



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**PASCUAL BRAVO®**

# MEDICIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENTRE FLUJÓMETRO DE ALTA PRECISIÓN Y DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN APLICADA A MOTOCICLETAS

Trabajo de grado para optar al título de:  
Tecnólogo en Mecánica Automotriz

**Asesor:**

PhD. Frank Alexander Ruiz Holguín

**Co-Asesor**

MSc. Javier David Londoño Echeverri

José David Erazo Cerón  
María Camila Jaramillo Echeverry

# MEDICIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENTRE FLUJÓMETRO DE ALTA PRECISIÓN Y DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN APLICADA A MOTOCICLETAS

Trabajo de grado para optar al título de:  
Tecnólogo en Mecánica Automotriz

José David Erazo Cerón

[jose.erazo740@pascualbravo.edu.co](mailto:jose.erazo740@pascualbravo.edu.co)

María Camila Jaramillo Echeverry

[maria.jaramillo857@pascualbravo.edu.co](mailto:maria.jaramillo857@pascualbravo.edu.co)

Asesor:

Frank Alexander Ruiz Holguín

PhD. Ingeniero Electrónico

Docente Facultad de Ingeniería

Departamento de Mecánica

Co-Asesor

Javier David Londoño Echeverri

MSc. Ingeniero Mecánico

Especialista de Mapa Energético - Ingeniero de Calibración de Motor, FEV Iberia SL, Valladolid



**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
PASCUAL BRAVO®**

Institución Universitaria Pascual Bravo

Departamento Mecánica

Tecnología en Mecánica Automotriz

Noviembre de 2023

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3. METODOLOGIA.....	6
3.1 Selección de motocicletas de prueba.....	6
3.2 Pruebas de laboratorio.....	7
3.2.1 Banco de rodillos.....	8
3.2.2 Medición de gases de escape.....	9
3.2.3 Procedimiento de medición de combustible.....	10
3.2.4 Estimación de consumo de combustible.....	11
3.2.5 Estimación de consumo de combustible por tiempo de operación de inyectores. (E1).....	11
3.2.6 Estimación por dosado estequiométrico y flujo de aire con gases ideales. (E2).....	14
4. RESULTADOS.....	16
4.1 Curva característica de los inyectores.....	18
4.2 Resultados pruebas de estado estable.....	18
4.3 Resultados pruebas dinámicas.....	22
5. CONCLUSIONES.....	27
6. REFERENCIAS.....	27

# MEDICIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENTRE FLUJÓMETRO DE ALTA PRECISIÓN Y DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN APLICADA A MOTOCICLETAS

**José David Erazo Cerón**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Grupo de Investigación GIIEN, Semillero de Investigación SIV-2R, Medellín-Colombia, [jose.erazo740@pascualbravo.edu.co](mailto:jose.erazo740@pascualbravo.edu.co)

**María Camila Jaramillo Echeverry**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Grupo de Investigación GIIEN, Semillero de Investigación SIV-2R, Medellín-Colombia, [maria.jaramillo857@pascualbravo.edu.co](mailto:maria.jaramillo857@pascualbravo.edu.co)

**Frank Alexander Ruiz Holguín**

PhD. Ingeniería Electrónica, Docente ocasional de tiempo completo, Departamento de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Grupo de Investigación GIIAM, Semillero de Investigación SIV-2R, Medellín-Colombia, [frank.ruiz@pascualbravo.edu.co](mailto:frank.ruiz@pascualbravo.edu.co)

**Javier David Londoño Echeverri**

MSc. Ingeniería Mecánica, Especialista de Mapa Energético - Ingeniero de Calibración de Motor, FEV Iberia SL, Valladolid-España, [javier.londono@pascualbravo.edu.co](mailto:javier.londono@pascualbravo.edu.co) – [londono@fev.com](mailto:londono@fev.com)

**Resumen** – El propósito de este trabajo es medir el consumo de combustible en motocicletas con sistemas de inyección electrónica de combustible (EFI). Se compararon diferentes métodos de estimación de consumo de combustible los cuales fueron: Estimación de consumo de combustible por tiempo de operación de inyectores y estimación de gasto de combustible por gasto de aire (calculado por gases ideales) y dosado estequiométrico, versus un medidor de flujo de combustible de alta precisión de efecto Coriolis. Se eligieron tres motocicletas de diferentes cilindradas y se realizaron pruebas tanto en condiciones estacionarias (a dos regímenes de giro) como en condiciones de operación dinámicas (siguiendo un patrón de conducción sobre un banco de rodillos).

Los resultados obtenidos permitirán implementar métodos de estimación no invasivos del consumo de combustible en motocicletas, lo cual es sustancial para la optimización del rendimiento y la eficiencia de estos vehículos. Además, se espera que estos resultados contribuyan al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el campo de la inyección electrónica de combustible específicamente y la industria automotriz en general.

**Palabras clave:** combustible, estimación, inyección electrónica, medición, motocicletas.

**Abstract** – The purpose of this work is to measure fuel consumption in motorcycles with electronic fuel injection systems (EFI). Different methods of estimating fuel consumption were compared, which were: Estimation of fuel consumption by time of operation of injectors and estimation of fuel expenditure by air expenditure (calculated by ideal gases) and stoichiometric dosing, versus a high-precision fuel flow meter of Coriolis effect. Three motorcycles of different displacements were chosen and tests were carried out both in stationary conditions (at two turning regimes) and in dynamic operating conditions (following a driving pattern on a roller bench).

The results obtained will allow the implement of non-invasive estimation methods of fuel consumption in motorcycles, which is substantial for optimizing the performance and efficiency of these vehicles. Furthermore, these results are expected to contribute to the development of more efficient and sustainable technologies in the field of electronic fuel injection specifically and the automotive industry in general.

**Keywords:** fuel, estimation, electronic injection, measurement, motorcycles.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El consumo de combustible en vehículos de motor es un aspecto fundamental en la evaluación de la eficiencia energética y la reducción de emisiones [1], con el fin de evaluar diferentes métodos de estimación y medición del consumo de combustible en motocicletas equipadas con inyección electrónica de combustible, se seleccionaron motocicletas de categorías de cilindraje diferentes, luego de un diseño experimental e instrumentación se midieron variables de la operación del motor y del sistema de inyección relacionadas con el consumo de combustible, además del consumo de combustible, esto mientras se realizaban pruebas de estado estable y dinámicas.

Se evaluaron dos métodos de estimación indirecta del consumo de combustible basados en variables como la velocidad del vehículo, las revoluciones del motor, el dosado estequiométrico, y el tiempo de inyección, estos métodos se compararon con los datos obtenidos de la medición directa utilizando el medidor de flujo de alta precisión.

Los resultados nos ayudaron a establecer una alternativa de estimación no invasiva para el consumo de combustible, tanto en pruebas de estado estable y dinámicas. Que pueda ser aplicado en futuros desarrollos de prototipos de sistemas de medición de variables de operación y emisiones en motocicletas, como el caso de los equipos portátiles de medición de emisiones (PEMS) [2], y en proyectos de investigación que pretendan establecer el consumo de combustible y la eficiencia energética de las motocicletas con sistemas de inyección electrónica de combustible. Todo esto debido a que las motocicletas en la actualidad son las que más alto porcentaje tienen en el parque automotor, gracias a su fácil adquisición y su relativo sostenimiento para personas que hacen uso de ellas en diferentes entornos y situaciones de conducción donde puede variar sus emisiones y su consumo de combustible generando un costo más alto o en su defecto el costo estipulado que debería generar la motocicleta de acuerdo a sus capacidades y estipulaciones del fabricante, por ende se opta por hacer esta investigación para así poder estimar de manera aproximada el consumo de combustible de las diferentes motocicletas sin importar cualquier condición de operación con equipos de bajo costo [3], permitiéndose saber cuál será uno de los métodos más eficaces para la medición del consumo de combustible y a cual podría acceder de manera un poco más fácil para la comunidad que hará uso de la misma basándose en sus bajos costos y su alta precisión.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

La medición de consumo instantáneo de combustible en vehículos ha sido un problema que se ha solventado por el desarrollo de métodos de medición y estimación directos o indirectos. En automóviles y camiones equipados con sistemas de diagnóstico abordado OBD se suele utilizar la interfaz de diagnóstico para leer el consumo instantáneo de combustible, tanto en pruebas estacionarias como en ruta [4]. Sin embargo, este método puede ser utilizado en motocicletas que cuenten con sistemas de diagnóstico cuyos protocolos de comunicación sean compatibles con el estándar OBD de segunda generación [5]. Otro método directo corresponde al uso de sensores de flujo de combustible, los cuales no son compactos y es difícil de usar en motocicletas, respecto a los métodos de medición y estimación indirectos una opción es el balance de carbonos (midiendo las emisiones de escape), lo que implica para pruebas en ruta el uso de equipos portátiles de medición de emisiones (PEMS) [6]. Equipos que son generalmente robustos y de altos costos [7].

Por otro lado, es posible utilizar estimaciones de consumo de combustible basados en condiciones de operación del motor y conociendo el dosado estequiométrico [8].

Algunos estudios han realizado mediciones directas o indirectas de consumo de combustible. Basándose en el artículo "A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles" allí se desarrolló un método de estimación precisa utilizando variables como las revoluciones del motor y la velocidad del vehículo, usando un método indirecto que consiste en grabar la duración de los pulsos de inyección [9]. También se utilizó un flujómetro de efecto Coriolis para la medición de consumo de combustible en un automóvil durante pruebas de estado estable y pruebas dinámicas [10]. De acuerdo al siguiente artículo "Development of On-Road Exhaust Emission and Fuel Consumption Models for Motorcycles and Application through Traffic Microsimulation" quienes realizaron un trabajo de investigación con un modelo de emisiones de escape y consumo de combustible en carreteras para motocicletas y se aplicaron en una micro simulación de tráfico, creando un sistema de medición a bordo para recopilar datos de conducción en carretera, incluyendo perfiles de velocidad, tiempo, emisiones de escape y consumo de combustible, utilizaron un análisis de regresión para desarrollar los modelos, los cuales mostraron una alta variación entre las emisiones/consumo de combustible y la velocidad/aceleración, luego, los modelos se aplicaron en una micro simulación de tráfico para evaluar el impacto de una estrategia de gestión del tráfico para motocicletas [11]. Los resultados mostraron que la estrategia podría mejorar el servicio en las intersecciones al reducir los tiempos de viaje, las demoras, las longitudes de las colas, el consumo de combustible y las emisiones. En otro trabajo similar, se utilizó un PEMS para la medición de velocidad, consumo de combustible y emisiones de escape, en este caso para el consumo de combustible se realizó una medición directa con un sensor de flujo, se analizó patrones de conducción que afectan el consumo de combustible, se logró determinar que el consumo de combustible es óptimo a velocidades entre 50 y 70 km/h, y que aumenta significativamente con la aceleración, se desarrolló un modelo basado en velocidad específica del vehículo para calcular el consumo de combustible, el cual mostró buenos resultados al compararse con los datos medidos [12]. En otros estudios se usaron métodos de simulación para predecir el consumo de combustible utilizando el perfil de velocidad de los vehículos [13].

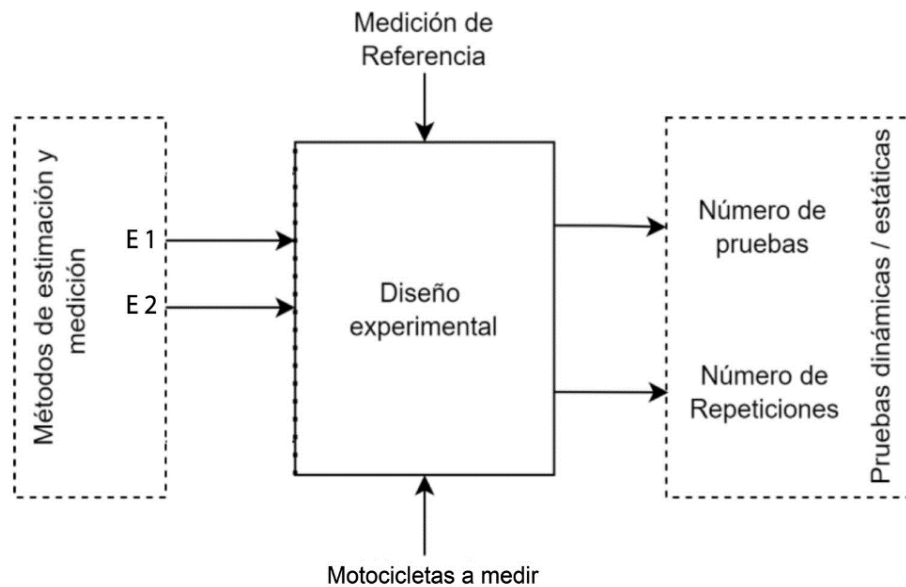
Para llegar a conclusiones más sólidas es relevante utilizar diferentes métodos con el fin de determinar el patrón de conducción más óptimo en términos de consumo de combustible, debido a que cada estudio puede tener limitaciones y los resultados pueden variar dependiendo de condiciones específicas como en las rutas utilizadas, las ciudades y sus condiciones climáticas, los diferentes vehículos utilizados, entre otras, además se puede tener diferentes perspectivas para afrontar el problema del consumo de combustible, esto permite tomar decisiones más informadas y desarrollar estrategias más efectivas para mejorar la eficiencia energética en el transporte.

Es por las razones expuestas anteriormente que en este estudio se estableció la desviación de la medición de consumo de combustible entre diferentes métodos de estimación y un flujómetro de alta precisión en motocicletas equipadas con sistema de inyección electrónica de combustible. Los resultados podrán ser utilizados para correlacionar las mediciones y estimaciones, y así contar con un método de estimación de consumo de combustible que pueda ser usado en motocicletas de manera no invasiva.

### 3. METODOLOGIA

Para determinar la desviación de diferentes métodos de estimación y medición del consumo de combustible de motocicletas EFI, respecto a la medición con flujómetro de alta precisión, se plantea una metodología por etapas.

En la figura 1, se presenta de forma esquemática las variables del proceso para establecer el diseño experimental que permite comparar cada uno de los métodos para la estimación y medición de consumo de combustible (E1, E2) respecto a la medición con flujómetro de alta precisión, además, teniendo en cuenta el número de sistemas a medir (motocicletas) y finalmente obteniendo el número de pruebas ya sean dinámicas y estáticas, y el número de repeticiones necesarias para asegurar confianza estadística de los resultados.



**Figura 1.** Esquema de la metodología para el diseño experimental.

#### 3.1 Selección de motocicletas de prueba

Considerando la gran variedad de tipologías de las motocicletas y la diversidad en cuanto al tamaño de los motores, los sistemas de alimentación, sistemas de postratamiento, sistemas de transmisión, entre otros, y además que estos están relacionados tanto con el consumo de combustible como con las emisiones de escape [14]. Se determinó seleccionar tres motocicletas de carretera equipadas con sistema de inyección electrónica de combustible (ver tabla 1). Cada una de las cuales puede ser representativa de una categoría de motocicletas según la cilindrada y su potencia desarrollada (baja, media, alta). Estas motocicletas fueron seleccionadas además teniendo en cuenta la disponibilidad de éstas en el laboratorio de motocicletas de la Institución Universitaria Pascual Bravo para las pruebas de laboratorio.

Las motocicletas utilizadas en las pruebas representativas de una categoría según la cilindrada fueron: de 125 cm<sup>3</sup> a 200 cm<sup>3</sup> por la motocicleta KTM Duke200, de 201 cm<sup>3</sup> a 500 cm<sup>3</sup> por la motocicleta Kawasaki Z250, y de 501 cm<sup>3</sup> en adelante por la Kawasaki Er6n 650.

**Tabla 1. Motocicletas de pruebas**

Motocicleta	Marca	Referencia	Modelo	Cilindraje (cm <sup>3</sup> )	Torque máx. (Nm)	Potencia máx. (Hp)
M1	KTM	Duke 200	2019	199.5	19.5 @ 8000	25.5 @ 10000
M2	Kawasaki	Z250	2019	249	21 @ 8200	31.5 @ 11000
M3	Kawasaki	Er6n	2019	649	66 @ 7000	72 @ 8500

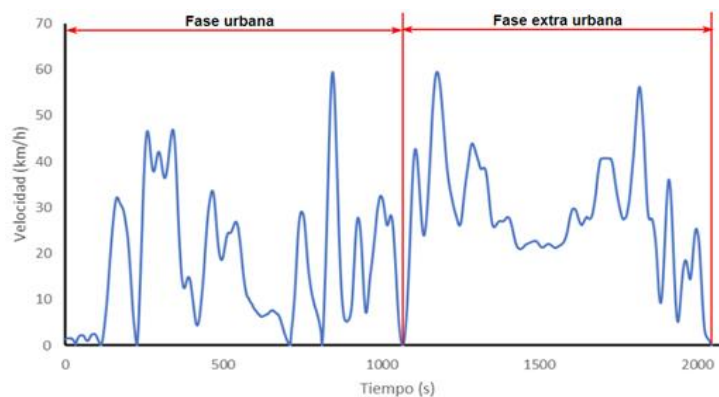
### 3.2 Pruebas de laboratorio.

Típicamente las pruebas de laboratorio en motores y en vehículos son de dos tipos: Las primeras corresponden a las pruebas de estado estable o a revoluciones constantes, en estas se sostiene una velocidad constante durante un período prolongado con el propósito de evaluar cómo el motor o el vehículo responden a diversas cargas y situaciones operativas. Estos ensayos resultan fundamentales para la evaluación del rendimiento y la eficiencia de los motores y vehículos., lo que implica que para estas pruebas no se requieren equipos con altas frecuencias de muestreo [15]. Sin embargo, son poco representativas de la transitoriedad a la cual están sometidos los vehículos en la conducción en carretera. El segundo tipo de prueba corresponden a las dinámicas, en estas se introducen variaciones rápidas tanto en la velocidad como en las cargas, con el fin de examinar cómo el motor o vehículo se comporta en condiciones de conducción más cercanas a la realidad. Este tipo de pruebas se emplean ampliamente en el desarrollo de valores de emisión y en procesos de homologación. Sin embargo, implica contar con equipos que permitan monitorear las variables de interés en tiempo real o a altas frecuencias de muestreo.

Teniendo en consideración lo anterior y con el objeto de presentar un panorama general en cuanto a la medición y estimación de consumo de combustible, en este trabajo cada motocicleta fue sometida a pruebas dinámicas y de estado estable.

Se establecieron para las pruebas de estado estable dos (2) regímenes de giro (3000 rpm y 4000 rpm), La selección de estos regímenes se realizó considerando que el banco de rodillos utilizado no era para motocicletas sino para automóviles, por lo tanto, se decidió, por razones de seguridad, no llevar las motocicletas al límite teniendo en cuenta su potencia máxima. Además, es importante destacar que, en la conducción típica en entornos urbanos, rara vez se alcanzan promedios de RPM por encima de 4000. Para el caso de las pruebas dinámicas, se siguió la parte urbana del ciclo de motocicletas del valle de Aburrá ciclo [16](ver figura 2) [17].

Esta sección tiene la particularidad de contar con las velocidades más altas del ciclo (59.47 km/h), una duración de hasta 16.28 min y una distancia recorrida de 7.77 km. Se estableció que cada motocicleta sería probada así: a 3000 RPM tres réplicas, a 4000 RPM tres réplicas y ciclo AMVA [18] tres réplicas, para un total de 9 pruebas por motocicleta y 27 en total para las tres motocicletas.



**Figura 2.** Ciclo AMVA para motocicletas.

### 3.2.1 Banco de rodillos.

Un banco de rodillos es un dispositivo que se utiliza para medir la fuerza, el par o la potencia en vehículos. Aunque también son utilizados para pruebas de emisiones y estimación de consumo de combustible. Este equipo utilizado en pruebas que generalmente se denominan de laboratorio permite además la reproducción de ciclos de conducción. En las pruebas de laboratorio de estado estable y dinámicas se usó un dinamómetro de chasis marca Mustang MD-150 (ver Tabla 2) ubicado en el bloque 4, laboratorio de diagnóstico automotriz (LIDA) de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas del dinamómetro

Parámetro	Valor
Potencia máxima	1,200 hp
absorción máxima	625 hp
dispositivo de carga	Amortiguador de corriente de Foucault refrigerado por aire
Inercia	630 lb Base de inercia mecánica
Velocidad máxima prueba	264 km/h (2WD)

En la figura 3, se evidencia las respectivas pruebas de laboratorio llevadas a cabo:



M1



M2



M3

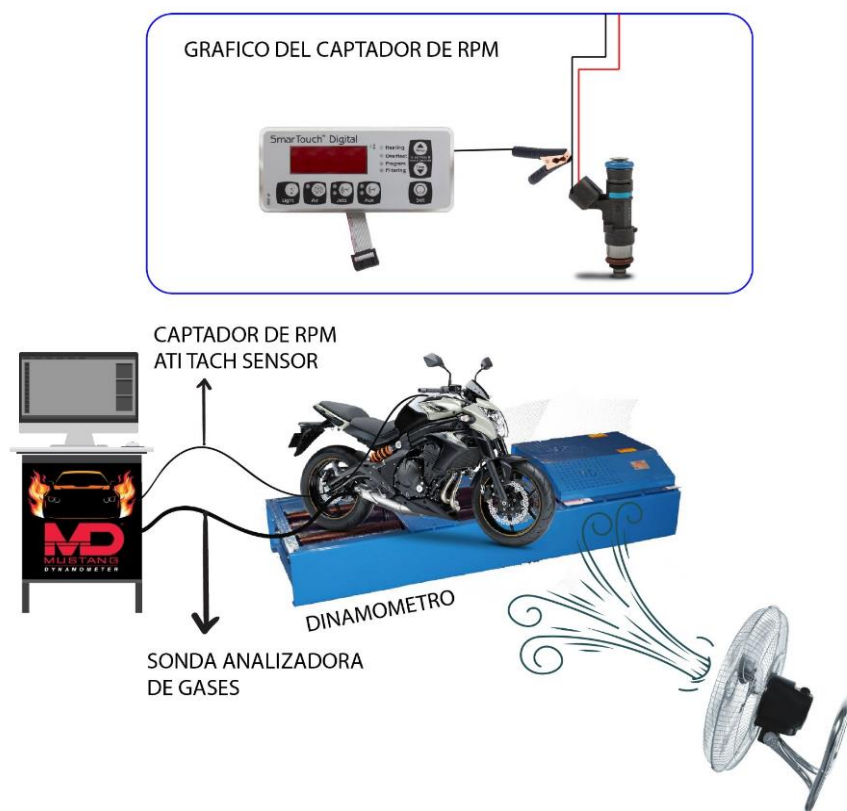
**Figura 3.** Montaje de las motocicletas de prueba.

### 3.2.2 Medición de gases de escape.

Un analizador de gases de escape es un instrumento utilizado para medir en el escape de un vehículo, la composición de los gases producidos por el motor y emitidos a la atmósfera. La medición de emisión de gases contaminantes se realizó con un analizador de gases MD-Gas-5C (ver Tabla 3). Los datos de emisiones son almacenados en el programa del banco de rodillos con una frecuencia de 2 Hz, que además de almacenar los datos de emisiones, registra la velocidad del vehículo, las RPM, el par y la potencia generada por el motor. En la Figura 4, se presenta un esquema de la instalación experimental de la motocicleta en el banco de rodillos, la toma de los gases de escape y la conexión de la señal de RPM.

**Tabla 3.** Especificaciones analizador de gases

Especie de combustión	Rango de medición	Técnica de medición
CO	0%-14% V/V	NDIR
CO2	0%-18% V/V	NDIR
HC	0-10000 RPM	NDIR
O2	0%-25% V/V	ELECTROQUÍMICO



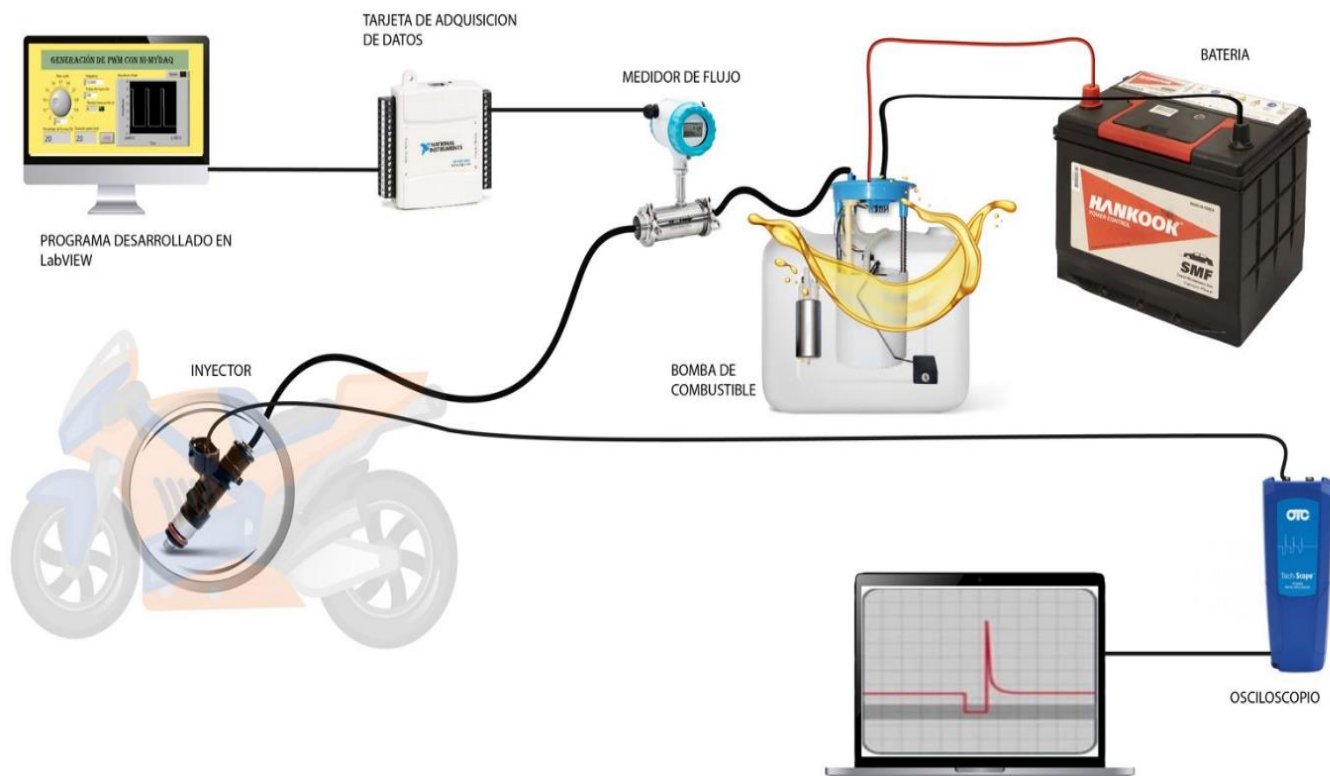
**Figura 4.** Montaje de motocicleta en banco de rodillos y conexión de analizador de gases y señal de RPM.

### 3.2.3 Procedimiento de medición de combustible.

La medición directa de consumo de combustible se realizó con un medidor de flujo Coriolis marca Siemens y referencia SITRANS FCT030 Y SITRANS FC MASS2100 (ver Tabla 4). Este equipo fue instalado en la línea de combustible entre la bomba de gasolina y el riel de inyección (ver figura 5). Está conectado a un sistema de adquisición de datos que está constituido por el sensor de flujo, una tarjeta de adquisición de datos, un computador y un programa desarrollado en LabVIEW para almacenar los datos con una frecuencia de 10 Hz.

**Tabla 4.** Especificaciones de equipo SIEMENS SITRANS FCT030 Y SITRANS FC MASS2100

Descripción	Operación	Rango
Temperatura ambiente	Transmisor sin display	De -40 a +60 [de -40 a +140]
Temperatura	Transmisor con display	De -20 a +60 [de -4 a +140]*
Clase Climática		DIN 60721-3-4
Humedad relativa [%]		95
Tensión de alimentación		De 100 a 240 V AC, de 47 a 63 Hz 30 VA
Grado de contaminación		2[1] [p2]



**Figura 5.** Esquema de conexiones de equipo de medición Siemens y de Equipo de adquisición de datos.

### 3.2.4 Estimación de consumo de combustible.

En la Tabla 5, se presenta un cuadro de resumen de los métodos de estimación de consumo de combustible. A continuación, se describe con detalle el desarrollo de cada uno de los métodos de estimación.

**Tabla 5.** métodos de estimación de consumo de combustible

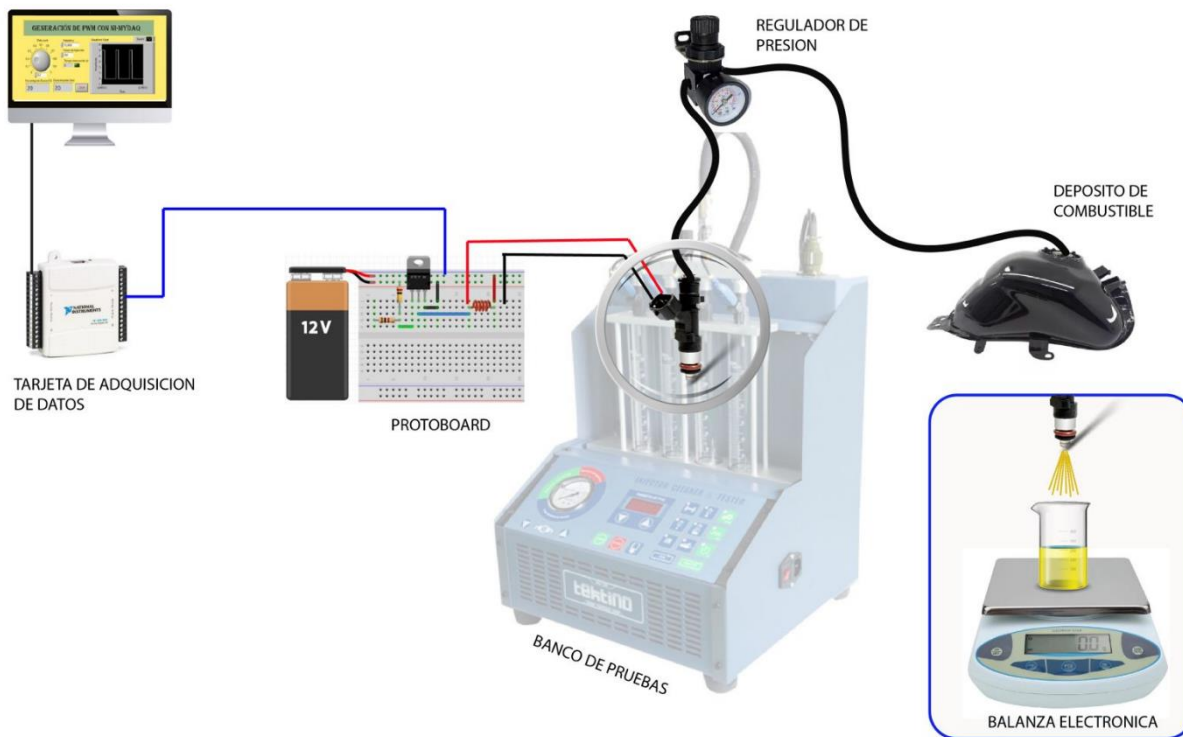
Método.	Nombre del método
E1	Estimación de consumo de combustible por tiempo de operación de inyectores.
E2	Estimación de gasto de combustible por gasto de aire (gases ideales) y dosado estequiométrico.

### 3.2.5 Estimación de consumo de combustible por tiempo de operación de inyectores. (E1)

En este contexto, se presenta un método detallado para estimar el consumo de combustible por tiempo de operación de los inyectores. Este proceso se basa en la conexión adecuada de los componentes, la generación de una señal de activación del inductor del inyector, la medición precisa de la masa o volumen inyectada.

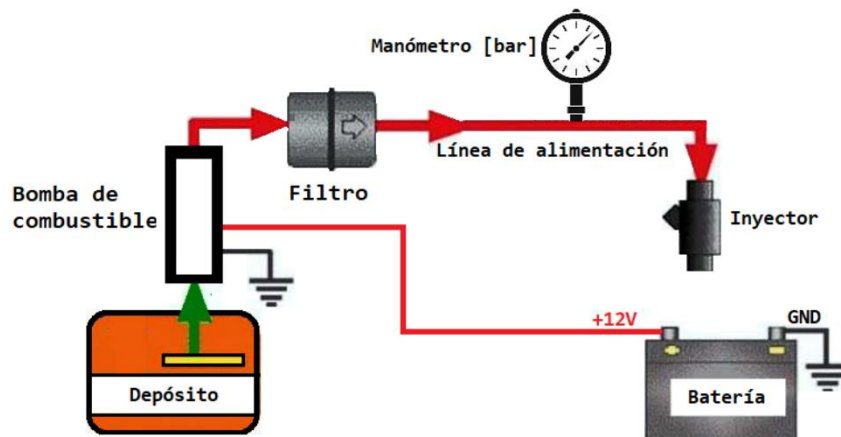
Este método de estimación en la medición de consumo de combustible tiene algunas ventajas desde el punto de vista de la implementación de hardware y sensórica adicional respecto a otros métodos de medición, ya que no se requiere componentes adicionales en su implementación. La idea es realizar una caracterización previa de los inyectores siguiendo la siguiente metodología:

- Realizar la conexión de los inyectores, mangueras, manómetro, bomba de combustible según nos muestra la figura 6.



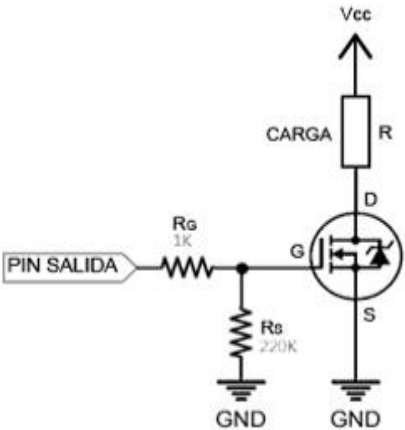
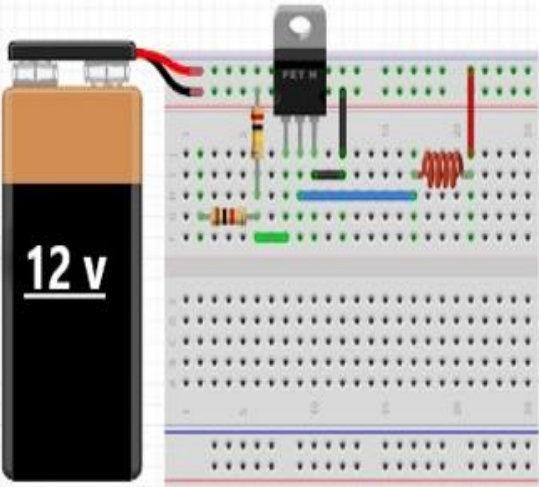
**Figura 6.** Conexión del sistema electrónico para caracterización de los inyectores.

- Se conecta el inyector, las mangueras, y la bomba de combustible (como se ilustra en la figura 7). Asegúrese de que la bobina del inyector esté conectada a un sistema electrónico conmutado, Este sistema electrónico debe conmutar la referencia (GND) para activar el inductor del inyector.



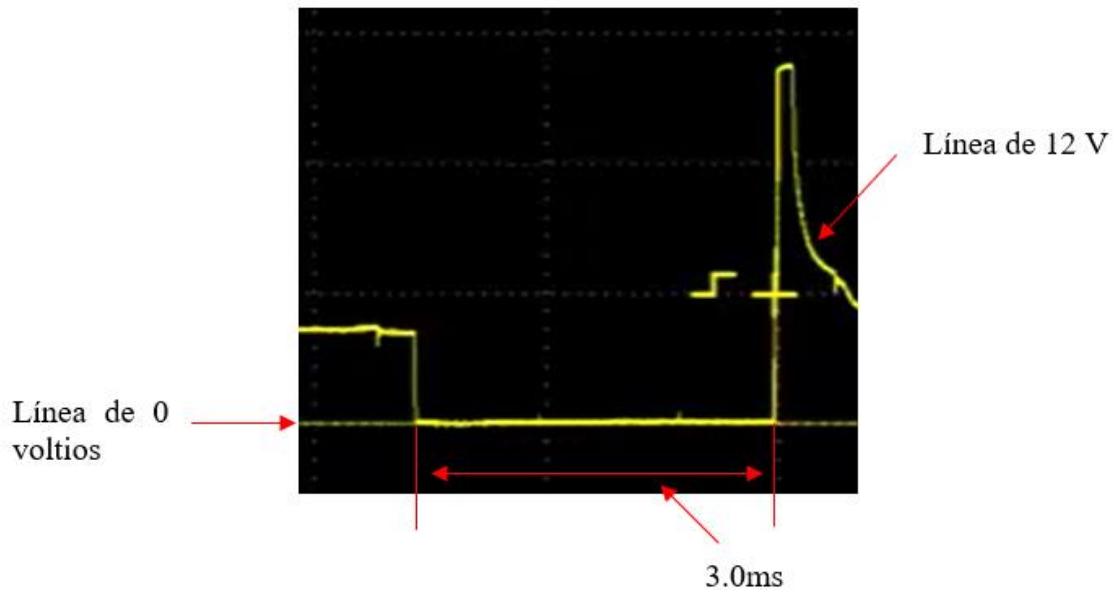
**Figura 7.** Conexión del sistema de suministro de combustible.

- Se genera una señal de entrada al sistema de conmutación electrónica utilizando un sistema de generación y modulación de ancho de pulsos (PWM). Esto se puede lograr mediante el uso de un microcontrolador, un sistema de adquisición de datos (DAQ), osciladores astables u otros dispositivos similares.

Sistema de control para la activación de inyectores mosfet canal N IRF540	Circuito Esquemático ( $R_G=1K$ , $R_s=200K$ , $R_{carga}=\text{inyector}$ )
	

**Figura 8.** Circuito en board y conexión de los elementos del sistema eléctrico.

- Se verificó que no hubiera fugas en la línea de suministro de combustible.
- Se programó el software de conmutación de los inyectores a razón de la frecuencia deseada, número de pulsos y tiempo de apertura del inyector por cada pulso.
- Se midió la masa o volumen inyectado por el inyector, para esto, se puede utilizar un recipiente, para ser pesado en una balanza electrónica de precisión. Esta medida es la cantidad inyectada en el número total de pulsos programados.
- Se calculó el peso individual de cada pulso dividiendo el peso total entre la cantidad de pulsos programados.
- Se construyó una gráfica que relacione el tiempo de apertura del inyector [ms] con la cantidad de combustible fumigado por cada inyector en [mg].
- Se obtiene una regresión lineal de la gráfica construida, donde la pendiente de la línea recta será el caudal del inyector.
- Se realizó una captura de video de la señal de los inyectores para cada modo de operación, y tomando una frecuencia de muestreo de 1Hz, se obtuvieron los tiempos de inyección en cada prueba. Con los tiempos de inyección, la velocidad del motor y la curva característica del inyector, se podrá calcular el consumo de combustible en cada instante.



**Figura 9.** Grafica de inyección

Ecuación para calcular los consumos de combustible basado en la  $f$ [Hz], velocidad [rpm], masa inyectada [mg] según la caracterización del inyector.

$$\dot{m}_c: \left( \frac{\#de\ Cilindros * \dot{m}_c\ iny * rpm * 0.5}{60} \right) \text{ Ecuación 1}$$

Para esta ecuación, se busca un flujo másico de combustible ( $m_c$ ) en mg/s, número de cilindros del motor (#de cilindros), masa de combustible inyectada en cada inyección ( $m_c$  iny) esta fue calculado para cada motocicleta según el tiempo de inyección y la caracterización de los inyectores, revoluciones del motor (rpm), 0.5 que son las vueltas que da el cigüeñal en un motor 4 tiempos donde en un ciclo se dan dos vueltas, y dividido por 60s.

- Conociendo la curva característica de cada inyector y evaluando los tiempos de apertura por el método de captura de pantalla en los videos, se puede estimar la medición de combustible de las motocicletas. Esta información es de gran relevancia para el monitoreo y control del consumo de combustible, así como para la optimización de la eficiencia energética y la reducción de costos.

### 3.2.6 Estimación por dosado estequiométrico y flujo de aire con gases ideales. (E2)

Se basa en el uso de modelos matemáticos y principios termodinámicos para calcular la cantidad de combustible y aire requeridos para lograr una mezcla estequiométrica ideal en un proceso de combustión.

El dosado estequiométrico implica determinar la proporción adecuada entre el combustible y el aire para lograr una combustión completa y eficiente, esto varía según el tipo de combustible utilizado. Por ejemplo, la gasolina requiere una proporción de 14,7 partes de aire por una parte de combustible, mientras que el gasoil necesita 14,5 partes de aire por una parte de combustible.

El flujo de aire con gases ideales se refiere al movimiento del aire en un sistema de combustión, asumiendo que el aire se comporta de manera ideal según la ley de los gases ideales. La estimación por dosado estequiométrico y flujo de aire con gases ideales utiliza principios matemáticos y de la termodinámica para calcular la cantidad de aire necesaria para una cantidad determinada de combustible, teniendo en cuenta la relación estequiométrica ideal y las propiedades del aire como gas ideal.

Basándonos en las RPM del motor y las características técnicas individuales de cada motocicleta, se calculó el caudal de aire de admisión utilizando la ecuación 2.

$$\dot{m}_c: \left( \frac{P_{atm} * V_T * rpm * n_v * pm}{R * T * 2} \right) \text{ Ecuación 2}$$

$P_{atm}^{kpa}$ : Presión atmosférica.

$V_T(m^3)$ : Volumen total.

$n_v$ : rendimiento volumétrico.

$R \left( \frac{kpa * m^3}{kmol * K} \right)$ : Es una constante.

$Pm (kg/kmol)$ : Peso molecular.

$T(K)$ : Temperatura.

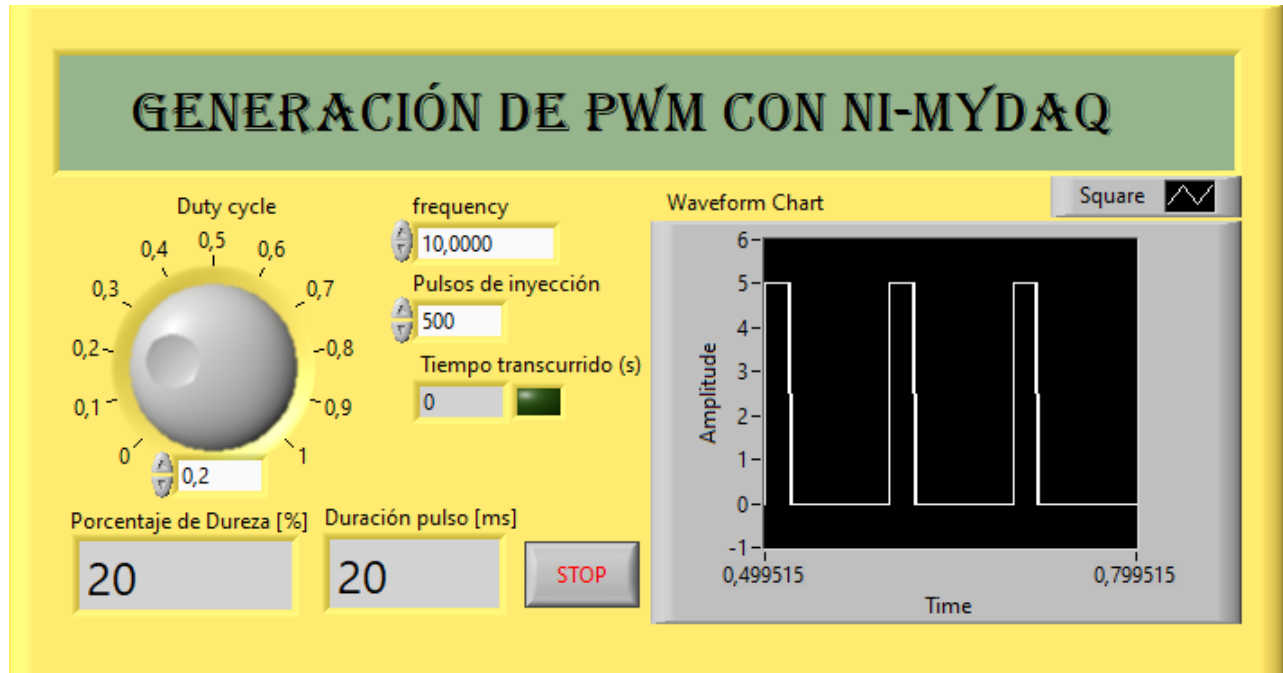
Para este fin, se considera un rendimiento volumétrico de 1, temperatura promedio de Medellín en de 293 K, una presión atmosférica de Medellín 1024 kPa, y 0.287 kpa.m<sup>3</sup>/kmol.K como constante del aire y peso molecular del aire 28.97 kg/kmol [19].

Se calculó la cantidad de combustible inyectado empleando la ecuación 3, teniendo en cuenta una proporción estequiométrica de 14.59.

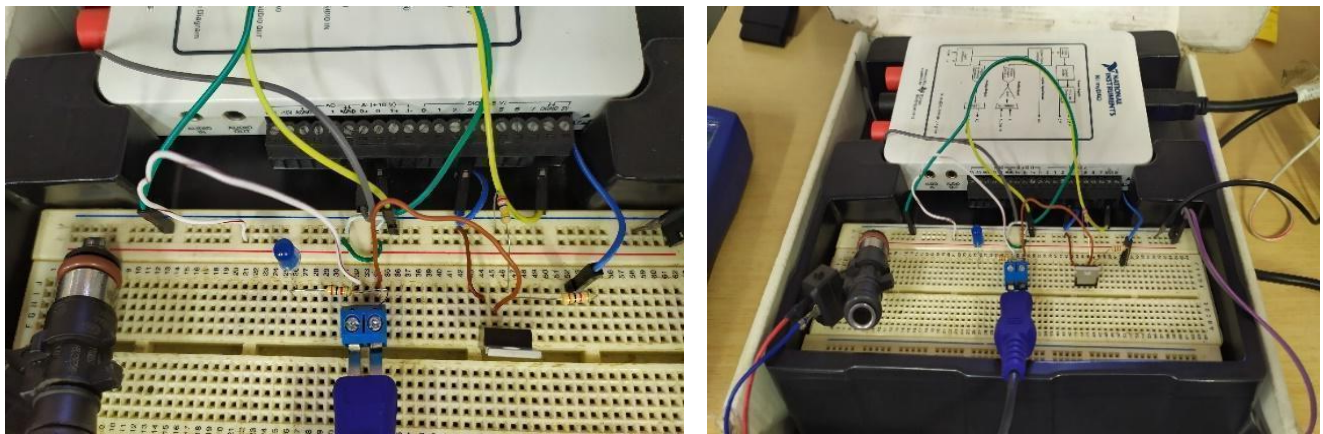
$$\dot{m}_c: \left( \frac{m_a}{\text{Dosado Estequiométrico}} \right) \text{ Ecuación 3}$$

#### 4. RESULTADOS.

Después de conocer la curva característica en evaluación y midiendo sus tiempos de apertura se pudo estimar el consumo de combustible de las motocicletas, en la figura 9, se muestra el software LabView desarrollado para realizar la caracterización, y en la figura 10, la instalación del módulo de adquisición de datos NI-myDAQ y un circuito electrónico basado en transistores.



**Figura 10.** Interfaz de control diseñada en LabVIEW



**Figura 11.** Circuito de conmutación controlada de los inyectores.

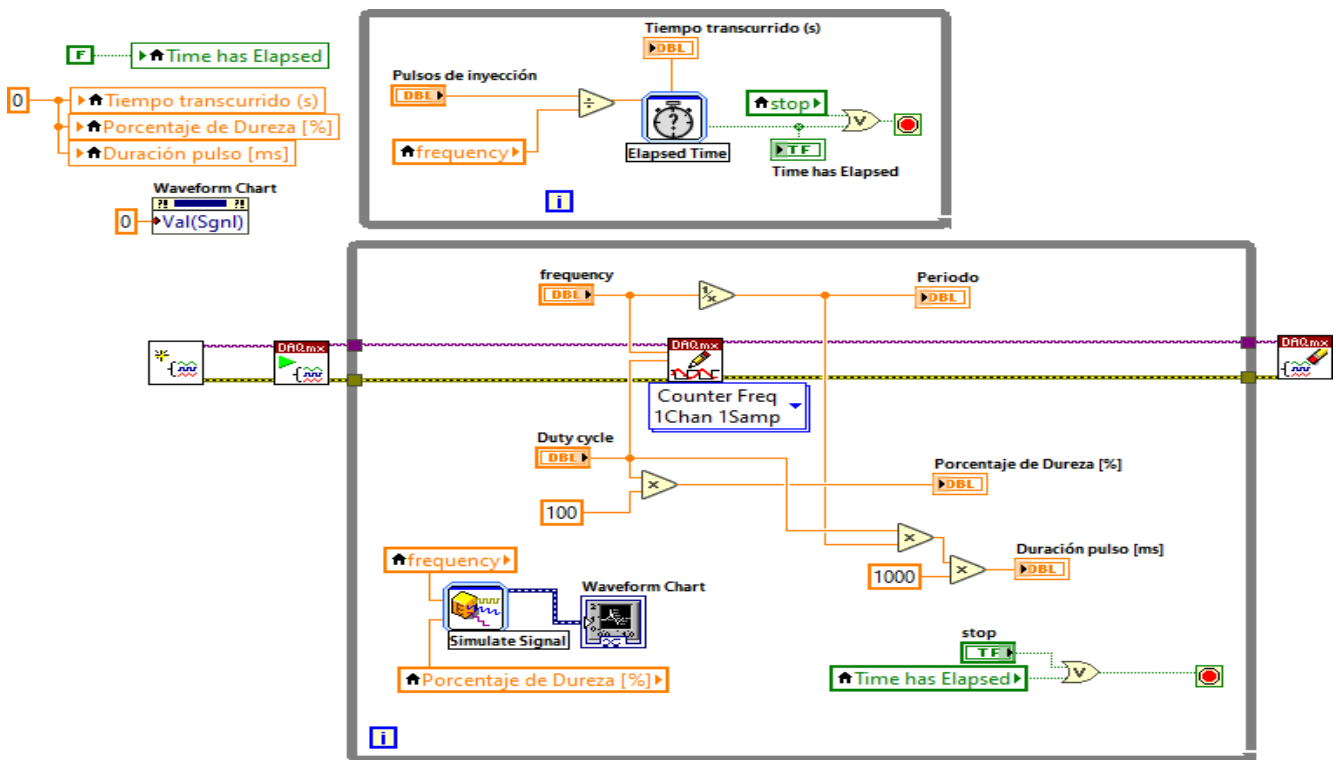


Figura 12. Código de la Interfaz de control diseñada en Labview

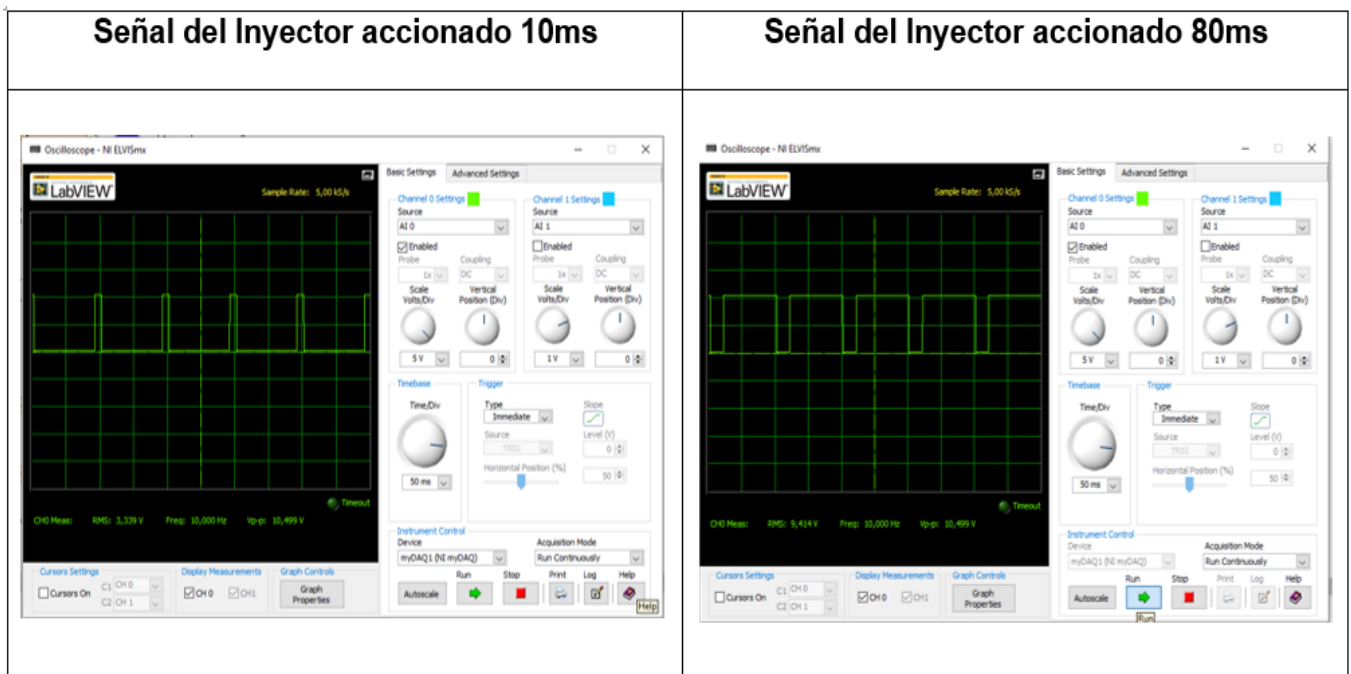
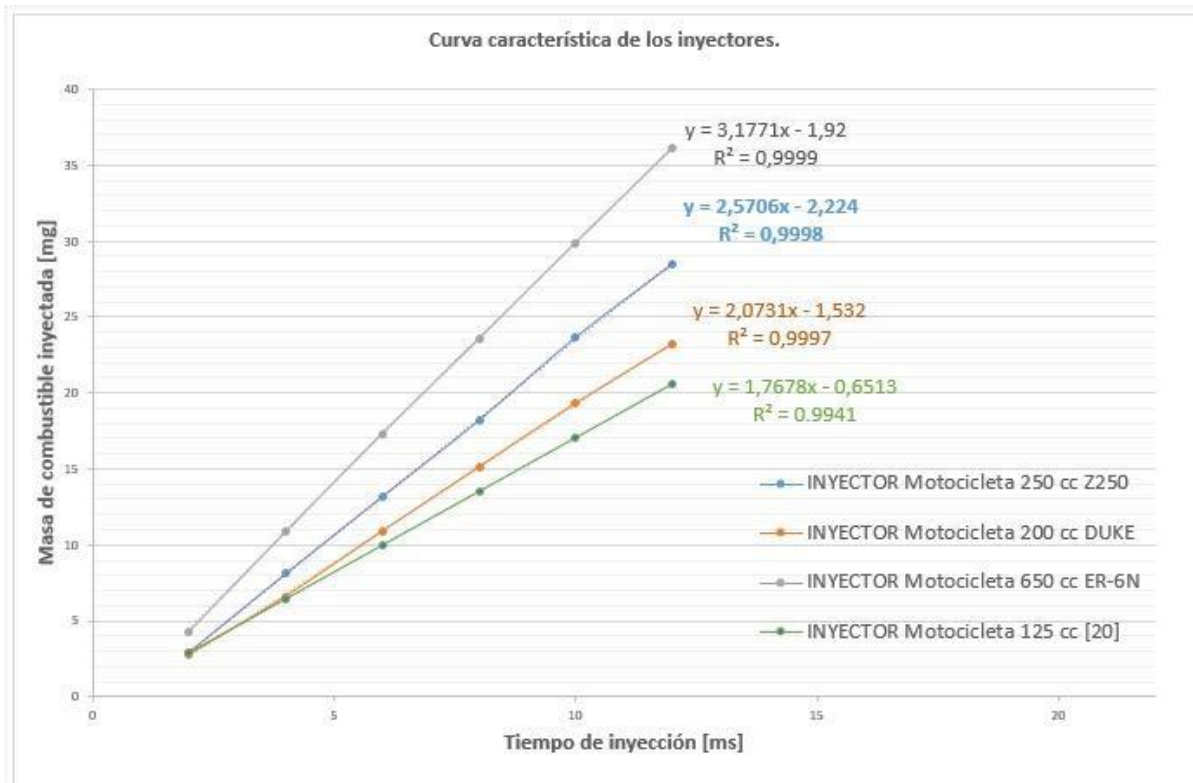


Figura 13. señal de los inyectores accionados a 10 ms y 80ms.

## 4.1 Curva característica de los inyectores.

Luego de realizar las diferentes pruebas como lo fueron estáticas y dinámicas, por otra parte el uso de la tarjeta de adquisición de datos y del programa LabVIEW para poder observar la señal del inyector al momento de hacer su caracterización y tomando en cuenta el peso del combustible inyectado en las diferentes operaciones de trabajo se pudo sacar esta grafica donde se reflejan los diferentes inyectores incluyendo el de comparación del artículo “A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles” que en su momento desarrollo la misma investigación.



**Figura 14.** Curvas características de los inyectores de las motocicletas z250, duke 200, Er6n, en comparación con Vespa Liberty 3Vie 125 cm<sup>3</sup> tomada del estudio *A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles* [20]

## 4.2 Resultados pruebas de estado estable.

Las imágenes muestran el consolidado de las pruebas de consumo de combustible instantáneo a 4000 rpm y otra a 3000 rpm, se puede visualizar las estimaciones realizadas (E1 y E2) en comparación con la medición de referencia (Ref).

En la prueba a 4000 rpm podemos visualizar que en la motocicleta M1 la prueba con resultados más cercanos a la prueba de referencia es el método E1, en la motocicleta M2 es el método teórico E2, y por último en la motocicleta M3 es el método E1.

En los resultados de consumo de combustible a 3000 rpm en la motocicleta M1 visualizamos que es más cercana el método E1, en M2 el método E2, y por último en M3 el método E1.

Consumo de combustible instantaneo a 4000 rpm Consumo de combustible instantaneo a 3000 rpm

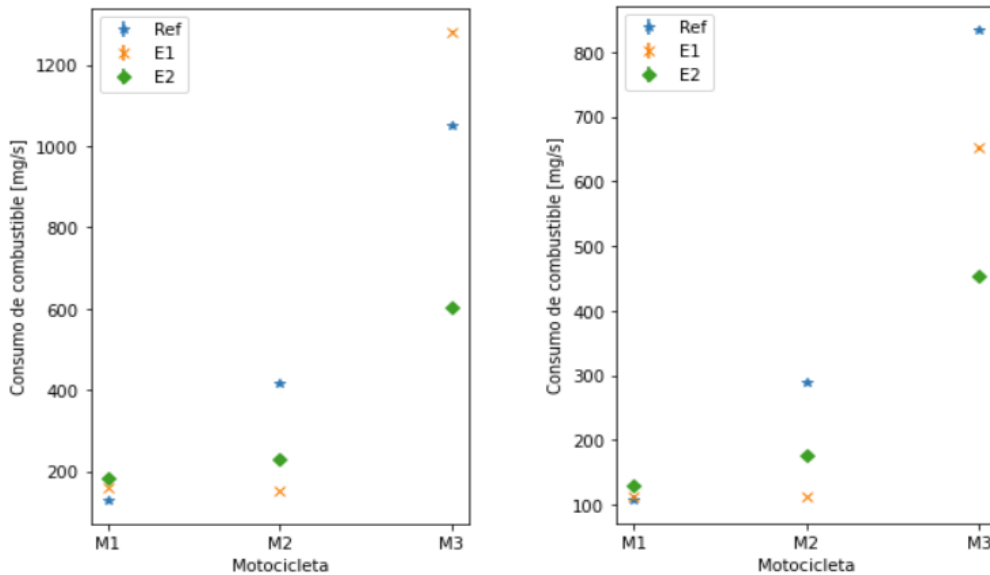


Figura 15. Resultados consolidados de las pruebas de estado estable.

En las siguientes imágenes podemos analizar los resultados de las pruebas de estado estable de manera individual para cada motocicleta.

En la figura 16, los resultados a 4000 rpm nos muestran que en la motocicleta M3 el resultado más cercano a la prueba de referencia es el método E1 además es el resultado que indica mayor consumo de combustible

Promedio de velocidad del motor y consumo de combustible M3 a 4000 RPM

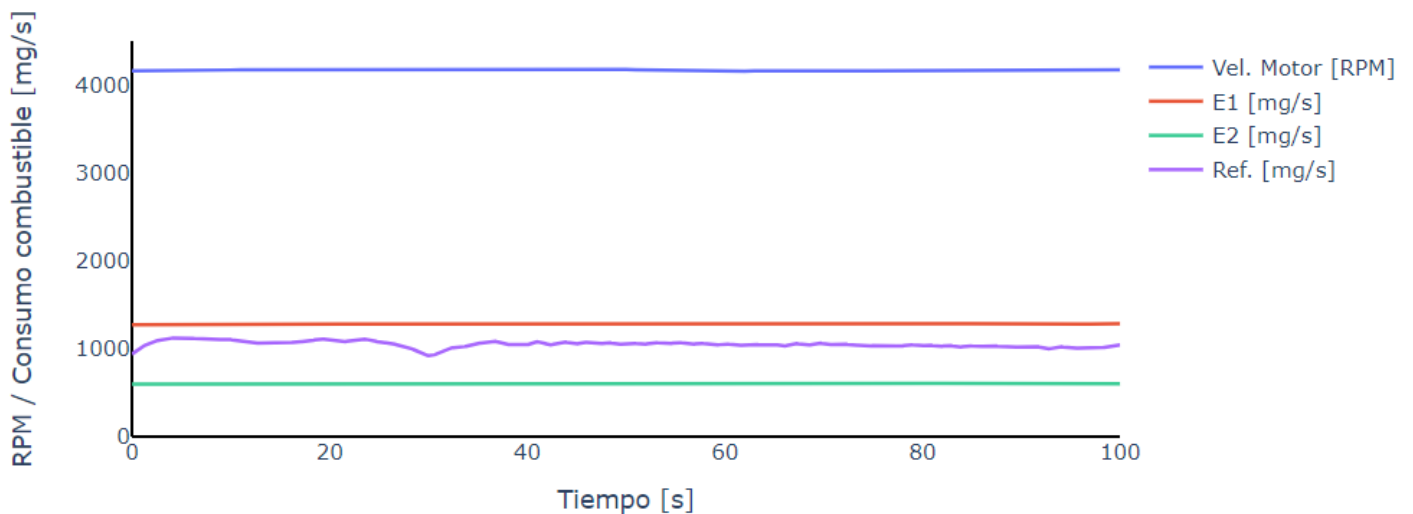
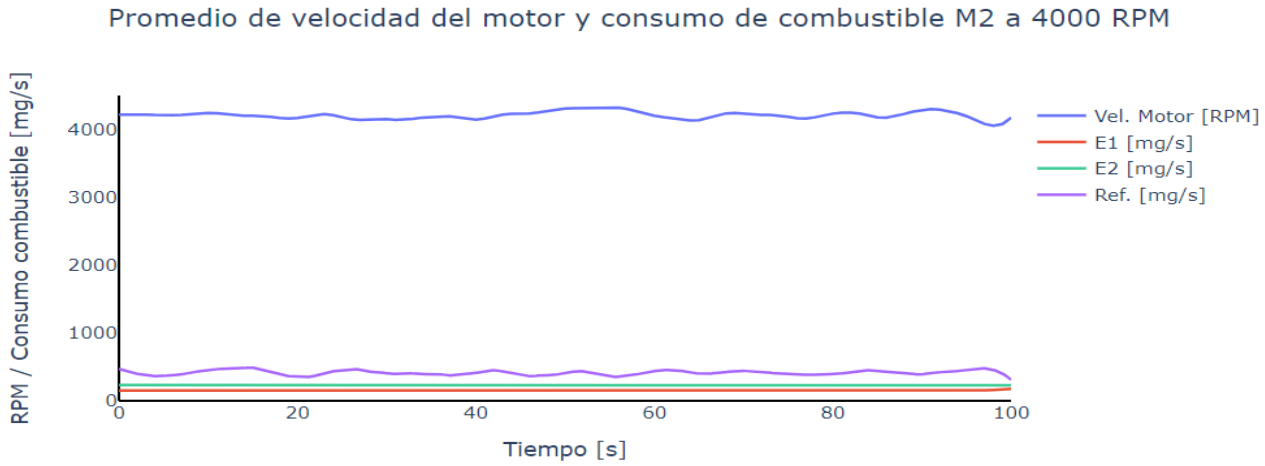


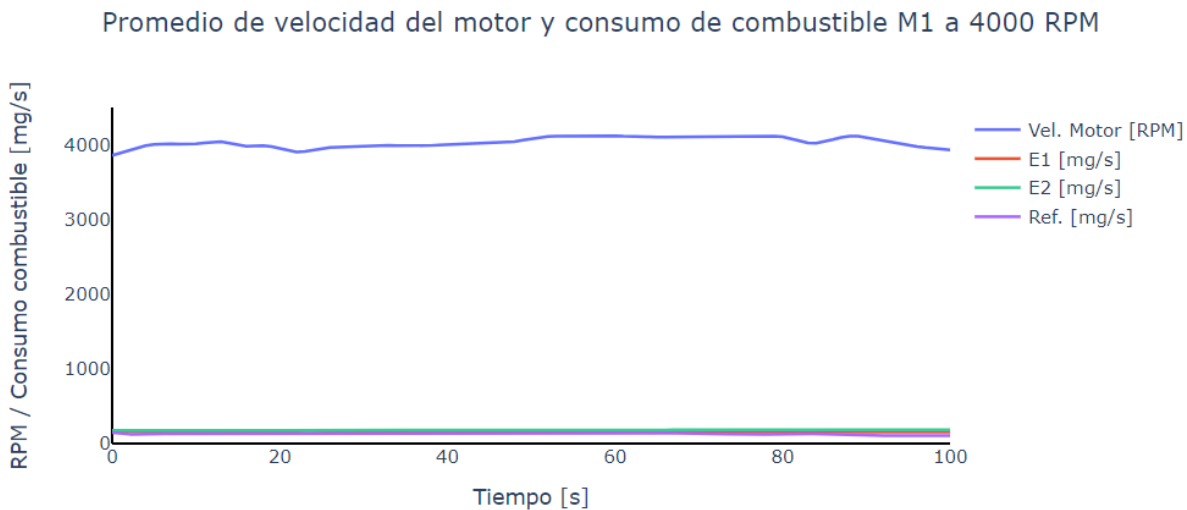
Figura 16. Resultados de las pruebas en la motocicleta Er6n a 4000 rpm.

En la figura 17, se muestra las pruebas a 4000 rpm. En la motocicleta M2 se visualiza mayor consumo de combustible en la prueba de referencia y la más cercana a esta es la prueba que usa el método E2.



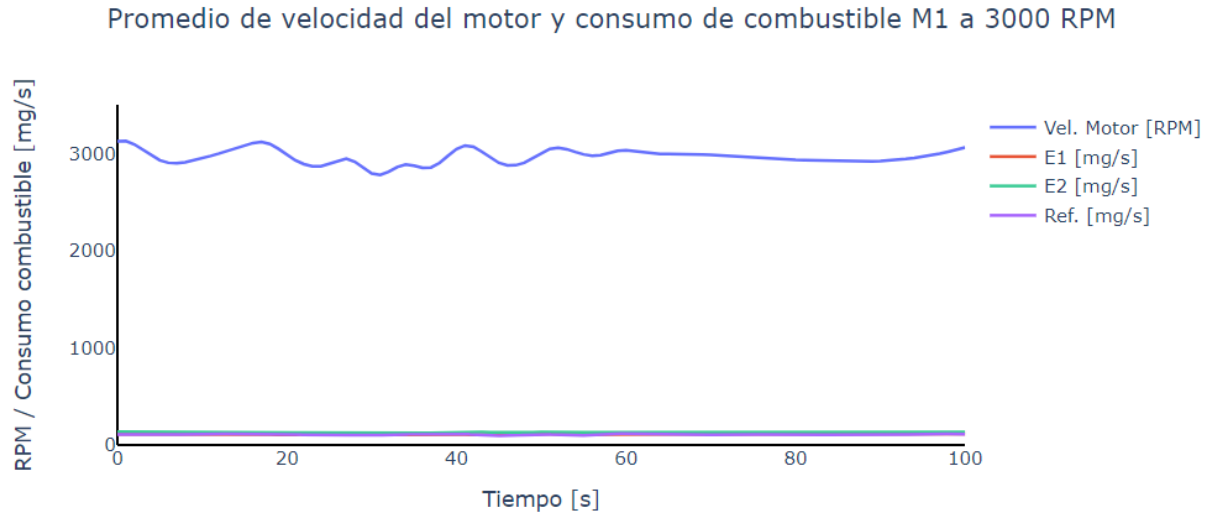
**Figura 17.** Resultados de las pruebas de estado estable a 4000 rpm en la motocicleta Z 250.

En la figura 18, se visualiza que en la motocicleta M1 a 4000 rpm, los resultados de las 3 pruebas son similares, estando más cerca de la prueba de referencia la prueba realizada usando el método E1.



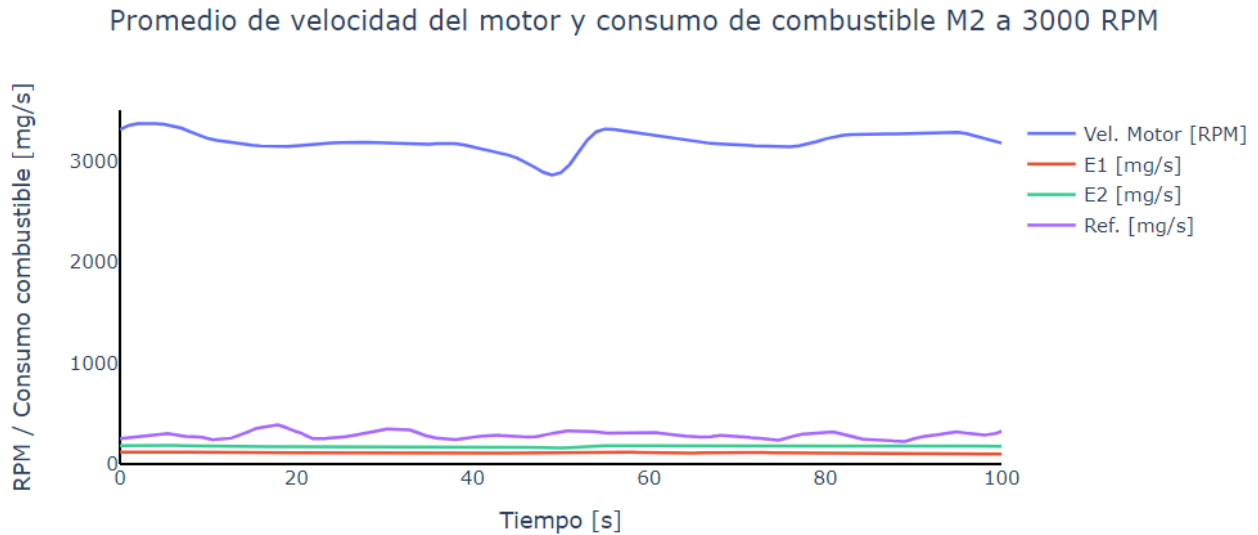
**Figura 18.** Resultados de las pruebas de estado estable en la motocicleta Duke 200.

En la figura 19, en la motocicleta M1 a 3000 rpm, los resultados son similares, acercándose más a la prueba de referencia la prueba que usa el método E1.



**Figura 19.** Resultados de las pruebas de estado estable a 3000 rpm en la motocicleta Duke 200.

En la figura 20, se muestra los resultados en la motocicleta M2 a 3000 rpm, se visualiza que la prueba de referencia es la que muestra más consumo de combustible y tiene proximidad con la prueba que usa el método E2.



**Figura 20.** Resultados de las pruebas de estado estable a 3000 rpm en la motocicleta Z250.

En la figura 21, los resultados en la motocicleta M3 muestran mayor consumo de combustible en la prueba de referencia y proximidad con la prueba que usa el método E1.

### Promedio de velocidad del motor y consumo de combustible M3 a 3000 RPM

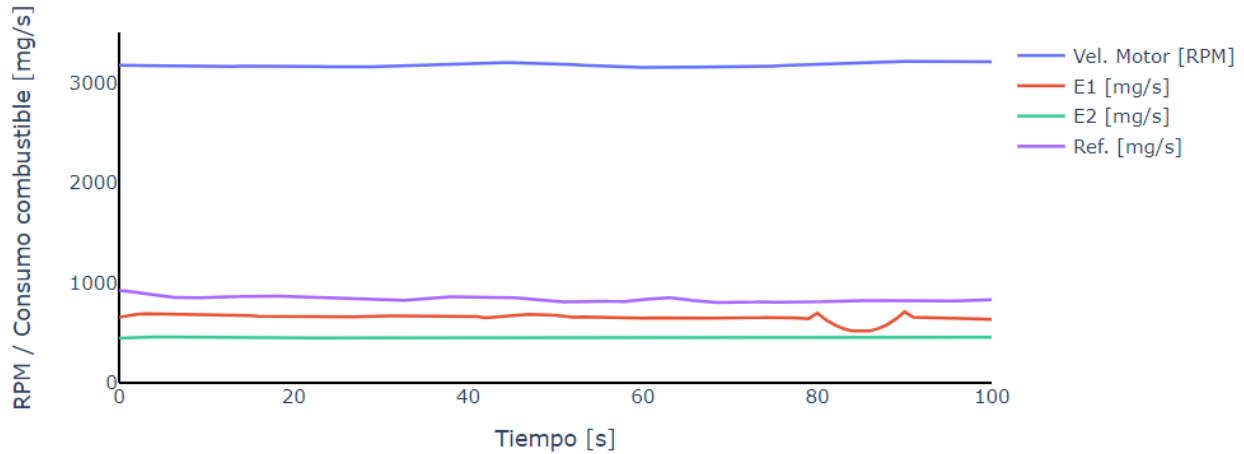


Figura 21. Resultados de las pruebas de estado estable a 3000 rpm en la motocicleta Er6n.

### 4.3 Resultados pruebas dinámicas

En las pruebas dinámicas se utiliza un rango de tiempo más extenso, en la figura 22, se visualiza que las tres pruebas tienen el mismo patrón, el método teórico E2 es la que más consumo de combustible nos muestra, y la prueba de referencia tiene proximidad con el método E1.

### Velocidad y consumo de combustible M1 en prueba 1

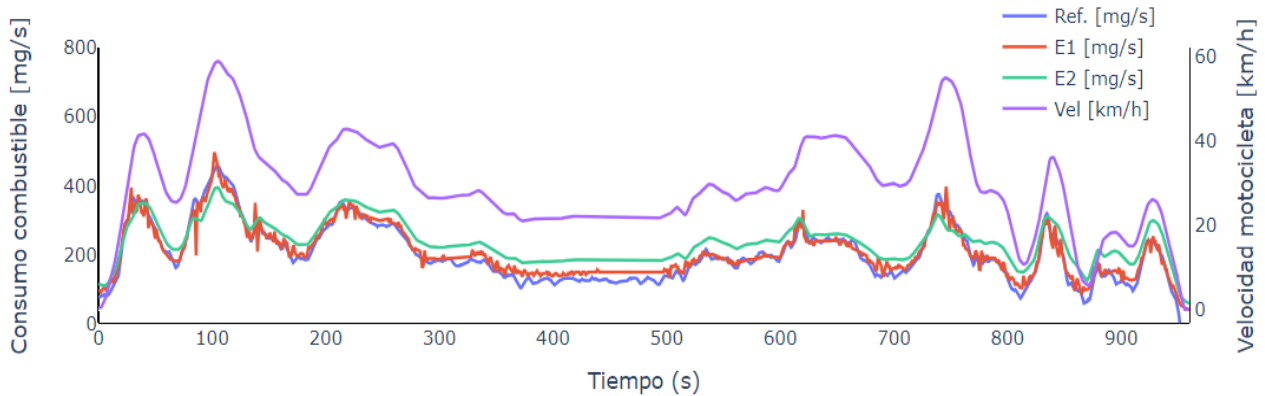


Figura 22. Prueba dinámica en Duke 200 P1

En la figura 23, se visualiza un resultado similar a la figura 22, donde la prueba de referencia nos muestra menor consumo de combustible y con una medida más cercana a el método E1.

Velocidad y consumo de combustible M1 en prueba 2

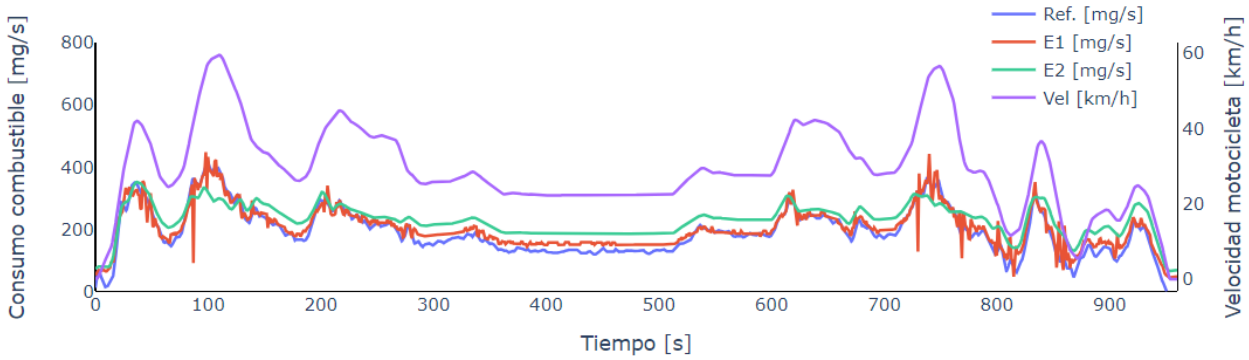


Figura 23. Prueba dinámica en Duke 200 P2

En la figura 24, la prueba sigue mostrando menor consumo de combustible usando el método de referencia. La prueba que más se acerca a la de referencia es la que usa el método E1.

Velocidad y consumo de combustible M1 en prueba 3

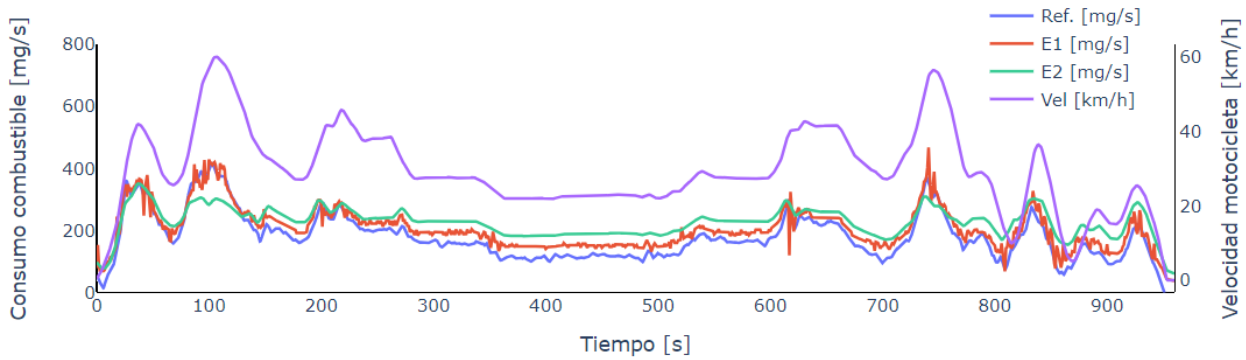


Figura 24. Prueba dinámica en Duke 200 P3

En la figura 25, se hacen pruebas dinámicas a la motocicleta M2 donde se ve la prueba de referencia muestra mayor consumo de combustible. La prueba que más se acerca a la de referencia es la que usa el método E2.

Velocidad y consumo de combustible M2 en prueba 1

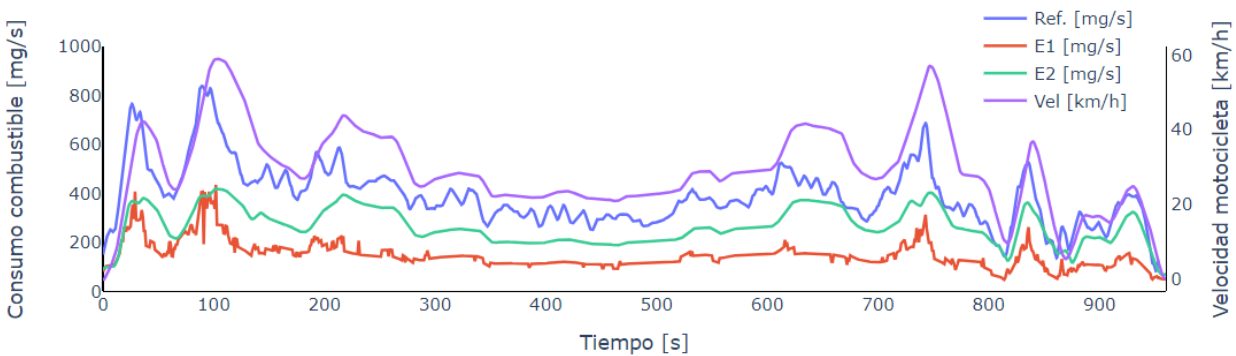
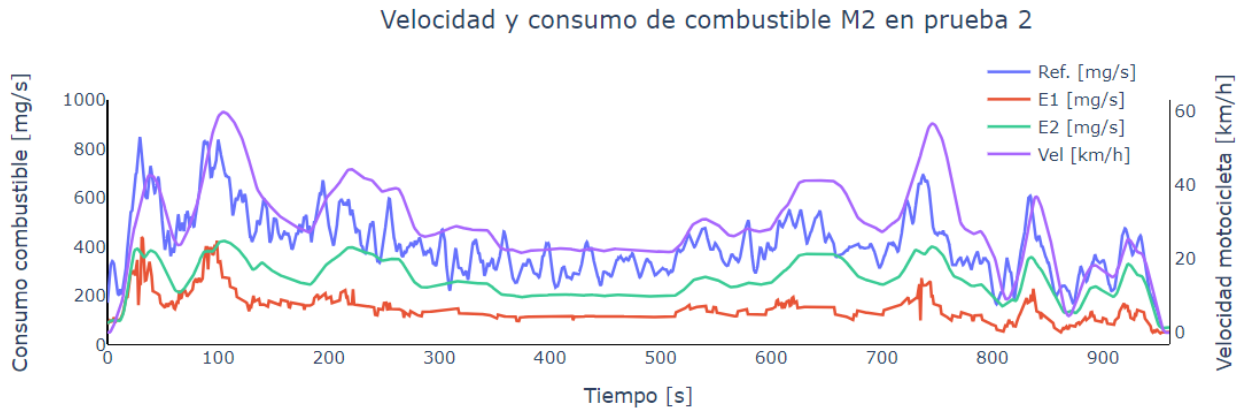


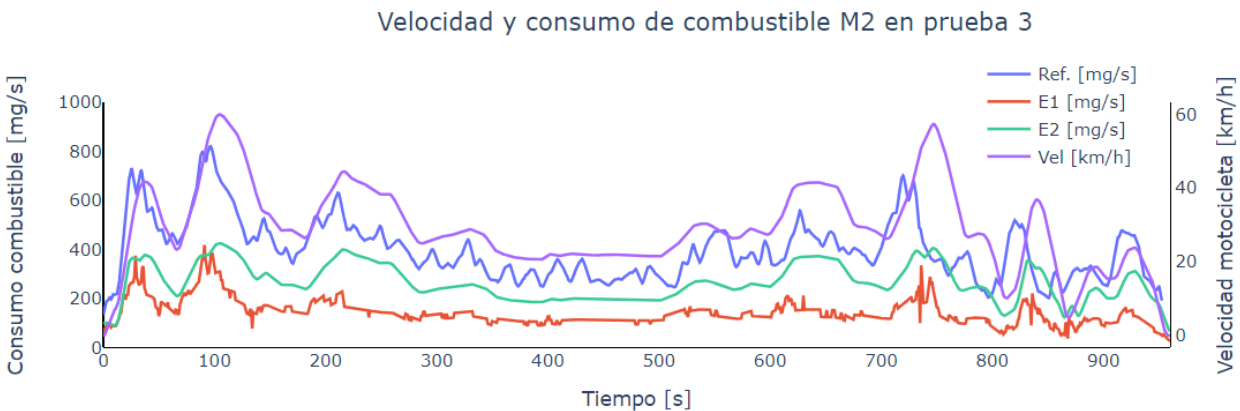
Figura 25. Prueba dinámica en Z250 200 P1

En la figura 26, se visualiza el mismo patrón de la figura 25, donde el resultado de la prueba de referencia muestra más consumo de combustible y se acercan a los resultados del método E2.



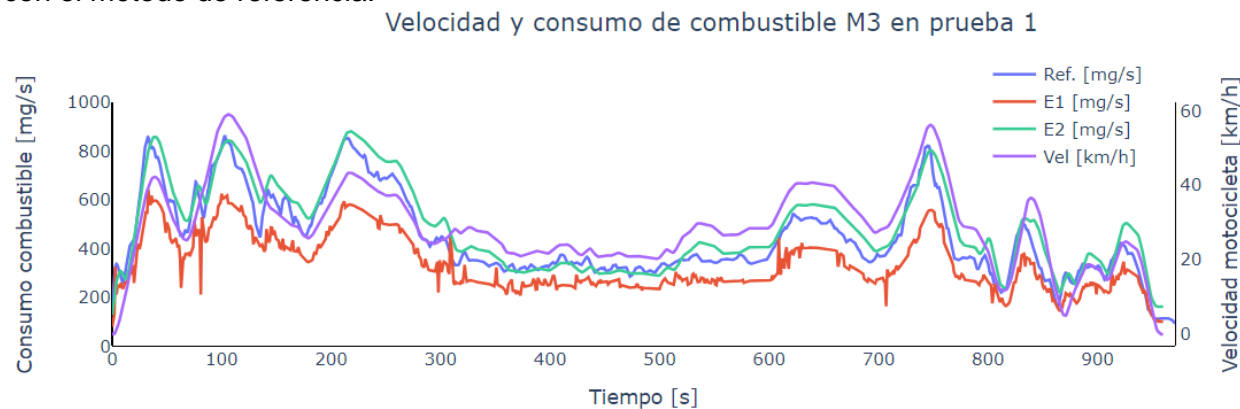
**Figura 26.** Prueba dinámica en Z250 200 P2

En la figura 27, se visualiza que la prueba de referencia muestra más consumo de combustible y se acerca al resultado del método teórico E2.



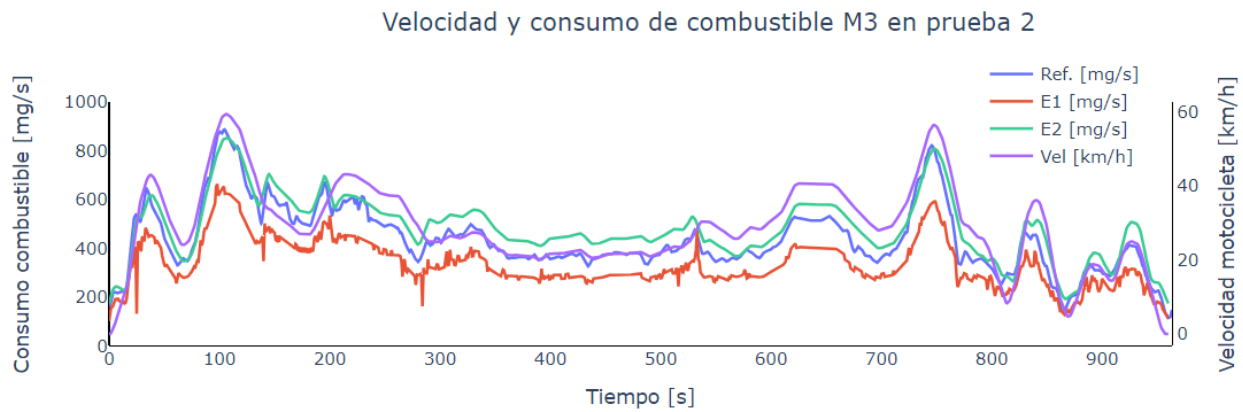
**Figura 27.** Prueba dinámica en Z250 200 P3

En la figura 28, se ven los resultados de las pruebas dinámicas en la motocicleta M3, donde se visualiza más consumo de combustible en los resultados del método E2, el cual se aproxima más a las pruebas realizadas con el método de referencia.



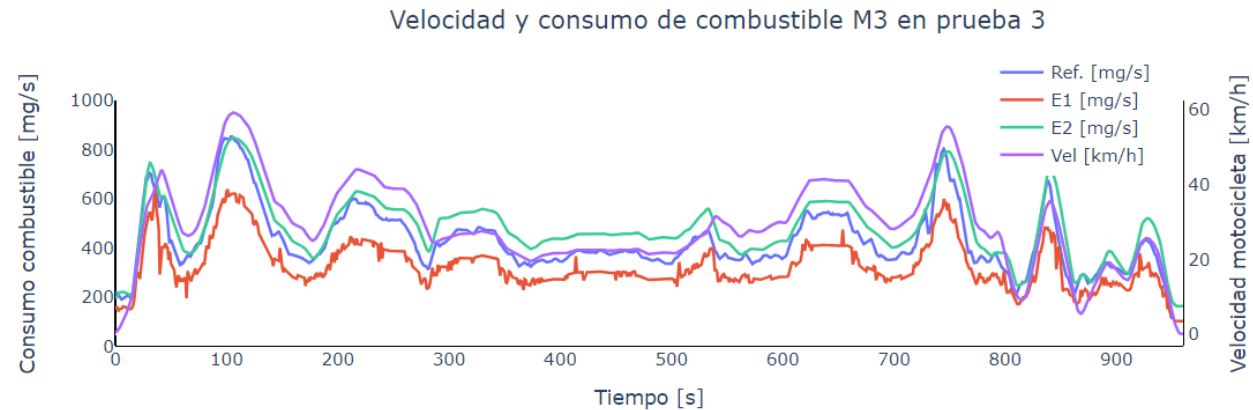
**Figura 28.** Prueba dinámica en Er6n P1

En la figura 29, se visualiza la segunda prueba dinámica en la motocicleta M3 con un patrón similar al de la figura 28, esta muestra más consumo de combustible usando el método de medición E2, estos resultados son los más cercanos con las mediciones del método de referencia.



**Figura 29.** Prueba dinámica en Er6n P2

En la figura 30, se visualiza más consumo en el método teórico E2 y con más proximidad al método de referencia.



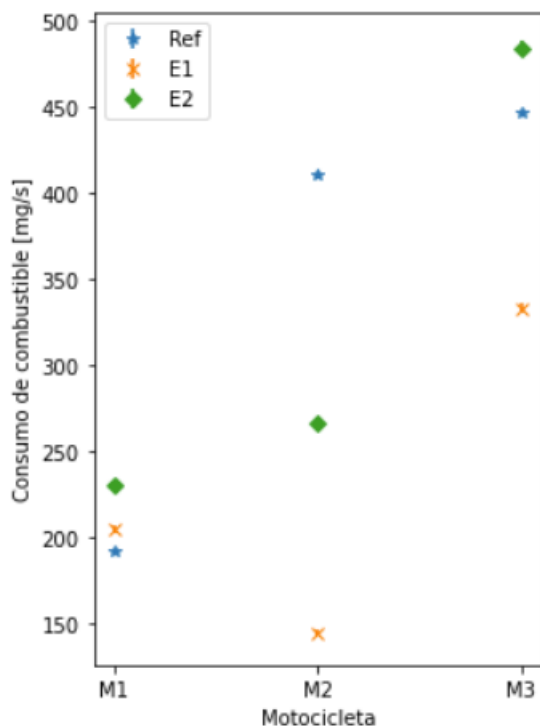
**Figura 30.** Prueba dinámica en Er6n P3

En la figura 31, se visualiza los resultados consolidados de las pruebas dinámicas donde en la motocicleta M1, el método más cercano al método de referencia es la E1 y la que más consumo muestra en los resultados es el método teórico E2.

En la motocicleta M2, se ve más consumo en los resultados de la prueba de referencia y proximidad con la prueba que usa el método E2.

En la motocicleta M3, se visualiza más consumo de combustible en los resultados de la prueba del método E2 siendo estos últimos más cercanos a los resultados de la prueba de referencia.

### Consumo de combustible instantaneo en prueba dinámica



**Figura 31.** Consolidado de resultados en las pruebas dinámicas.

Todas las anteriores pruebas llevadas a cabo como lo fueron en el dinamómetro en estado estable y dinámicas, diferentes esfuerzos de trabajo las cuales fueron a 3000 rpm y 4000 rpm y en las tres motocicletas utilizadas en el proyecto estas fueron KTM Duke 200, Kawasaki Z250 y Kawasaki Er6n, también se utilizó el inyector de cada una de ellas en conjunto con una tarjeta de adquisición de datos y uso de un programa desarrollado en LabVIEW donde se hizo una recopilación de todos los datos y se emplea para poder saber la precisión de la medición de combustible con respecto a el equipo de alto costo y ver que tan correcto estaba comparándolo con un artículo publicado anteriormente con una motocicleta 125 cm<sup>3</sup> [21].

## 5. CONCLUSIONES

En las pruebas de estado estable se encontró una relación directa entre la cilindrada del motor y el régimen de giro con el consumo de combustible. Por otro lado, se hace evidente el efecto del número de cilindros y las revoluciones en la estabilidad del régimen del motor y del consumo de combustible, en las motocicletas bicilíndricas fue más fácil lograr la estabilidad del régimen incluso a velocidades de giro cercanas a 3000 rpm.

Respecto a los métodos de medición de consumo de combustible en pruebas de estado estable, en este trabajo se encontró que al parecer las estimaciones y la medición de combustible es comparable en la motocicleta de bajo cilindraje (Duke200) siendo E2 el más cercano a la medición de referencia, para las otras motocicletas en las mediciones realizadas, no se encontró una tendencia clara que permita definir un método que estime el consumo de combustible de manera cercano a la medición con el equipo de alta precisión.

En las pruebas dinámicas se pudo evidenciar para todas las motocicletas y para los métodos de estimación y de medición, la incidencia del perfil de conducción en el consumo instantáneo de combustible.

Respecto nuevamente para la motocicleta Duke200 mejores aproximaciones entre la medición y los métodos de estimación, durante el ciclo se evidencian que los consumos se cruzan estando muy cercanos en la medición instantánea, siendo en este caso la estimación E1 la más cercana a la medición de referencia.

El procedimiento de caracterización de los inyectores permitió complementar los datos publicados para una motocicleta de 125 cm<sup>3</sup>, extender el gráfico (ver figura 14) y las ecuaciones de tendencia hasta motocicletas de 200 cm<sup>3</sup>, 250 cm<sup>3</sup> y 650 cm<sup>3</sup>.

## 6. REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, «EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VEHÍCULOS LIVIANOS NUEVOS,» Bogota, 2022.
- [2] E. L. N y A. RA Eijk, «Update analysis of real-world fuel consumption of business passenger cars based on Travelcard Nederland fuelpass data,» 2014.
- [3] V. Franco, M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger y P. Dilara, «Road vehicle emission factors development: A review,» Atmospheric Environment,» 2013.
- [4] K. Nguyen Duc, Y. Lien T, T. Nguyen Duy, T. Dung Nghiem, A. Tuan Le y T. Pham Huu, «A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles,» 2021.
- [5] M. Giraldo y J. I. Huertas, «Real emissions, driving patterns and fuel consumption of in-use diesel buses operating at high altitude,» p. 77, 2019.
- [6] K. Nguyen Duc, Y. Lien T, T. Nguyen Duy, T. Dung, A. Tuan Le y T y P. Huu, «A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles,» n° 2, 2021.
- [7] M. WEISS, P. BONNEL, R. HUMMEL, M. Urbano, R. COLOMBO, G. LANAPPE, P. LE LIJOUR y M. SCULATI, «Analyzing on-road Emissions of Light-duty Vehicles with Portable Emission Measurement Systems,» p. 53, 2011.

- [8] Grupo de Manejo Eficiente de la Energía GIMEL, «Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá,» p. 8, 2019.
- [9] K. Nguyen Duca, Y.-L. T. Nguyenb, T. Nguyen Duya, T.-D. Nghiemc , A.-T. Lea y T. Pham Huu, «A robust method for collecting and processing the on-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles,» 2020.
- [10] Siemens, «Medición de caudal SITRANS FC (Coriolis),» 2021.
- [11] P. Warasak, H. Yoshihiko, S. Wichuda, A. Seedam y T. Radpukdee , «Development of On-Road Exhaust Emission and Fuel Consumption Models for Motorcycles and Application through Traffic Microsimulation,» 2017.
- [12] K. Chen, W. Wang , H. Chen, C. Lin, H. Hsu, J. Kao y M. Hu, «Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions,» 2003.
- [13] K. Chen a, W. Wang a, H. Chen a, C. Lin a, H. Hsu b, J. Kao b y M. Hu b, «Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions,» p. 8, 2003.
- [14] J.-J. Chen y G.-H. Tzeng, «Developing A Taipei motorcycle driving cycle for emissions and fuel economy,» 1998.
- [15] W. Giraldo y M. V. Toro, «Estimación de la emisión de contaminates por motocicletas en el Valle de Aburrá,» pp. 241-250, 2008.
- [16] AMVA y UPB, «Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá,» 2018.
- [17] AMVA y UdeA, «Articulación Universidad-Empresa-Estado para determinar los factores de emisión reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá,» 2017.
- [18] AMVA, , «Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá,» 2019.
- [19] C. Jhon y C. Yunus, «Fluid Mechanics. Fundamentals and applications, Mexico: McGraw-Hill Education GlobalHoldings LLC,» 2018.
- [20] K. Nguyen Duc, Y. Lien T, T. Nguyen Duy, T. Dung, T. Anh y T. Pham Huu, «A robust method for collecting and processing theon-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles,» p. 7, 2020.
- [21] K. Nguyen Duc, Y. Lien T, T. Nguyen Duy, T. Dung, T. L. Anh y T. Pham Huu, «A robust method for collecting and processing theon-road instantaneous data of fuel consumption and speed for motorcycles,» 2020.

