga similares a las que experimenta una motocicleta durante su funcionamiento en un entorno urbano, facilitando la evaluación del desempeño y las emisiones bajo condiciones controladas. De igual manera, el uso de dinamómetros de

chasis permite controlar variables de ensayo y obtener mediciones de potencia, torque y emisiones durante diferentes regímenes de operación (Sánchez Ramírez, 2024).

Adicionalmente, el comportamiento de las mezclas gasolina–alcohol también depende del sistema de medición empleado durante los ensayos. Factores como la inercia del dinamómetro, el sistema de adquisición de datos y las condiciones de calibración pueden influir en la respuesta obtenida durante las pruebas, especialmente en evaluaciones dinámicas donde existen variaciones rápidas de velocidad. A partir de estos fundamentos, el análisis de mezclas gasolina–isobutanol en motocicletas con sistema de inyección electrónica requiere considerar simultáneamente variables relacionadas con combustión, desempeño energético, emisiones y condiciones de operación (Madrid Blandón, 2025). Esta integración permite comprender el efecto de combustibles oxigenados sobre el comportamiento global del motor bajo condiciones estacionarias y dinámicas.

2.2 Isobutanol

El isobutanol es un alcohol de cadena ramificada utilizado como componente oxigenado en mezclas combustibles para motores de encendido por chispa. Su interés en aplicaciones automotrices se relaciona con propiedades fisicoquímicas que permiten modificar el comportamiento de la combustión y las características energéticas del combustible (Brandão & Suárez, 2018). Entre estas propiedades se encuentran su elevado índice de octano, menor higroscopicidad en comparación con el etanol y un contenido energético más cercano al de la gasolina convencional (Yilmaz & Atmanlı, 2017). La presencia de oxígeno en la estructura molecular del isobutanol favorece una oxidación más completa de la mezcla aire–combustible durante el proceso de combustión. Como consecuencia, puede presentarse una disminución en la formación de emisiones asociadas a combustión incompleta, particularmente CO y HC (Mentes & Celik, 2025). Sin embargo, las variaciones en la temperatura dentro de la cámara de combustión también pueden influir en la formación de NO_x, debido a que este contaminante depende directamente de las condiciones térmicas alcanzadas durante la combustión (Zhang et al., 2015).

Además de su efecto sobre las emisiones, el isobutanol modifica variables relacionadas con el desempeño del motor, como potencia, torque, consumo específico de combustible y eficiencia térmica (Aguirre Álvarez, 2022). Estas variaciones dependen de factores como la proporción de mezcla, el régimen de giro del motor, la carga aplicada y las condiciones de operación (Mentes & Celik, 2025). Debido a su contenido energético y a sus características de vaporización, el comportamiento del motor puede diferir respecto al funcionamiento con gasolina convencional. En motocicletas con sistema de inyección electrónica, el efecto del isobutanol adquiere mayor relevancia debido a las variaciones constantes de velocidad y carga presentes durante la operación urbana (Mentes & Celik, 2025). Bajo este tipo de condiciones, parámetros como aceleraciones, desaceleraciones y cambios de régimen influyen directamente en el proceso de combustión y en la formación de emisiones. Por esta razón, la evaluación de mezclas gasolina–isobutanol requiere considerar tanto variables de desempeño como condiciones dinámicas de operación.

2.3 Gasolina

La gasolina es un combustible derivado del petróleo utilizado principalmente en motores de encendido por chispa debido a sus propiedades de volatilidad, capacidad energética y facilidad de combustión. Su composición está formada por una mezcla compleja de hidrocarburos, en especial el isooctano, que permiten generar la energía necesaria para el funcionamiento de un motor ciclo Otto mediante el proceso de combustión interna (Pardo Oñate, 2020).

En motores de inyección electrónica, la gasolina constituye el combustible base de referencia para evaluar el comportamiento de mezclas con compuestos oxigenados, debido a que sus propiedades energéticas y de combustión son ampliamente conocidas. Variables como el poder calorífico, la velocidad de combustión y la relación aire–combustible influyen directamente sobre parámetros de desempeño como potencia, torque, consumo específico de combustible y eficiencia térmica (Pereira Rocha, 2024). Cuando la gasolina es mezclada con alcoholes, se producen modificaciones en el proceso de combustión debido a cambios en la composición química y en las propiedades fisicoquímicas del combustible. Estas variaciones pueden alterar la liberación de calor

dentro del cilindro, la eficiencia de oxidación y la formación de emisiones contaminantes, especialmente monóxido de carbono CO, HC y NO_x (Mentes & Celik, 2025).

Debido a esto, la gasolina no sólo cumple la función de combustible principal en motores de encendido por chispa, sino que también constituye el punto de referencia para analizar el efecto de mezclas gasolina–alcohol sobre el comportamiento del motor y las emisiones generadas durante la combustión.

2.4 Motocicletas

Las motocicletas constituyen uno de los medios de transporte de mayor utilización en entornos urbanos debido a factores asociados a movilidad, consumo de combustible y costos de operación. En Colombia, representan aproximadamente el 62 % del parque automotor nacional, con más de 12 millones de unidades en circulación, lo que las convierte en una fuente importante de emisiones contaminantes en zonas urbanas. El funcionamiento de una motocicleta depende de la interacción entre variables mecánicas, térmicas y operativas asociadas al motor y al sistema de alimentación. Factores como el régimen de giro, la carga aplicada, el sistema de inyección electrónica y las condiciones de conducción influyen directamente en el proceso de combustión, el desempeño del motor y la formación de emisiones contaminantes (Ghurri et al., 2024).

En motocicletas utilizadas en entornos urbanos, las constantes variaciones de velocidad, aceleración y carga generan cambios continuos en las condiciones de operación del motor (Londoño Echeverri, 2021). Debido a esto, parámetros como potencia, torque, consumo de combustible y composición de los gases de escape pueden variar significativamente durante la conducción. Cuando se emplean combustibles oxigenados en este tipo de vehículos, el comportamiento del motor puede modificarse en función de las propiedades energéticas y de combustión de la mezcla utilizada. Por esta razón, la evaluación experimental de motocicletas bajo condiciones dinámicas resulta necesaria para analizar de manera más representativa el efecto de mezclas gasolina–alcohol sobre el desempeño y las emisiones generadas durante la operación real del vehículo.

2.5 Dinamómetro

El dinamómetro de chasis es un equipo de laboratorio fundamental en la mecánica automotriz, ya que permite montar la motocicleta y medir variables en la rueda como la potencia, el torque y el consumo de combustible bajo condiciones totalmente controladas (Sánchez Ramírez, 2024). La gran ventaja de utilizar este dispositivo en pruebas experimentales es que nos permite evaluar el comportamiento real del motor eliminando variables externas de la calle que alteran los datos, tales como el estado del tráfico, el clima o el viento (Al-Dulaimi et al., 2019). El principio de funcionamiento de este banco de rodillos consiste en que la llanta trasera de la motocicleta transmite la fuerza directamente sobre un rodillo calibrado. Este rodillo opone una resistencia magnética mediante un freno de corrientes parásitas para simular el peso de la moto y la resistencia del aire en carretera (Sánchez Ramírez, 2024). El equipo cuenta con sensores mecánicos y electrónicos, como celdas de carga y captadores de velocidad (encoders), que miden la fuerza de tracción en tiempo real (Ghurri et al., 2024). La utilidad de este equipo nos brinda un beneficio clave: la repetibilidad de los ensayos. Esto significa que podemos realizar la misma prueba varias veces bajo las mismas condiciones de temperatura y carga, lo que permite conectar de forma segura los analizadores de gases al escape para obtener datos precisos y diagnosticar cómo influyen las mezclas de combustible en el rendimiento global del motor (Rahman et al., 2024; Saisirirat et al., 2020).

En proyectos anteriores del semillero SIV2R, como el de Madrid Blandón (2025), el dinamómetro fue la herramienta base para ensayar motocicletas con mezclas de gasolina e isobutanol, evaluando el motor tanto en aceleraciones a fondo como en regímenes sostenidos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el tipo de dinamómetro influye en los resultados. Factores propios del diseño del equipo, como la inercia del rodillo y las pérdidas mecánicas por fricción en los rodamientos del banco, pueden generar variaciones en las lecturas de potencia si no se calibra y compensa correctamente el sistema antes de iniciar los ensayos (Sánchez Ramírez, 2024).

Para complementar las pruebas en el banco, se utilizan los ciclos de conducción. Estos ciclos son una guía de operación que le indica al conductor los cambios de velocidad que debe replicar en el dinamómetro a lo largo del tiempo, simulando situaciones reales de

manejo como arranques, aceleraciones, desaceleraciones y tiempos de ralentí con el motor encendido en neutro (Londoño Echeverri, 2021). Su uso es clave para la homologación y el control ambiental, porque permiten medir el consumo y los contaminantes en un escenario muy cercano a lo que el usuario experimenta en la calle (Tsai et al., 2019). En nuestro contexto local, se cuenta con el ciclo de conducción del Área Metropolitana y Valle de Aburrá (AMVA), el cual fue desarrollado estadísticamente para representar la pauta de manejo real, los trancones y las condiciones topográficas de nuestra región (Londoño Echeverri, 2021).

Analizando los antecedentes, Londoño Echeverri (2021) aplicó estos ciclos en banco para evaluar motocicletas urbanas, demostrando que la forma de conducir y la agresividad en las aceleraciones afectan directamente la temperatura del motor y disparan los gases contaminantes. Asimismo, Madrid Blandón (2025) utilizó esta misma metodología de ciclos para ensayar las mezclas con isobutanol, lo que sirvió para analizar cómo responde el sistema de inyección electrónica de la motocicleta frente a las demandas variables de carga y aceleración que ocurren en el tránsito urbano diario.

3. Metodología

A continuación, se describen los procedimientos realizados en cada etapa experimental. Inicialmente, se llevaron a cabo pruebas en el dinamómetro con el fin de verificar el correcto funcionamiento tanto de la motocicleta como del equipo, asegurando que ambos se encontraran en condiciones adecuadas antes de iniciar las pruebas estacionarias y dinámicas.

3.1. Banco de pruebas

Los ensayos experimentales se desarrollaron en un banco de pruebas equipado con un dinamómetro de chasis Mustang MD-150 como se muestra en la Tabla 1, empleado para evaluar el comportamiento de la motocicleta bajo el ciclo de conducción AMVA. La selección de este equipo respondió principalmente a su disponibilidad en el laboratorio y a su capacidad para registrar variables asociadas al desempeño del motor, tales como potencia, par de torsión y velocidad, permitiendo además reproducir condiciones de carga de manera estable durante cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 1. Ficha técnica de dinamómetro Mustang MD 150.

Especificaciones técnicas	
Referencia	Mustang MD-150-AWD
Caballos de fuerza	1200 HP
Velocidad máxima	282 KPH
Dispositivo de carga	PAU de corrientes parásitas refrigeradas por aire
Inercia	630-base Inercia
Controles	Controlador digital de circuito cerrado con software HoleShot basado en web. Incluye tecnología de simulación de carreteras virtuales patentada
Diámetro del rodillo	8,575 pulgadas
Ancho del tambor	16,37 pulgadas/41,59 cm
Máximo peso del eje	6.000 lb
Energía requerida	115VAC, 230VAC

3.2. Ciclos de conducción

El funcionamiento del dinamómetro se basa en la interacción entre la rueda motriz de la motocicleta y un sistema de rodillos acoplados a una unidad de absorción de potencia (PAU), encargada de aplicar resistencia al movimiento y simular condiciones de operación similares a las presentes durante la circulación del vehículo. Para la ejecución de las pruebas, como se muestra en la Ilustración 1, una motocicleta fue ubicada sobre el dinamómetro asegurando un contacto adecuado entre la llanta trasera (tracción) y el rodillo principal del sistema. Posteriormente, se emplearon eslingas de fijación con el propósito de mantener la estabilidad del vehículo durante los ensayos, evitando desplazamientos o movimientos que pudieran alterar las mediciones o comprometer las condiciones de seguridad durante la operación del banco de pruebas. Esta configuración permite

desarrollar los ensayos bajo condiciones estables y reducir posibles fuentes de error asociadas al montaje experimental.

Con el fin de mantener condiciones térmicas adecuadas durante el funcionamiento del sistema, se utilizaron dos ventiladores auxiliares a lo largo de las pruebas experimentales. El primero fue dirigido hacia la motocicleta para favorecer la disipación de calor del motor y simular el flujo de aire presente durante la circulación normal del vehículo. El segundo ventilador fue orientado hacia la unidad de absorción de potencia del dinamómetro (PAU), permitiendo controlar la temperatura de operación durante periodos prolongados de trabajo, especialmente en pruebas dinámicas donde las variaciones de carga generan mayores exigencias térmicas sobre el sistema.

Previo al inicio de cada ensayo se verificó el estado general del banco dinamométrico, incluyendo el funcionamiento del dinamómetro, la correcta fijación de la motocicleta y la respuesta de los equipos de medición asociados al sistema. Asimismo, se permitió que el motor alcanzará condiciones estables de operación antes de iniciar la adquisición de datos, con el propósito de reducir variaciones relacionadas con cambios transitorios de temperatura y funcionamiento. Bajo estas condiciones, el banco de pruebas permitió obtener información consistente para el análisis del desempeño del motor y de las emisiones generadas durante la utilización de mezclas gasolina–isobutanol en condiciones estacionarias y dinámicas.



Ilustración 1. Montaje de la motocicleta en el dinamómetro.

3.3. Equipo de medición

Para la adquisición de variables relacionadas con el desempeño del motor y la composición de los gases de escape, se emplearon diferentes equipos de medición durante el desarrollo experimental. Estos instrumentos permitieron registrar información asociada al régimen de giro del motor y las emisiones generadas durante las pruebas realizadas con mezclas gasolina–isobutanol.

El régimen de giro del motor fue monitoreado mediante un dispositivo SmartTach, utilizado como referencia externa para verificar las revoluciones por minuto (RPM) durante los ensayos. Este equipo permitió realizar un seguimiento continuo del comportamiento del motor bajo diferentes condiciones de carga y velocidad durante la ejecución de las pruebas. Para el análisis de emisiones se utilizó un analizador de gases MD-Gas-5C, instalado de manera complementaria al dinamómetro de chasis Mustang MD-150 como se muestra en la Ilustración 2. Aunque el sistema se encuentra integrado físicamente al banco de pruebas, su funcionamiento es independiente de las mediciones de desempeño realizadas por el dinamómetro, permitiendo efectuar el análisis de emisiones sin intervenir en el registro de variables como potencia y torque.



Ilustración 2. Módulo analizador de gases de combustión.

El analizador permite medir concentraciones de CO, CO₂, O₂ y HC presentes en los gases de escape de la motocicleta durante los ensayos como se muestra en la

Tabla 2. La toma de muestra se realizó directamente desde el sistema de escape, permitiendo registrar el comportamiento de las emisiones. La información suministrada por este dispositivo permitió relacionar las variaciones de mezcla con los cambios observados en desempeño y emisiones durante cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 2. Características técnicas del MD-Gas-5C

Características técnicas del analizador de gases MD-gas-5C			
Productos de combustión	Rango de Medición	Resolución	Técnica de medición
CO	0-14% volumétrico	0,01% volumétrico	Sensor NDIR
CO ₂	0-18% volumétrico	0,1% volumetrico	Sensor NDIR
HC	0-10.000 ppm	1 ppm	Sensor NDIR
O ₂	0-25% volumétrico	0,01% volumétrico	Celda electroquímica

3.4. Preparación de las mezclas

Las mezclas utilizadas durante el desarrollo experimental fueron preparadas a partir de gasolina extra comercial colombiana e isobutanol, empleando proporciones mezclas en proporciones volumétricas del 10 %, 20 % y 30 % (I10, I20 e I30, respectivamente). La preparación de cada mezcla se realizó previamente al desarrollo de los ensayos, utilizando balones volumétricos con el fin de medir las proporciones de combustible empleadas durante el procedimiento de preparación. Como se puede ver en la Ilustración 3, inicialmente, se determinó el volumen correspondiente de gasolina e isobutanol para cada una de las mezclas. Posteriormente, ambos componentes fueron incorporados en recipientes independientes y homogeneizados manualmente antes de ser suministrados al depósito de combustible de la motocicleta.

De manera complementaria, se empleó una balanza electrónica como método de verificación durante el proceso de preparación, permitiendo controlar la masa de los combustibles utilizados y reducir posibles variaciones asociadas a errores de dosificación. Esta metodología permitió mantener mayor uniformidad entre las mezclas evaluadas y mejorar la repetibilidad de los ensayos realizados en el banco dinamométrico.

Una vez preparadas, las mezclas fueron almacenadas temporalmente en recipientes limpios y debidamente identificados para evitar contaminación cruzada entre combustibles y variaciones en la composición de cada muestra. Antes de iniciar cada ensayo se verificó la disponibilidad de la mezcla correspondiente y se realizó el suministro al sistema de alimentación bajo las mismas condiciones de operación para todas las pruebas desarrolladas. La preparación controlada de las mezclas permitió establecer condiciones consistentes de comparación entre gasolina convencional y mezclas gasolina–isobutanol.



Ilustración 3. Proceso de mezclado y pesado de gasolina – isobutanol

3.5. Motocicleta utilizada en los ensayos

Para el desarrollo experimental se utilizó una motocicleta Kawasaki ER-6N como se muestra en la Tabla 3 equipada con un motor bicilíndrico de cuatro tiempos, equipada con tecnología DOHC (doble árbol de levas en la cabeza de fuerza), sistema de refrigeración líquida y una cilindrada de 649 cc. La motocicleta cuenta con sistema de inyección electrónica. La selección de este modelo se realizó principalmente debido a su disponibilidad en el laboratorio y a sus características operativas, las cuales resultan adecuadas para la ejecución de pruebas en dinamómetro bajo diferente régimen de revoluciones.

Adicionalmente, la Kawasaki ER-6N corresponde a una motocicleta de media-alta cilindrada ampliamente utilizada en entornos urbanos y de uso cotidiano. Antes del desarrollo de las pruebas se verificó el estado general de la motocicleta, incluyendo nivel de combustible, presión de neumáticos y condiciones básicas de funcionamiento del motor cómo: nivel de aceite, estado del filtro de combustible y de aire, con el propósito de mantener condiciones similares entre cada uno de los ensayos realizados. Asimismo, se procuró conservar la configuración original de la motocicleta durante toda la etapa experimental, evitando modificaciones mecánicas que pudieran alterar el comportamiento del motor o afectar la comparación entre combustibles.

Tabla 3. Ficha técnica de la Kawasaki ER-6N.

Especificaciones Técnicas	
Alimentación de combustible	Inyección electrónica
Cilindrada	649 CC
Número de cilindros	2
Potencia	71.02 hp @7000 rpm
Par Máximo	64 Nm @8500 rpm
Distribución	DOHC
Válvulas por cilindro	4
Modelo	2014
Peso en vacío	204 kg
Relación de compresión	11,3:1

3.6. Desarrollo experimental

Las pruebas se desarrollaron empleando el ciclo de conducción del Área metropolitana y el Valle del Aburrá (AMVA), utilizado para representar condiciones reales de circulación en el entorno urbano como se observa en la Ilustración 4. Ciclo área Metropolitana del Valle

de Aburrá.. Este ciclo incorpora aceleraciones, desaceleraciones y variaciones de velocidad similares a las presentes durante la operación cotidiana de una motocicleta, permitiendo evaluar el comportamiento del motor bajo condiciones dinámicas de funcionamiento. Inicialmente, la motocicleta operó utilizando gasolina extra como combustible base de comparación. Posteriormente, se realizaron los ensayos empleando cada una de las mezclas gasolina–isobutanol bajo las mismas condiciones de operación (mismo ciclo de conducción, mismo montaje, mismas condiciones del dinamómetro, mismo procedimiento de ensayo y mismo protocolo de adquisición de datos.), con el fin de mantener criterios uniformes durante el desarrollo experimental y facilitar la comparación entre combustibles.

Durante la ejecución de las pruebas se registraron variables relacionadas con el desempeño del motor, incluyendo potencia, torque y régimen de giro, así como concentraciones de CO, CO₂ y HC presentes en los gases de escape. De manera complementaria, la adquisición de datos se realizó de manera continua a lo largo de cada prueba, permitiendo comparar el comportamiento de la motocicleta frente al uso de gasolina extra y mezclas gasolina–isobutanol. Los resultados obtenidos permitieron posteriormente analizar la influencia del contenido de isobutanol sobre el desempeño del motor y las emisiones generadas durante el funcionamiento de la motocicleta.

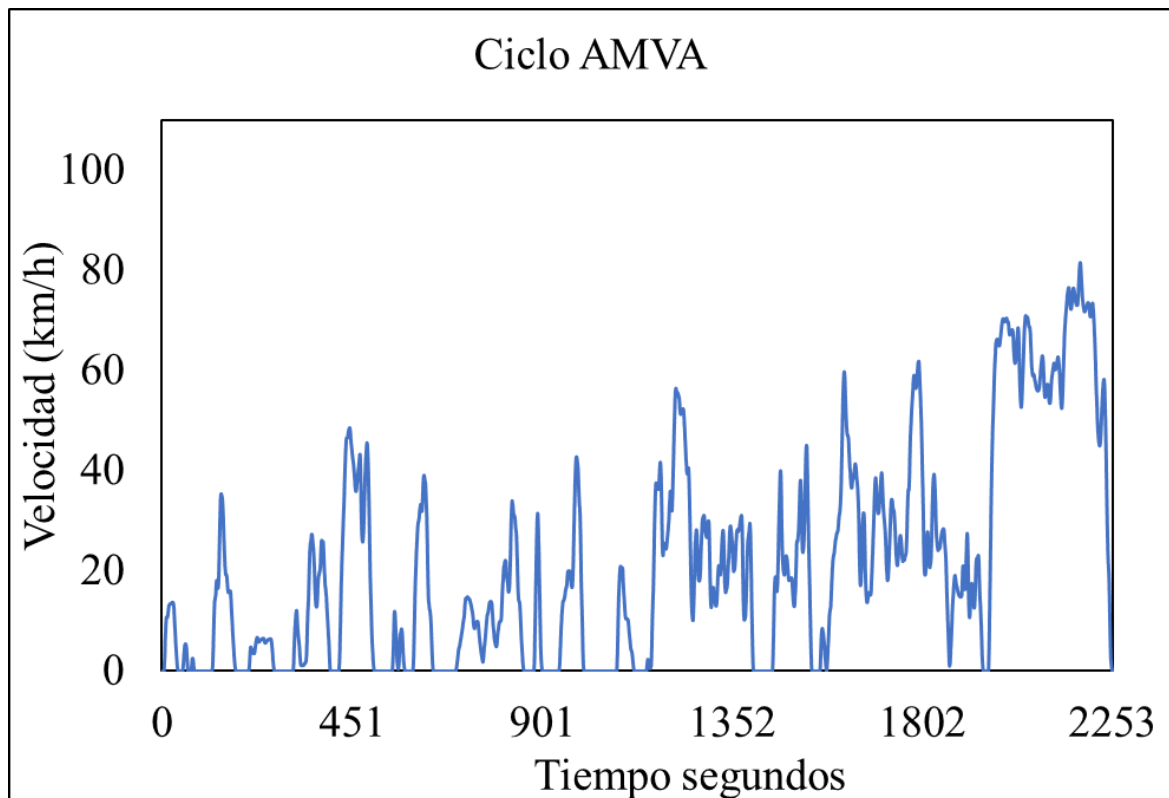


Ilustración 4. Ciclo área Metropolitana del Valle de Aburrá.

El estudio contrasta el uso de gasolina extra comercial, teniendo presente que esta cuenta con un porcentaje del 10% de Etanol frente a las mezclas optimizadas con Isobutanol como biocombustible de segunda generación.

Con el propósito de mitigar la dispersión de los datos puntuales el ciclo de conducción AMVA se segmentó en cuatro fases operacionales diferenciadas, dicha sectorización metodológica se fundamentó en dos variables críticas de control: el intervalo de tiempo y la velocidad máxima alcanzada en cada tramo como se observa en la

Tabla 4. Caracterización operativa de las fases del ciclo de conducción AMVA. A través de esta división, es posible evaluar de manera cuantitativa la tasa de formación y evolución de las emisiones contaminantes bajo regímenes reales de operación. La segmentación del ciclo permite registrar la firma de emisiones en un espectro completo de conducción urbana: desde las altas concentraciones de CO y HC provocadas por la combustión incompleta en ralentí prolongado y aceleraciones intermitentes (típicas de zonas con alta congestión vehicular), hasta la estabilización de los índices de emisión alcanzados bajo

velocidades de cruce constantes en las vías rápidas de la región como la avenida regional.

Tabla 4. Caracterización operativa de las fases del ciclo de conducción AMVA.

Fase del Ciclo	Intervalo de Tiempo (s)	Velocidad Máxima (km/h)	Entorno Urbano Simulado	Régimen de Operación
Velocidades Bajas	0 – 420	30	Zonas residenciales y sectores de alta congestión vehicular en el centro urbano.	Operación dominante en ralentí, arranques frecuentes (<i>stop-and-go</i>) y bajas revoluciones.
Velocidades Medias	420 – 1158	50	Zonas de transición interbarrial y flujo vehicular moderado.	Transición de carga parcial, aceleraciones sostenidas.
Velocidades Altas	1158 – 1958	60	Vías arterias principales, avenidas longitudinales y condiciones de flujo libre.	Operación en velocidad de cruce urbana.
Velocidades Extra Altas	1958 – 2482	80	Vías rápidas, autopistas urbanas y corredores metropolitanos metropolitanos (e.g., Autopista Sur/Regional).	Máxima exigencia de potencia del ciclo, regímenes de altas revoluciones por minuto (RPM) y operación cercana al límite legal permitido en la infraestructura del AMVA.

4. Resultados y análisis

En este capítulo se exponen, analizan y discuten los resultados experimentales a partir de las pruebas realizadas, orientadas a evaluar el comportamiento de las emisiones contaminantes de la motocicleta seleccionada. El análisis de los gases de escape se centró cuantitativamente en el CO y los HC, por ser los dos indicadores directos de la calidad de la combustión. La evaluación de estos contaminantes se alinea directamente con las exigencias de la Ley 1972 de 2019, la cual regula las emisiones vehiculares en el territorio nacional con el objeto de mitigar el impacto ambiental de las fuentes móviles y garantizar la protección de la salud pública mediante la adopción de límites máximos de emisión más estrictos.

En este contexto normativo, la introducción de isobutanol en la matriz del combustible altera las propiedades de la mezcla (tales como el contenido de oxígeno y eleva el octanaje), lo que modifica el proceso de combustión frente a la gasolina corriente. Esto convierte al isobutanol en una opción real para cumplir con las normas ambientales. A continuación, se muestran los datos de las pruebas para cada fase del ciclo

4.1. Presentación de resultados de emisiones

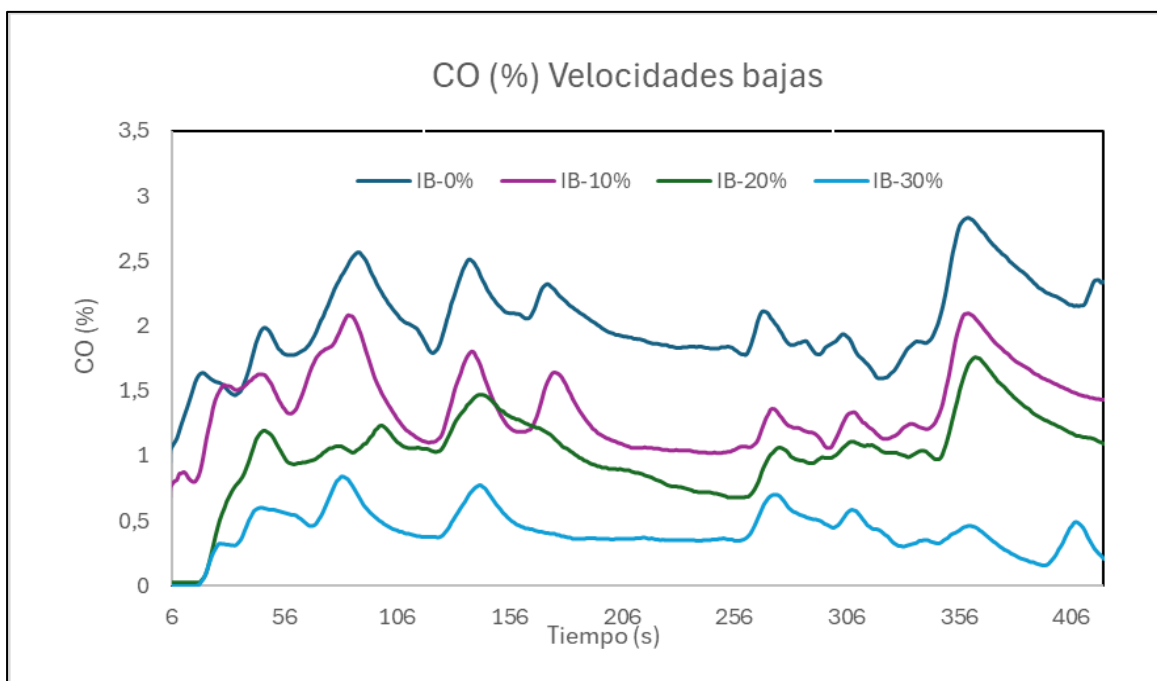
4.1.1. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades bajas

En la Ilustración 5. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades bajas. se muestran los perfiles de emisiones emitidas durante el primer tramo del ciclo de conducción AMVA (subciclo de velocidades bajas). Para el caso del CO, los datos experimentales reflejan que la gasolina como combustible base de referencia muestra un desempeño desfavorable, registrando la concentración promedio más elevada con un 2,09% vol. En contraste, la adición de isobutanol refleja una clara tendencia a mitigar esta especie, particularmente con el uso del IB10 logró reducir un promedio de 1,5% vol (Aproximadamente 30,2%). Esta reducción fue cada vez mayor a medida que se aumentó el porcentaje de isobutanol, ya que, la mezcla IB20 redujo hasta 1,09% vol

(aproximadamente 48,1%), mientras IB30 redujo en promedio 0,33% vol (84,3% menos de CO).

Por otra parte, el comportamiento de los HC mantuvo una correspondencia directa con la tendencia de reducción observada en el CO. Bajo la operación con gasolina corriente, el motor emitió en promedio 310.08 ppm y picos de emisiones cada que se hacían cambios bruscos de velocidad. Con la introducción de isobutanol, se evidenció una reducción de HC con IB10 e IB20 de aproximadamente 20,6% y 39,9%, respectivamente, mientras que el uso de IB30 tuvo un efecto adverso, en el aumento en las emisiones de HC en comparación con IB20 registrando un promedio de 197,82 ppm aunque manteniéndose por debajo de las emisiones emitidas por la gasolina comercial (IB0) con una reducción del 36,2%.

Estos resultados, se debe a que a bajas velocidades el proceso de combustión es más lento lo que le posibilita que el tiempo de oxidación del combustible junto con el aporte de oxígeno del isobutanol se logren combustiones más eficientes. Sin embargo, el aumento de las emisiones de HC con IB30 se da como resultado del aumento del consumo específico de combustible, el cual se debe a la deficiencia energética del isobutanol como se explica en la sección 4.3.



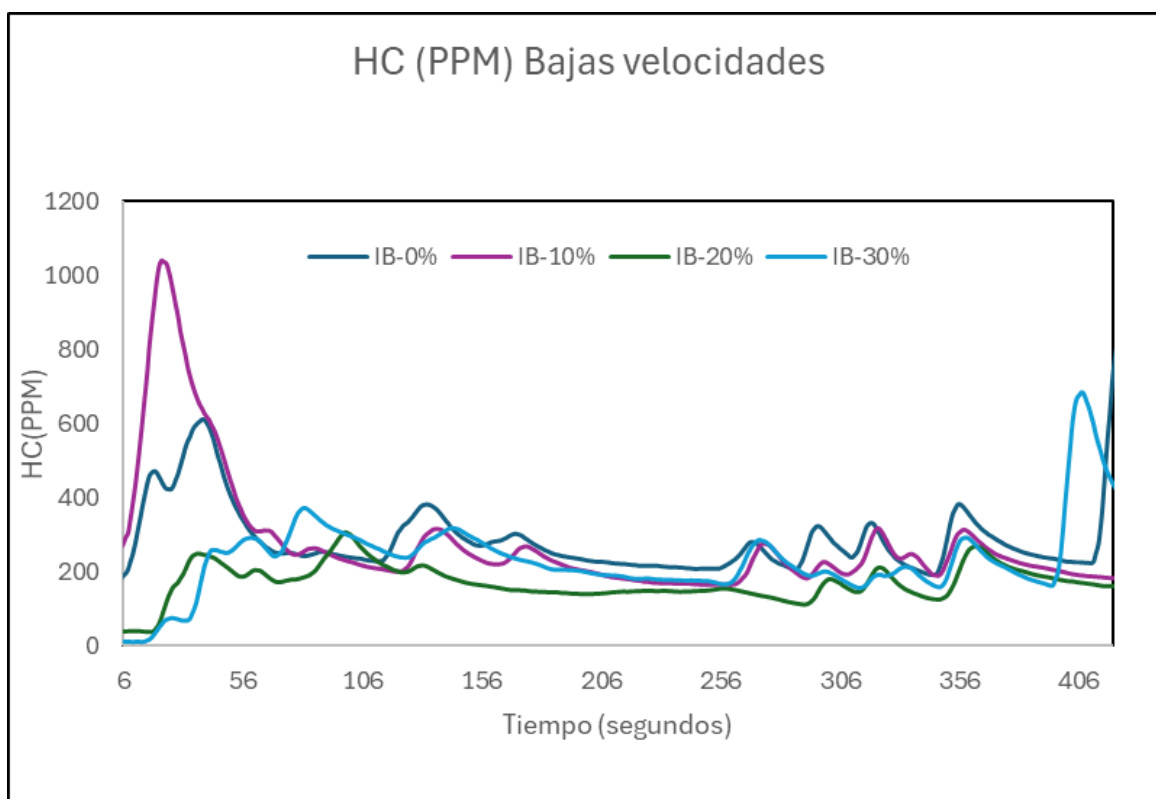


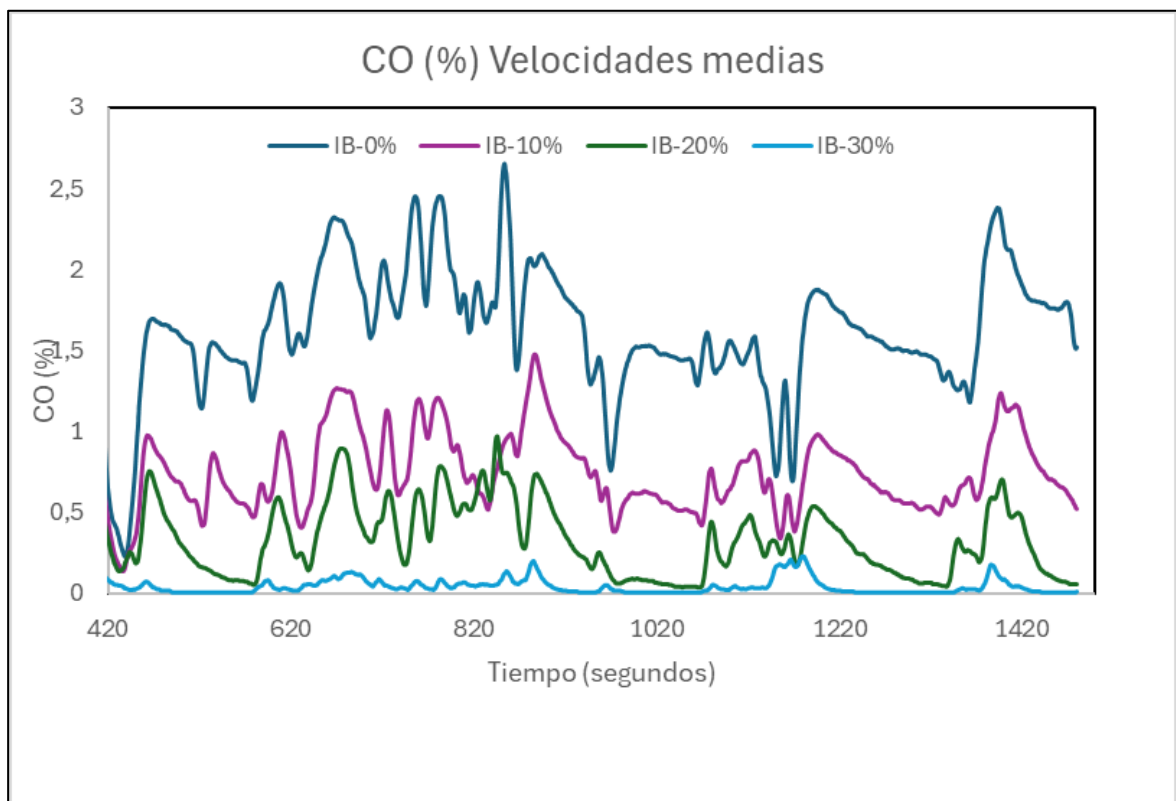
Ilustración 5. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades bajas.

4.1.2. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades medias

En este apartado se detallan los perfiles de emisión registrados durante un tramo del ciclo de conducción AMVA, correspondiente al subciclo de velocidades medias como se observa en la Ilustración 6. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades medias. el cual se extiende entre 420 – 1158 segundos como se especificó en la Tabla 4. Caracterización operativa de las fases del ciclo de conducción AMVA. En lo que respecta al CO, los datos experimentales reflejan que la operación con gasolina como el combustible base de referencia mantuvo el desempeño más contraproducente en esta fase, promediando una concentración de 1,52% vol y manifestando variaciones moderadas a lo largo de este recorrido.

Al usar mezclas IB10, IB20 e IB30 la generación del CO se redujo desde 52% hasta aproximadamente 96%, mientras que, las emisiones de HC mostraron la misma tendencia

que el CO. Cuando el motor operó con el combustible base se registraron emisiones de HC hasta de 286,98 ppm. Luego, las mezclas IB10, IB20 e IB30 redujo en promedio las emisiones de HC hasta 191,15 ppm, 141,97 ppm y 98,15 ppm, lo que representa reducciones de 33,4%, 50.5% y 65,8%, respectivamente. A diferencia de lo sucedido en el primer subciclo donde la mezcla IB30 aumentaba las emisiones de HC en comparación con IB20, en este tramo de velocidades medias todas las concentraciones de mezclas disminuyeron forma ordenada cómo se llegó a esperar gracias a una combustión más homogénea dentro de la cámara de combustión. Esto demuestra que cuando la motocicleta se estabiliza a una velocidad constante y el motor alcanza una temperatura de operación mayor, el IB30 mejora la reducción de estas especies de gases contaminantes.



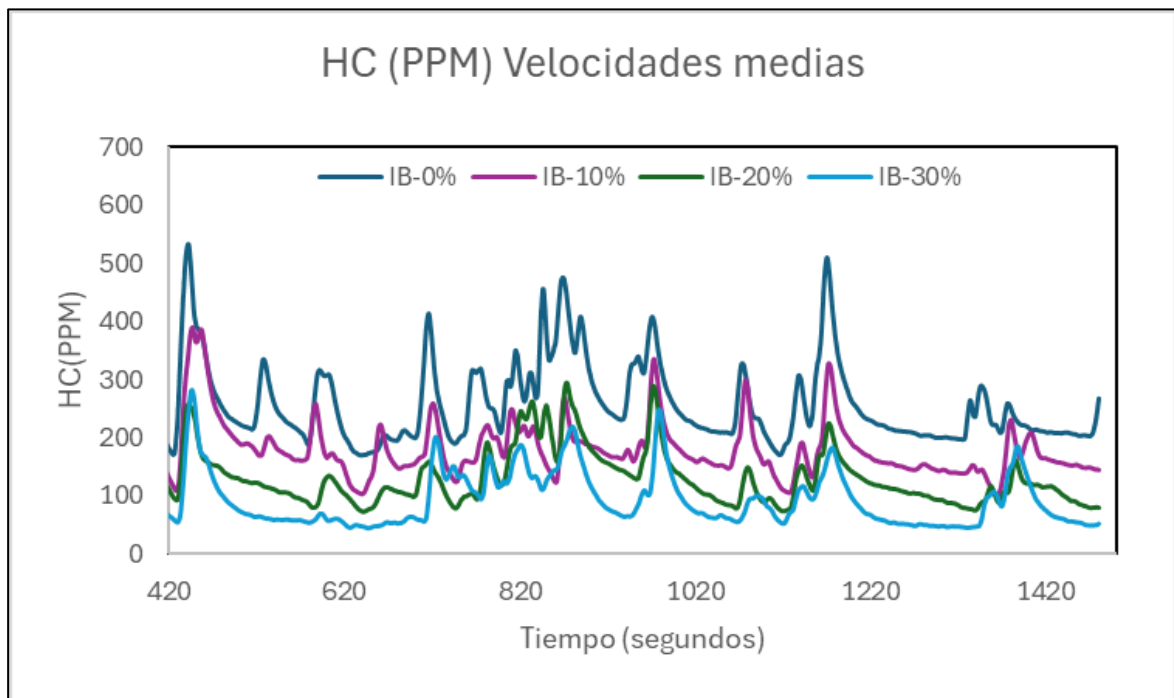


Ilustración 6. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades medias.

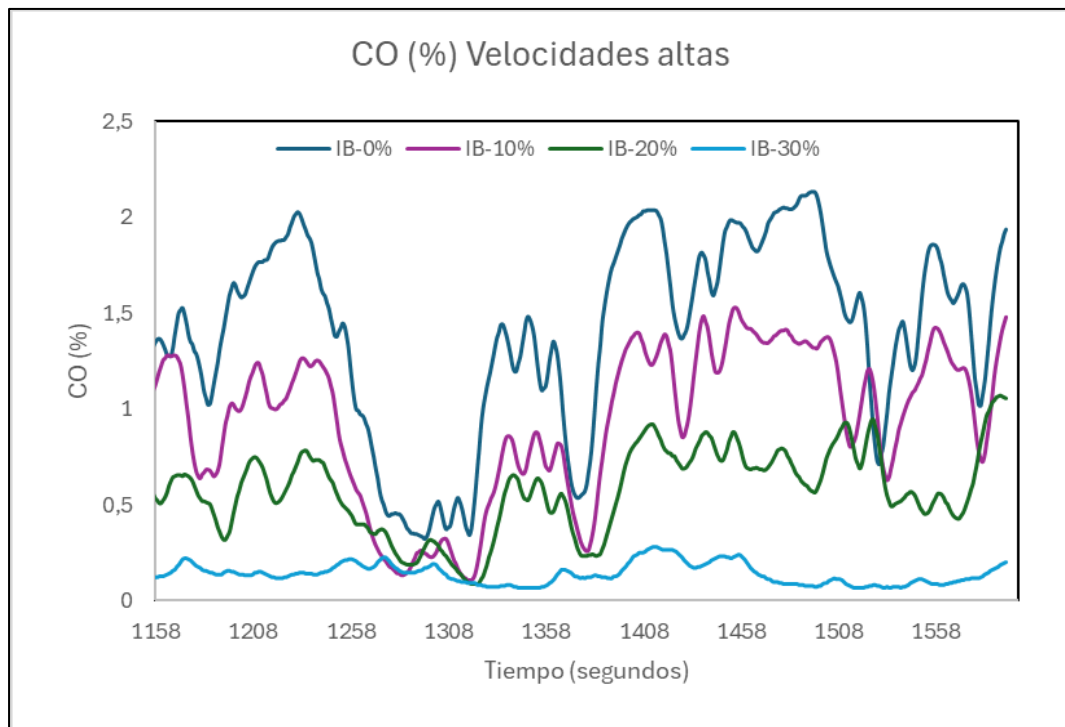
4.1.3. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades altas

El tercer subciclo del ciclo AMVA, correspondiente a velocidades altas como se observa en la Ilustración 7, el motor se somete a un régimen de mayor aceleración. Bajo estas condiciones de mayor exigencia, la gasolina como combustible base volvió a mostrar el desempeño más crítico en función a las emisiones emitidas, elevando de forma simultánea los dos gases debido al aumento de combustible inyectado al motor y a la disminución en el tiempo para el proceso de combustión en comparación con los anteriores subciclos, presentado emisiones promedio de 1,32% vol de CO y 264,30 ppm para los HC.

Con el uso de mezclas con isobutanol, las cuales siguen el comportamiento de reducir gradualmente las emisiones emitidas con respecto al aumento de concentración volumétrica del alcohol. Con la mezcla IB10 las especies de gases disminuyeron en una concentración promedio de 0,81% vol para el CO y 191 ppm de HC, al duplicar la presencia

del isobutanol al 20% (IB20), dicha tendencia a la baja se mantiene bajando las concentraciones de CO 0,46% vol y 153,75 ppm, respectivamente.

El punto que se destaca de una manera notoria es la mezcla del 30% (IB30). En la fase de alta velocidad, esta mezcla logró disminuir en gran medida las emisiones, registrando un promedio de apenas de 0,104% vol de CO y 98,16 ppm de HC. Este resultado, muestra que a alto régimen de revoluciones el oxígeno aportado por el isobutanol en la mezcla es clave para una combustión más completa la cual nos ayuda a reducir el CO en un 38,7%, 65,5% y 92% al igual que los HC casi en una tercera parte en comparación con el combustible base en esta etapa lo que representa un 27,8%, 41,82% y 62,87% respectivamente para esta especie de gas-



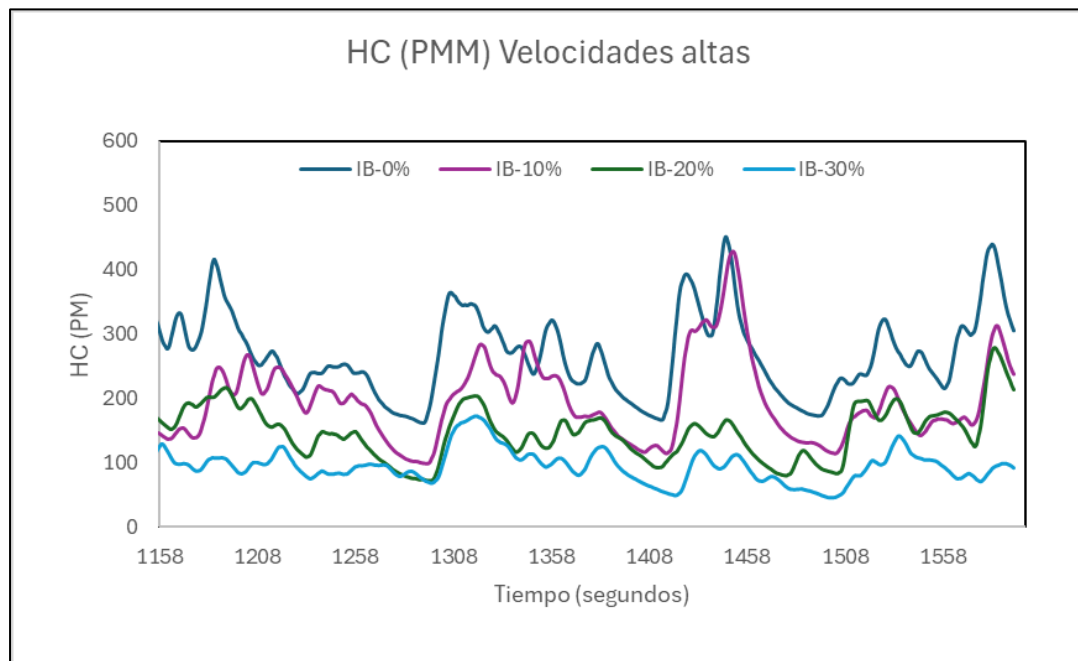


Ilustración 7. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades altas

4.1.4. Comportamiento del CO y HC en el subciclo de velocidades extra altas

En esta etapa de cierre del ciclo AMVA se evaluaron velocidades extra altas como se observa en la Ilustración 8, un escenario de una alta exigencia mecánica que simula la operación de la motocicleta bajo una alta demanda de potencia sostenida. En esta etapa final, el uso de mezclas oxigenadas demostró un impacto directo en la reducción de las emisiones contaminantes como se llega a observar en la Ilustración 8 desde la concentración más baja como lo evidenciamos en los subciclos anteriores.

Para este caso las pruebas experimentales con el combustible base muestra un comportamiento bajos en los resultados con una concentración promedio de 0,589% vol de CO, este fenómeno se debe a que al final del ciclo se manejan altas revoluciones la cámara de combustión alcanza su temperatura óptima de trabajo, estas altas temperaturas sirven como un activador térmico que permite que la mayoría de CO encuentre la energía

para oxidarse por completo y transformarse en CO₂, logrando niveles bajos de esta especie de gas.

La implementación de esta mezcla IB10 logró reducir las emisiones de CO hasta un promedio de 0,372% vol, mientras que la mezcla IB20 logró reducciones hasta de 0,30% vol. Por su parte, la mezcla IB30 registró una concentración de 0,22% vol, un comportamiento esperado debido al alto calor latente de vaporización del alcohol (aproximadamente $566 \frac{kJ}{kg}$), el cual genera un efecto refrigerante local dentro del cilindro lo que frena un poco la velocidad con la que se quema el CO en ese momento de máxima velocidad, estas reducciones de la concentración de CO emitida corresponden a un 38%, 50% y 66,7%.

En conjunto el comportamiento de los HC sigue de manera predecible la tendencia de disminuir como en los subciclos anteriores. Bajo la operación del combustible base obtiene una concentración promedio de 185,89 ppm. No obstante, al agregar más porcentaje de isobutanol a las mezclas disminuye la formación de esta especie de gas. La mezcla de IB10 registra un promedio de concentración de 115,74 ppm – 37,7% de reducción. Esta respuesta de reducción sigue la tendencia a bajar acorde aumenta la cantidad de isobutanol en la mezcla, con la mezcla de IB20 se redujo progresivamente su concentración hasta 98,78 ppm – 46,9% de reducción y finalmente la mezcla de IB30 consolidó la mayor reducción en este tramo siendo su concentración promedio de 67,73 ppm (63,6%) de reducción en la emisión de este gas, teniendo presente que estas comparaciones de reducción siempre se hacen con la cantidad de concentración promedio del combustible base. Estos resultados demuestran que el aporte extra de oxígeno del isobutanol favorece a la mitigación de generación de CO y HC en la motocicleta.

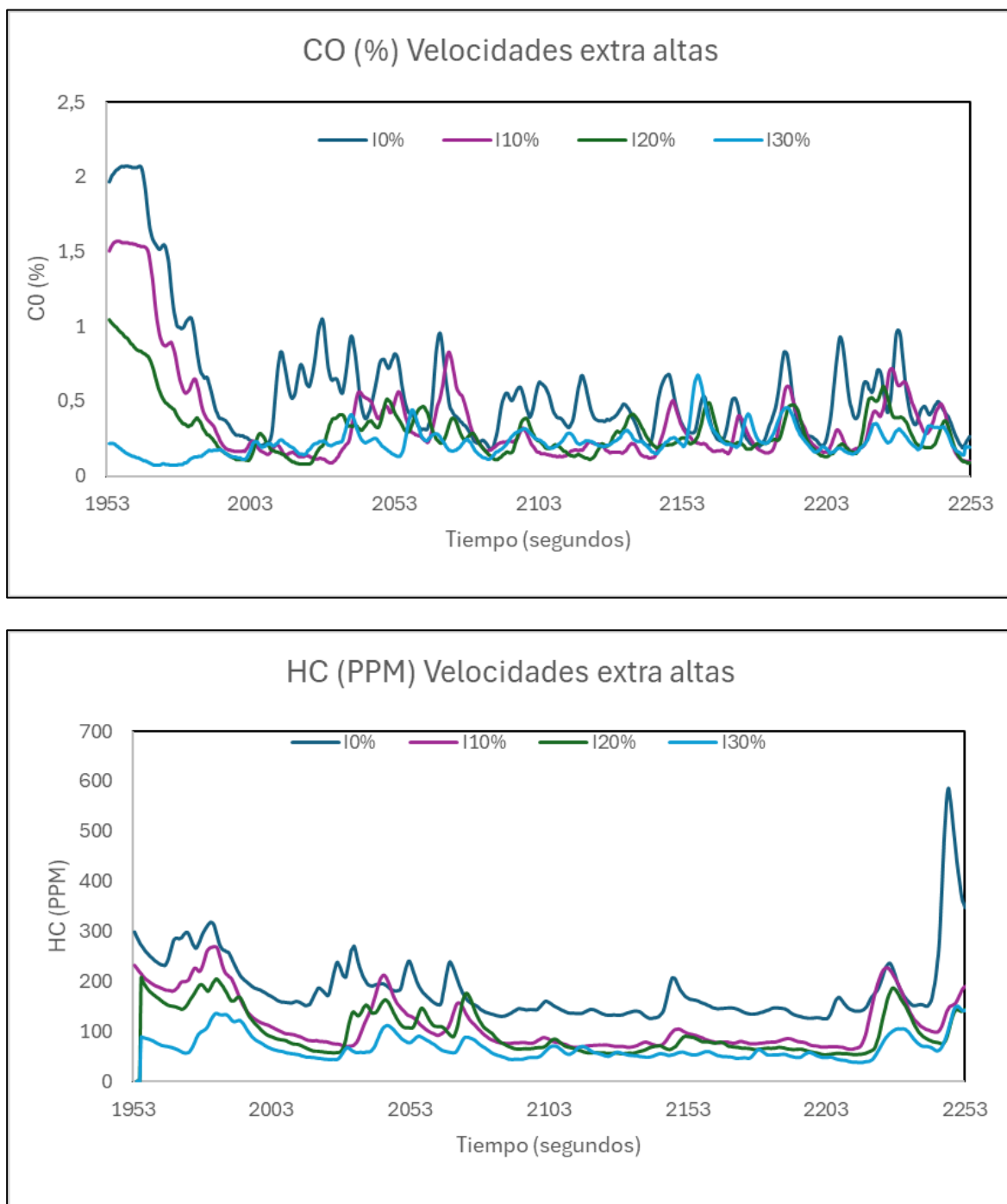


Ilustración 8. Perfil de emisiones de CO y HC en el subciclo de velocidades extra altas.

4.2. Comportamiento de la potencia del motor

En la Ilustración 9 se presentan las curvas de potencia obtenidas en el banco de ensayos. Los datos experimentales reflejan que la potencia desarrollada por la motocicleta se mantuvo constante sin registrar variaciones significativas independientemente de la concentración volumétrica de isobutanol usado en cada ensayo. Tanto el combustible comercial base (IB0) como con sus concentraciones oxigenadas (IB10, IB20, IB30) describen una curva de potencia muy similares a lo largo del ciclo de conducción, alcanzando de manera conjunta sus picos máximos de desempeño mecánico bajo el mismo régimen de operación.

Esta estabilidad demuestra que el isobutanol funciona de una buena manera al mezclarse con la gasolina en motores de motocicletas. A diferencia de otros alcoholes como el etanol, el isobutanol tiene características similares a las de la gasolina comercial, esto nos permite que el motor queme la mezcla con la misma eficiencia, logrando que la motocicleta no pierda potencia en la rueda sin importar su porcentaje de alcohol en estos ensayos experimentales. En contraste con las marcadas fluctuaciones y reducciones logradas en las emisiones de gases contaminantes detallados en las secciones previas, el rendimiento motriz no experimentó ningún efecto negativo ni mejora del mismo, con esto se evidencia que la introducción de mezclas con isobutanol, incluso en concentraciones IB-30 permiten mantener las prestaciones mecánicas de la motocicleta, consolidando una alternativa amigable y viable que ayuda a reducir considerablemente el impacto ambiental en el escape sin comprometer la respuesta del motor demandada por el usuario.

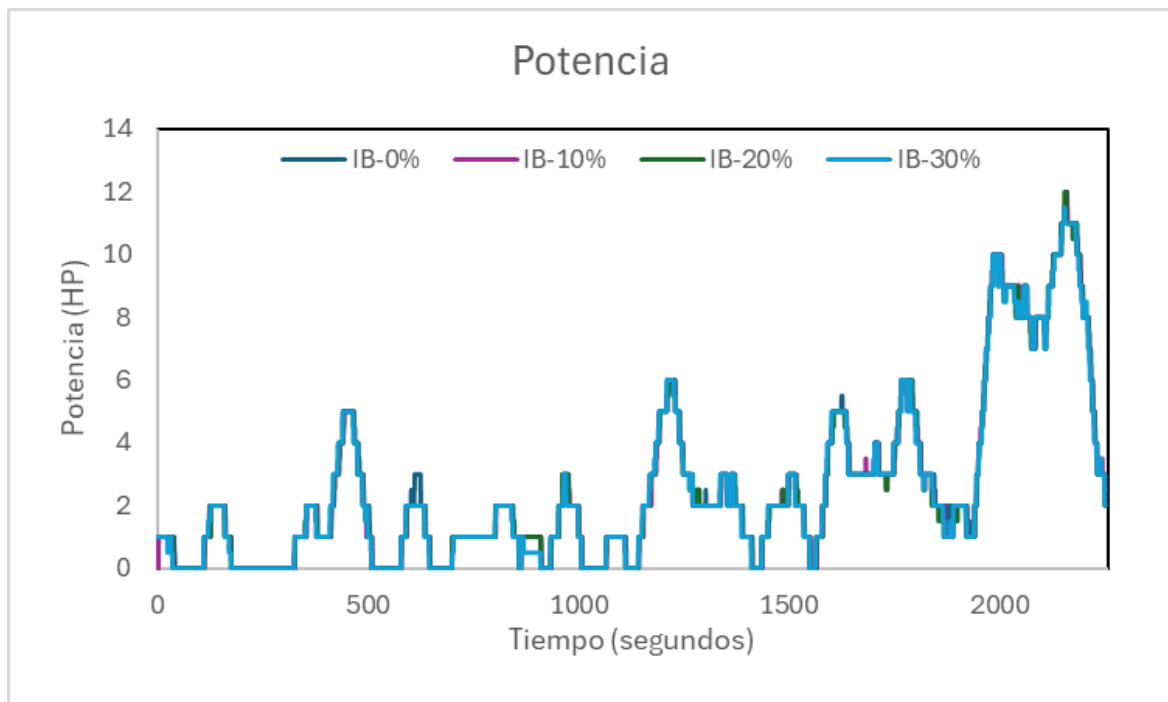


Ilustración 9. Curvas de potencia desarrolladas durante el ciclo de conducción.

4.3. Comportamiento del consumo de combustible

En la Ilustración 10 se presenta el consumo de combustible acumulado en mililitros a lo largo de todo el ciclo de conducción. Los datos experimentales reflejan que el combustible base comercial (gasolina) registró el consumo de volumen más bajo con 650 ml aproximadamente al finalizar el recorrido. En contraste, la adición de isobutanol mostró una tendencia al incremento de manera escalonada y proporcional a la concentración de alcohol utilizada en las mezclas.

La mezcla IB10 inició este desplazamiento hacia arriba en las curvas de consumo con 750 ml. Esta respuesta de incremento fue cada vez mayor a medida que se aumentó el porcentaje de biocombustible, elevándose moderadamente con la mezcla IB20 (1000 ml) y alcanzando el mayor gasto volumétrico con la mezcla IB30 (1125 ml), cuya línea se mantuvo de forma sostenida en la parte superior de la gráfica, estos aumentos de consumo de combustible constituyen a un 20%, 60% y 80% respectivamente para las concentraciones mencionadas anteriormente.

Este fenómeno es el comportamiento esperado debido al menor poder calorífico neto que posee el alcohol en comparación con el combustible base. Al liberar menos energía térmica por unidad de masa, el sistema de inyección electrónica de la motocicleta compensa automáticamente esta diferencia inyectando una mayor cantidad de combustible dentro de la cámara. Este ajuste de la computadora es precisamente el que permite mantener el motor funcionando de forma correcta y garantiza que la potencia mecánica no sufra pérdidas ni caídas, sacrificando únicamente un porcentaje extra de consumo a cambio de las reducciones de gases contaminantes obtenidas.

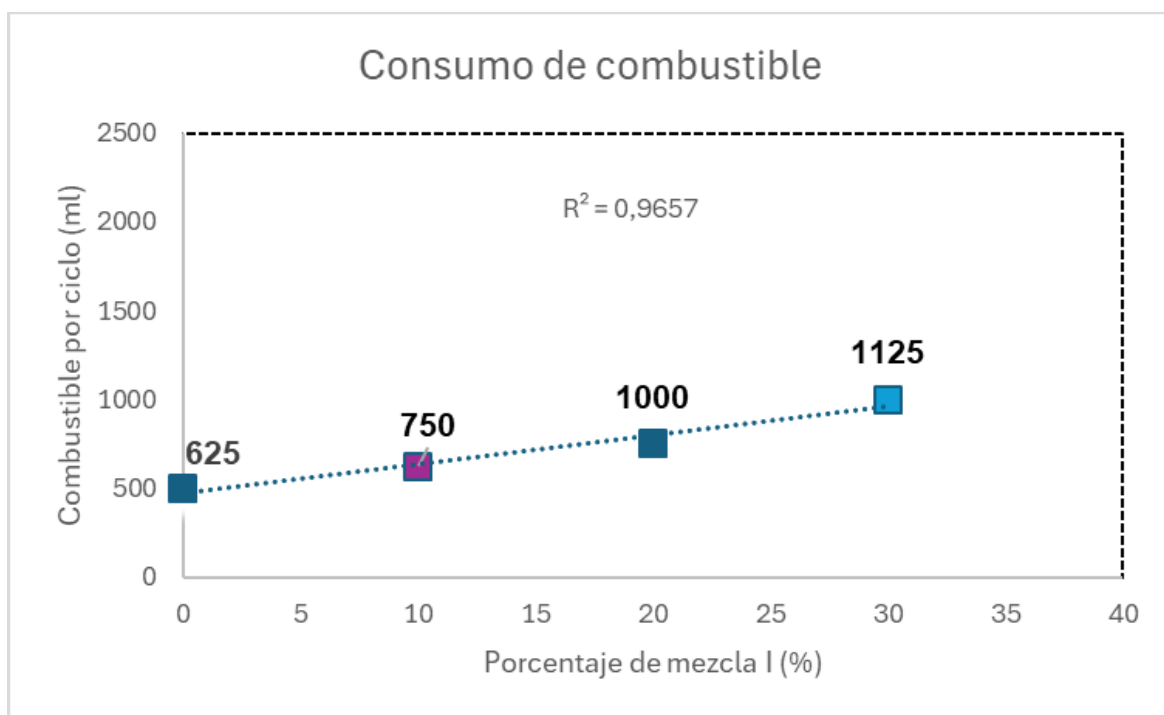


Ilustración 10. Consumo de combustible en mililitros en el ciclo de conducción.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Al finalizar la investigación realizada en el banco de ensayos dinámicos, se evaluó el comportamiento de la motocicleta equipada con un sistema de alimentación de inyección electrónica operando bajo diferentes concentraciones volumétricas de mezcla gasolina/isobutanol. A partir de los datos experimentales obtenidos, se obtuvo que:

Se comprobó que el uso de mezclas con isobutanol reduce de manera continua las emisiones de HC en todas las etapas evaluadas. El aporte de oxígeno extra que contiene este alcohol optimiza la quema del combustible, alcanzando el mejor desempeño ambiental con la mezcla IB30 en el tramo de velocidades extra altas. Esta concentración de mezcla logró disminuir la contaminación en gran medida con un 62,87%.

-En cuanto al CO, los resultados reflejan que el isobutanol mantiene un control eficiente de este gas. Sin embargo, en el régimen de máxima velocidad, la alta temperatura alcanzada por el motor ayuda a que el CO se oxide de forma natural, un proceso que se volvió un poco más lento en las mezclas con más alcohol debido a su propiedad de enfriar el interior del cilindro al evaporarse y logrando reducir un 92% en la emisión de este gas.

-A través de las pruebas con el dinamómetro, se demostró que la potencia del motor se mantiene completamente idéntica, estable e invariable, sin importar el porcentaje de mezcla utilizado (IB10, IB20 o IB30). Debido a que las curvas de potencia quedaron exactamente superpuestas con las de la gasolina normal, se confirma que el isobutanol permite cuidar el medio ambiente reduciendo los gases contaminantes, sin que se pierda potencia ni rendimiento en la motocicleta.

-Finalmente, se determinó que el consumo de masa de combustible acumulado aumenta de forma escalonada y ordenada a medida que se incrementa el porcentaje de alcohol en la mezcla, registrando su valor más alto con la formulación IB30 cuyo aumento contituye a

Tradición - **Transformación** - Innovación

Acreditados en Alta Calidad. Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.

Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador

Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: +57 (604) 448 0520



SC 7134-1



SA-CER901605



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

un 80%. Este incremento es la respuesta lógica del sistema de inyección electrónica, el cual compensa el menor poder calorífico del isobutanol dosificando más combustible; este ajuste automático es la clave que permite mantener la estabilidad en las curvas de potencia del motor a cambio de las notables reducciones de gases logradas en el escape.

5.2. Recomendaciones

-Se recomienda ampliar el rango de las mezclas evaluadas en próximos ensayos, explorando concentraciones intermedias (como IB15 o IB25) o incluso superiores al 30% (como IB40 o IB50). Esto permitirá identificar con precisión el punto de inflexión o límite crítico en el cual el sistema de inyección original de la motocicleta ya no sea capaz de compensar el menor poder calorífico del alcohol, o donde la estabilidad de la potencia empiece a verse afectada.

-Es aconsejable replicar esta misma metodología metodológica utilizando una muestra más amplia y diversa de motocicletas de inyección electrónica (diferentes marcas, cilindrada y configuraciones de motor). Debido a que las estrategias de programación de las unidades de control ECU varían entre fabricantes, evaluar más vehículos permitirá estandarizar si el comportamiento invariable de la potencia y el aumento escalonado del consumo con el isobutanol es una constante para todo el parque automotor de dos ruedas. Finalmente, se recomienda realizar un análisis del comportamiento de estas mezclas bajo arranques en frío y transitorios de aceleración rápida en el dinamómetro. Al tener el isobutanol una temperatura de evaporación distinta a la de la gasolina, evaluar estos estados críticos permitirá asegurar que el uso de concentraciones altas (como el IB30) no genere dificultades de encendido o baches de aceleración en el uso diario de la motocicleta.

6. Bibliografía

Aguirre Álvarez, C. D. (2022). *Evaluación energética y ambiental de un vehículo ciclo Otto usando mezclas iso-butanol/gasolina en un dinamómetro de rodillos y bajo condiciones de estado estacionario [Trabajo de grado, Institución Universitaria Pascual Bravo]*.

Mentes, M., & Celik, M. (2025). *Investigating the effects of isobutanol-gasoline blends on exhaust emissions and engine performance in a spark-ignition engine*. DOI disponible.

Llanes Cedeño, E. A., Quezada Vélez, S. F., & Faulkner, S. (2022). *Evaluación de emisiones contaminantes de un motor de encendido provocado utilizando mezcla gasolina-etanol mediante el protocolo IM-240 [Trabajo de grado, Universidad Internacional SEK]*. Repositorio Institucional UISEK.

Brandão, L. F. P., & Suárez, P. A. Z. (2018). *Evaluation of the density, volatility and anti-knock rating physical-chemical properties of alternative butanol/gasoline fuel blends*. *Acta Scientiarum. Technology*, 40(1).

Londoño, J., Serna, J., Gómez-Miranda, I. N., Ruiz, F. A., Agudelo, A. F., et al. (2026). *Factores de emisión y consumo de combustible de motocicletas bajo los nuevos ciclos de conducción de Medellín*. *Atmospheric Pollution Research*.

Juan Esteban Madrid B . (2025). *Caracterización experimental del rendimiento y emisiones de motocicletas con mezclas gasolina–alcohol en condiciones estacionarias y dinámicas*. Medellín, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo.

Yilmaz, N., & Atmanlı, A. (2017). *Experimental assessment of a gasoline engine fueled with butanol–gasoline blends*. *Biofuels*.

Zhang, Z., Balasubramanian, R., & Sharma, B. K. (2016). *Effect of ethanol, methanol and butanol on combustion characteristics of a spark ignition engine*. *Applied Energy*, 175, 278–288.

Al-Dulaimi, Z. M. H., Kareem, Z. S., Al-Zuhairy, M. S., & Mohammed, M. K. (2019). *Comparative studies on combustion, performance and emission characteristics of a two-wheeler with gasoline and 30% ethanol–gasoline blend using chassis dynamometer*. *Applied Thermal Engineering*, 156, 271–281.

Ghurri, A., & otros autores. (2024). *Performance and emissions of flex fuels in a 110-cc BS6-compliant fuel-injected two-wheeler without ethanol adaptation adjustments*. *Clean Energy*, 8(3), 174–186.

Rahman, M. M., & otros autores. (2024). *Experimental study on performance and emissions of BS VI compliant EFI motorbike with oxygenated fuel blends (E0, E10, E20 & M15)*. *SAE Technical Paper*, 2024-01-2372.

Saisirirat, P., & otros autores. (2020). *Comparison of the effect of 10% ethanol addition in 88 and 98 RON gasoline on the performance of a 150-cc motorcycle engine*. *AIP Conference Proceedings*, 2262, 050003.

Tsai, J.-H., Ko, Y.-L., Huang, C.-M., & Chiang, H.-L. (2019). *Effects of blending ethanol with gasoline on the exhaust emissions of fuel-injected motorcycles*. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(10), 2781–2792.

Yusoff, M. N. A. M., & otros autores. (2018). *Performance of the ethanol fueled four-stroke engine*. En *Proceedings of the International Conference on Green Technology*. SCITEPRESS.

Zhang, Z., Balasubramanian, R., & otros autores. (2015). *Combustion and emissions study on motorcycle engine fueled with butanol–gasoline blend*. *Renewable Energy*, 83, 316–326.

Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2024). *Parque automotor en Colombia*.

Agudelo, A. F., et al. (2019). *Factores de emisión en el Valle de Aburrá*.

Londoño, J., et al. (2026). *Factores de emisión y consumo de combustible de motocicletas bajo los nuevos ciclos de conducción de Medellín*. *Atmospheric Pollution Research*.

Yilmaz, N., & Atmanlı, A. (2017). *Experimental assessment of a gasoline engine fueled with butanol–gasoline blends*. *Biofuels*.

Brandão, L. F. P., & Suárez, P. A. Z. (2018). *Evaluation of properties of butanol/gasoline blends*. *Acta Scientiarum*.

Al-Dulaimi, Z. M. H., et al. (2019). *Comparative studies on combustion and emissions*. *Applied Thermal Engineering*.

Tsai, J.-H., et al. (2019). *Effects of blending ethanol with gasoline*. *Aerosol and Air Quality Research*.

Rahman, M. M., et al. (2024). Experimental study on performance and emissions. SAE Technical Paper.