



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE PM2.5 DE
MOTOCICLETAS EN EL VALLE DE ABURRÁ**

Javier David Londoño Echeverri

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021



Estudio de las Emisiones de PM2.5 de Motocicletas en el Valle de Aburrá

Javier David Londoño Echeverri

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Mecánica

Asesores:

Dr.-Ing. Andrés Felipe Agudelo Santamaría

Dr.-Ing. John Ramiro Agudelo Santamaría

Línea de Investigación:

Máquinas Térmicas

Grupo de Investigación:

GIMEL

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería.

Medellín, Colombia

2021

Agradecimientos

Muchas personas e instituciones contribuyeron para que este trabajo de investigación tuviera un final satisfactorio.

En lo personal, quiero expresar mi gratitud a los profesores Andrés Felipe Agudelo Santamaría y John Ramiro Agudelo Santamaría, por la oportunidad de trabajar con ustedes, y por la invaluable asesoría durante cada fase de este proyecto de investigación.

En lo familiar, quiero agradecer a mis padres Reinaldo Londoño y Marina Echeverri, por su apoyo emocional durante todo el tiempo que duró mi estudio de maestría. A mi esposa María Cristina Avendaño por el tiempo que mi trabajo la desplazó, y sin embargo siempre recibí una voz de aliento. A mis hijos Juan Diego y Leah, por ser mis mayores motivadores para iniciar cada día.

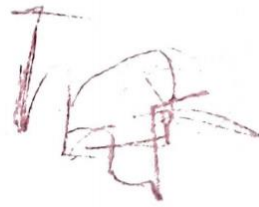
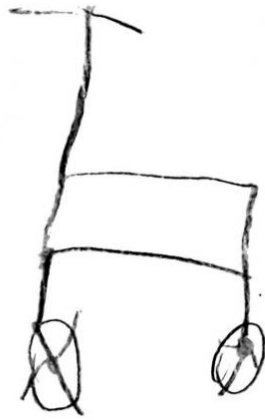
En lo profesional, agradezco a mis colegas Fernando García, John Herrera, Mateo Vélez, Frank Ruiz, y mi hermano Cristian Londoño, por su valioso apoyo en diferentes aspectos, mediante los cuales fue posible realizar la fase experimental de este proyecto de investigación. Agradezco en general a los integrantes del Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL), de quienes siempre recibí recomendaciones y apoyo logístico para la fase experimental. En especial extendiendo mi agradecimiento a Oscar Hincapié por su apoyo y paciencia en mis numerosas dudas de programación en Python, durante el procesamiento de datos.

A las empresas Incolmotos Yamaha, AKT motos, Auteco, y Mechanical Factory, quienes facilitaron vehículos que permitieron realizar las pruebas en laboratorio y en ruta, esenciales para este trabajo de investigación.

A la Universidad ECCI, en particular al director de la sede Medellín, Luis Carlos Gómez, quien me permitió tener horarios según mis necesidades para cumplir con las asignaturas de maestría. A la Cadena Automotriz del Centro de Manufactura Avanzada del SENA, que me permitió usar sus instalaciones para realizar pruebas de caracterización de sensores, necesarios para la fase experimental.

A la Agencia de Educación Superior de Medellín (SAPIENCIA), y al programa Extendiendo Fronteras Educativas, que mediante la resolución 3549 de 2018, me otorgó un crédito condonable para el pago del 50% de los derechos de matrícula de maestría. También al grupo GIMEL que me otorgó un apoyo financiero que pagó el valor restante de los derechos de matrícula.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad de Antioquia, que me aceptó como estudiante de posgrado, en donde tuve la fortuna de conocer, compartir y aprender de excelentes personas.



una moto tiene 2 llantas,
tiene un motor escondido,
solamente se montan 2 personas a la
vez es muy diferente a un carro

Juan Diego y Leah
Nov/20

Contenido

Resumen	7
1. CAPÍTULO 1	9
Consideraciones generales	9
Antecedentes	9
Justificación y pregunta de investigación	13
Objetivos.....	14
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos.....	14
Metodología	14
2. CAPÍTULO 2	17
Efecto de los arranques en frío	17
Metodología	17
Resultados.....	37
Síntesis.....	42
3. CAPÍTULO 3	43
Efecto de la pauta de conducción.....	43
Metodología	43
Resultados.....	53
Síntesis.....	57
4. CAPÍTULO 4.....	58
Efecto de la tecnología de suministro de combustible	58
Metodología	58
Resultados.....	60
Síntesis.....	64
5. CAPÍTULO 5.....	66
Conclusiones y trabajos futuros	66
Respecto al efecto de los arranques en frío.....	66
Respecto al impacto de la pauta de conducción	66
Respecto al efecto de la tecnología de suministro de combustible	67
Trabajos futuros	68
6. Referencias	69
Anexos.....	72

Lista de figuras

Figura 1.1. Resumen metodológica.....	15
Figura 2.1. Metodología para analizar el efecto de la temperatura.....	18
Figura 2.2. Versiones PEMS	19
Figura 2.3. Instrumentación instalada en motocicletas para prueba en ruta.....	20
Figura 2.4. Comportamiento del sensor MAF.....	21
Figura 2.5. Interfaz de usuario del programa MAM.....	22
Figura 2.6. Motocicletas y PEMS en ruta.....	22
Figura 2.7. Ruta 1: Calle Barranquilla en Medellín	24
Figura 2.8. Ruta 2: Comuna Villa Hermosa en Medellín	25
Figura 2.9. Depuración y filtrado de la señal del MAF.....	25
Figura 2.10. Filtrado EGT.....	26
Figura 2.11. Variables antes de sincronizar	27
Figura 2.12. Índices para sincronización.....	27
Figura 2.13. Variables después de sincronizar	28
Figura 2.14. Ciclos y segmentos de prueba en ruta – Villa Hermosa.....	29
Figura 2.15. Ciclos y segmentos de prueba en ruta - calle Barranquilla	29
Figura 2.16. Variables antes de sincronización.....	33
Figura 2.17. Índices para sincronización.....	33
Figura 2.18. Variables después de ajuste de sincronización.....	34
Figura 2.19. Temperatura de motor respecto a segmentos y ciclos.....	37
Figura 2.20. Distancia y duración respecto a la temperatura de operación de recorridos	38
Figura 2.21. Efecto de la temperatura en el FE de PN y PM (motocicleta 150 cm ³)	39
Figura 2.22. Efecto de la temperatura en el FE de PN y PM (motocicleta 125 cm ³)	40
Figura 3.1. Metodología para analizar el impacto de la pauta de conducción.....	44
Figura 3.2. Ciclo AMVA de motocicletas reproducido	45
Figura 3.3. Filtrado EFR	46
Figura 3.4. Variables antes de sincronización ciclo AMVA.....	47
Figura 3.5. Variables después de sincronización ciclo AMVA	47
Figura 3.6. División de ciclo AMVA en micro viajes	48
Figura 3.7. División de ciclo prueba en ruta en micro viajes	48
Figura 3.8. Determinación del número de grupos	49
Figura 3.9. Características de aceleración de los micro viajes.....	49
Figura 3.10. Características de velocidad – distancia de las pautas de conducción.....	51
Figura 3.11. Características de velocidad – duración de las pautas de conducción.....	51
Figura 3.12. FE de PN2.5 por pautas de conducción	53
Figura 3.13. FE de PM2.5 por pautas de conducción.....	55
Figura 3.14. FE PN2.5 por pauta y temperatura de operación	56
Figura 3.15. FE PM2.5 por pauta y temperatura de operación.....	56
Figura 4.1. Temperatura de operación por tecnología de suministro de combustible.....	60
Figura 4.2. FE de PN2.5 por tecnología y temperatura de operación.....	61
Figura 4.3. FE de PN2.5 por norma Euro y pauta de conducción	62
Figura 4.4. FE de PM2.5 por norma Euro y pauta de conducción.....	62
Figura 4.5. FE de PN2.5 por tecnología y pauta de conducción	63

Figura 4.6. FE de PM2.5 por tecnología y pauta de conducción.....	63
--	----

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Motocicletas usadas en las pruebas en ruta.....	19
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas PPS-M.....	21
Tabla 2.3. Variables segmento de trabajo en frío ruta Villa Hermosa.....	30
Tabla 2.4. Variables segmento de trabajo en frío ruta calle Barranquilla.....	30
Tabla 2.5. Variables segmento de trabajo estabilizado en caliente ruta Villa Hermosa	31
Tabla 2.6. Variables segmento de trabajo estabilizado en caliente ruta Calle Barranquilla.....	31
Tabla 2.7. Variables ciclos 1 a 3 ruta Villa Hermosa	32
Tabla 2.8. Variables ciclos 1 a 3 ruta calle Barranquilla.....	32
Tabla 2.9. FE de PN y PM por duración y distancia de viajes en motocicletas	41
Tabla 3.1. Motocicletas usadas en las pruebas de laboratorio.....	44
Tabla 3.2. Parámetros ciclo AMVA motocicletas reproducido [19].....	45
Tabla 3.3. Parámetros de las pautas de conducción	50
Tabla 4.1. Características técnicas de las motocicletas	59
Tabla 4.2. Cilindraje calculado de las motocicletas.....	59

Resumen

En este trabajo de investigación se estudiaron las emisiones de material particulado de las motocicletas en el Valle de Aburrá, evaluando el efecto del proceso de calentamiento, desde el arranque en frío. Se determinó el impacto de la pauta de conducción y el efecto de la tecnología de suministro de combustible en los factores de emisión (FE) de número de partículas (PN) y de masa de partículas (PM) de tamaño menor o igual a 2,5 μm .

Para este fin, se realizaron pruebas dinámicas de conducción en ruta, y se utilizaron datos de pruebas dinámicas en banco de rodillos. Las pruebas de conducción real se realizaron en dos rutas de la ciudad de Medellín (calle Barranquilla, y comuna Villa Hermosa), con dos motocicletas de marcas y cilindrajes representativos de los vehículos de la región (125 cm^3 a carburador, y 150 cm^3 a inyección). Estos vehículos cumplen con la norma de emisiones Euro 3.

Se desarrolló un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS), con un peso de 55,3 kg, que permitió realizar las pruebas en ruta por periodos de hasta 45 minutos, y recorridos promedio de hasta 16,3 km. Las pruebas en laboratorio pertenecen a un proyecto del año 2.017, en el cual se determinaron los FE de motocicletas para el Valle de Aburrá. Estas pruebas se hicieron siguiendo el ciclo de conducción de motocicletas del AMVA, con cuatro motocicletas de cilindrajes entre 110 y 160 cm^3 (cuatro Euro 2 con carburador, y una Euro 3 con inyección de combustible), y de marcas representativas del quinquenio 2.011-2.015. En este trabajo se usaron los datos brutos de las mediciones en laboratorio, y se procesaron de nuevo con las metodologías desarrolladas aquí.

Las pruebas en ruta permitieron encontrar una relación inversa entre los FE de PN2.5 y de PM2.5, y la temperatura de operación de la motocicleta. Además, se identificó que la temperatura de operación está relacionada con la distancia recorrida y con la duración de los recorridos. Esto permitió asociar los FE medidos aquí, con los viajes característicos de las motocicletas en la región, determinados en la encuesta origen-destino más reciente.

Se definió un índice de agresividad que permitió identificar cuatro pautas de conducción (Regulado, Moderado, Agresivo I, y Agresivo II), tanto para las pruebas en ruta, como para las de laboratorio. Se halló una relación directa entre el índice de agresividad de las pautas de conducción y los FE de PN2.5 y de PM2.5. Los mayores FE correspondieron a las pautas Agresivo II, y Agresivo I, mientras que los menores se observaron en las pautas Regulado y Moderado. Además, se encontró que el efecto de la pauta de conducción en las emisiones se acentúa al conducir la motocicleta con temperatura de operación en frío.

El análisis del efecto de la tecnología de suministro de combustible se desarrolló según la temperatura de operación y la pauta de conducción. En este caso se modificaron los FE al dividirlos por el cilindraje de cada vehículo, con el fin de eliminar el efecto del tamaño del motor. Se encontró que las motocicletas con inyección de combustible presentan un calentamiento más continuo (con menos oscilaciones), pero con mayor emisión de partículas en esta etapa de operación. En cuanto al efecto de la tecnología y de la pauta de conducción, se encontró que para todas las pautas las

motocicletas que cumplen Euro 3 tienen menores FE de PN2.5 y de PM2.5 que aquellas que cumplen Euro 2. Esto implica que una renovación tecnológica representaría una disminución en las emisiones de partículas de este segmento de vehículos. Además, se encontró que las motocicletas con inyección electrónica (Euro 3) tienen menores FE en las pautas Regulada y Moderada, respecto a las motocicletas con carburador (Euro 3). Sin embargo, las emisiones de las primeras son mayores para las pautas Agresivo I y Agresivo II. Esto indica que el beneficio del control de emisiones de las motocicletas con inyección, se efectúa sólo en modos de conducción con velocidades medias y altas, bajas aceleraciones promedio, y bajos tiempos en ralentí, es decir, con una conducción menos transitoria.

CAPÍTULO 1

Consideraciones generales

Se considera partícula a cualquier materia en estado líquido o sólido, presente en los gases de escape de un motor de combustión interna (MCI), en condiciones aproximadamente ambientales. Una característica del aerosol que aparece en el escape de los motores es su capacidad para que se produzcan cambios en las características físicas y químicas del material particulado (PM, por sus siglas en inglés), esto debido a procesos como sedimentación, evaporación, condensación, crecimiento por colisión y procesos fotoquímicos, entre otros [1].

Las partículas emitidas por MCI se suelen clasificar en dos clases: en primer lugar, están las partículas primarias, las cuales se forman directamente como producto del proceso de combustión (con tamaño del orden de 6 a 30 nm), y se miden justo a la salida del cilindro. Por otro lado, están las partículas secundarias (con tamaño superior a 100 nm), resultantes de algunos de los procesos físicos y químicos que ocurren tanto en el conducto de escape, como en la atmósfera. Son precisamente estas partículas secundarias aquellas que están reguladas por las diferentes normas ambientales [1,2].

El reglamento 168 de 2013 de la Unión Europea, regula el PM para motocicletas a partir de la norma Euro 5, la cual está planeada para entrar en vigencia en el periodo 2020/2021, con un límite de 4,5 mg/km. El número de partículas no está contemplado en esta regulación para motocicletas. En Colombia, donde estos vehículos representan más del 57% del parque automotor, la Ley 1.972 del 18 de julio de 2019 establece que sólo se podrán comercializar motocicletas que cumplan con la normatividad Euro 3 (sin regulación para PM) o superior, a partir del primero de enero de 2021 [3-6].

En el valle de Aburrá, una región con alrededor de 3,8 millones de habitantes, la concentración de PM, específicamente PM_{2.5} (tamaño hasta 2,5 µm), es el contaminante criterio para definir el inicio y fin de los episodios de contaminación atmosférica, monitoreada por el Sistema de Alerta Temprana (SIATA) [7,8]. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) ha establecido contingencias ambientales por mala calidad del aire en la región de su jurisdicción desde el año 2016. Esto ocurre comúnmente en dos periodos del año (febrero-marzo / septiembre-octubre) [8,9]. En esta región las motocicletas representan los vehículos con mayor participación del parque automotor, con un aporte del 56,26% para el 2016, con más de 900.000 circulando en el año 2019. Además, en 2017 y 2018 en el departamento de Antioquia se matricularon el 25,7% y el 26,6% de las motocicletas nuevas de Colombia, siendo el departamento con mayor número de matrículas de este tipo de vehículos en el país [5,7,10-13]. Por otro lado, el inventario de emisiones del AMVA indica que las fuentes móviles (motocicletas, automóviles, buses, y camiones), aportan más del 80% de las emisiones de PM en la región. En dicho estudio se reporta que las motocicletas tienen unas emisiones estimadas de 290 toneladas de PM_{2.5} por año [14,15].

Antecedentes

En el ámbito local se han aunado esfuerzos para establecer el aporte de las fuentes móviles en las emisiones contaminantes que deterioran la calidad del aire de la región. En 2001 Toro *et al.* [16]

estimaron las emisiones en caliente de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), material particulado suspendido total (TSP, por sus siglas en inglés), y compuestos orgánicos volátiles (COVs) para el tráfico de la ciudad de Medellín. Se usó información del flujo vehicular durante el periodo 1.997 – 2.000, número y tipo de vehículos en cada hora, longitud del tramo de las vías y los factores de emisión del estudio CORINAIR. Se encontró que había dos picos de emisiones: uno se presenta a las 8:00 a.m., y otro a las 7:00 p.m., siendo la región centro y centro-occidental las de mayor afectación. Para aquel momento, las motocicletas contribuían con un 24,2% de la flota de vehículos, mientras que los autos, buses y camiones tenían una contribución del 68,5%, 2,1% y 5,2%, respectivamente.

Los factores de emisión (FE) son índices que relacionan las emisiones y la actividad que las genera. Se usan para cuantificar las emisiones en la homologación de vehículos, así como para los inventarios de emisiones. Los FE expresan la masa, número o cantidad de un contaminante dividida por la cantidad de combustible usado, o por la distancia recorrida o duración de la actividad de emisión. En algunos casos los FE se expresan por cantidad de pasajeros, carga, o unidad de cilindrada. [2,17–21]

En 2.008 se desarrollaron FE teóricos para motocicletas del valle de Aburrá, aplicando el método de monitoreo de gases en estado estacionario o ralentí, y balances estequiométricos. En promedio para motores de dos y cuatro tiempos, los FE de monóxido de carbono (CO) hallados fueron de 19,67 g/km y 10,73 g/km, respectivamente. Los FE de hidrocarburos (HC) fueron de 2,55 g/km y 0,12 g/km, respectivamente [22].

La Universidad Pontificia Bolivariana y el AMVA en 2.014 y 2.017, presentaron el inventario de emisiones atmosféricas y la evolución del parque automotor de la región para los años 2.011 y 2.016, siendo el primero de estos inventarios el desarrollado por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid en 1.996 [14]. Las emisiones de los contaminantes criterio (CO, NO_x, SO_x, COVs y PM_{2.5}) se calcularon a través de un modelo de simulación LEAP (Sistema de Planteamiento de Alternativas Energéticas a Largo Plazo), el cual permite el desarrollo de estudios de planeamiento energético integral, y de mitigación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire. Según este inventario, para el año 2.011 las 350.000 motocicletas (44% del parque automotor) aportaron una emisión de 146,9 toneladas de PM_{2.5}. [14]. Para el año 2.016 se reportaron 735.128 motocicletas con una emisión estimada de 290 toneladas de PM_{2.5} [15].

En 2.017, la Universidad de Antioquia desarrolló el ciclo de conducción de motocicletas para el Valle de Aburrá. Se identificó que éste se caracteriza por cambios bruscos de aceleración y, por ende, está asociado más a las pautas de conducción, que a las condiciones de tráfico. El ciclo de conducción de motocicletas del Valle de Aburra se usó para determinar los FE de ocho motocicletas representativas de la región. Se encontró que los FE de motocicletas están estrechamente correlacionadas con la tecnología del sistema de suministro de combustible. Los resultados mostraron que dos motocicletas con la misma cilindrada (125 cc), pero con distinto sistema de suministro de combustible (carburador e inyección electrónica), tienen factores de emisión de PM en el orden de 0,07 mg/km y 6,94 mg/km, respectivamente [2,15,23].

Emisiones bajo condiciones dinámicas de conducción

El estudio de emisiones de motocicletas en condiciones reales de conducción (lo cual sería ideal) se ha visto limitado hasta el momento por deficiencias en la portabilidad de los equipos de medición. Para este fin es necesario utilizar sistemas portátiles de medición de emisiones (PEMS por sus siglas en inglés) muy compactos, como los desarrollados recientemente para medir emisiones gaseosas y en estudio por la Universidad Técnica de Liberec (república Checa) de 15 kg de peso, y por la Universidad de Kempten (Alemania) de 50 kg [24,25]. Por este motivo no hay estudios que midan emisiones de motocicletas bajo condiciones reales de conducción.

Hasta el momento los estudios de emisiones de motocicletas se han realizado principalmente en laboratorio, utilizando dinamómetros de rodillos. Estos estudios se realizan normalmente siguiendo ciclos de conducción con fines de homologación, como los ciclos ECE R40, ECE R47 y WMTC. También se realizan estudios con el objeto de establecer los inventarios o factores de emisión de una región en particular [2-4,15,18,23,26-31].

El desarrollo de ciclos de conducción de motocicletas para regiones en particular, se ha realizado principalmente en países asiáticos, donde las motocicletas tienen una alta participación de la flota vehicular. Este es el caso de Taiwán, donde Tzeng y Chen [18] desarrollaron el ciclo de conducción de motocicletas de la ciudad de Taipéi (TMDC). Estos investigadores determinaron las emisiones de CO, HC y NO_x, y el consumo de combustible en 45 motocicletas (29 dos tiempos y 16 cuatro tiempos), siguiendo el ciclo regulatorio ECE, y el TMDC en un dinamómetro de rodillos. Se encontró que las emisiones promedio de CO, HC y NO_x bajo el ciclo TDCM fueron mayores que bajo el ciclo ECE para motocicletas cuatro tiempos y dos tiempos. En este estudio no se aborda el estudio de las emisiones de PM y PN. Por otro lado, Chen *et al.* [28] midieron emisiones de CO, HC, NO_x y CO₂, y consumo de combustible de motocicletas en dinamómetro bajo condiciones de conducción rural y urbana, usando los ciclos de conducción representativos de las ciudades de Taipéi, Taichung, Kaohsiung, y Pingtung. Se encontró que los FE de emisiones gaseosas entre los diferentes ciclos son significativamente diferentes, mientras los FE entre las regiones urbanas y rural son insignificantes. Tsai *et al.* [27] presentan el ciclo de conducción de motocicletas de Kaohsiung (KHM), y comparan las emisiones gaseosas de CO, THC, NO_x y CO₂ (sin evaluar emisiones de PM y PN) de 19 motocicletas (10 dos tiempos de 50 cm³ y 9 cuatro tiempos de 125 cm³) con respecto a varios ciclos de conducción: ECE, el japonés y el de Hong Kong. De nuevo se encontró que las emisiones gaseosas fueron mayores en el ciclo local, el cual está caracterizado por un mayor número de cambios de aceleración-deceleración, mayor tiempo de duración, y alta frecuencia de variaciones de velocidad de motocicletas respecto a los demás ciclos de conducción.

En 2011 se desarrolla el ciclo de conducción para motocicletas y vehículos livianos en la ciudad de Hanói, en Vietnam, los cuales se usaron en un laboratorio para determinar los FE de CO, HC, NO_x y CO₂ y actualizar el inventario de emisiones de la región. Ocho motocicletas de cuatro tiempos con cilindradas de 100, 110 y 125 cm³ fueron probadas. Los FE de CO, HC de motocicletas fueron significativamente mayores con respecto a los FE de vehículos livianos probados bajo el ciclo de Hanói para vehículos livianos, mientras que el NO_x y el CO₂ son menores respecto a los vehículos livianos. Las emisiones de PM y PN no fueron medidas en este estudio [29,30]. Anh *et al.* [32] comparan los factores de emisión y el consumo de combustible de motocicletas bajo el ciclo de conducción de motocicletas de Hanói (HMDC) y el ciclo ECE. Se encontraron similitudes en los FE de hidrocarburos totales (THC, por sus siglas en inglés), CO, CO₂, (sin evaluar emisiones de PM y PN), aunque el FE de NO_x fue mayor bajo el ciclo HMDC. Las emisiones y consumo de combustible,

tienden a ser mayores en los ciclos desarrollados localmente, debido a que estos representan mejor las condiciones particulares de conducción, caracterizadas por más transitorios de aceleración en comparación con los ciclos usados para estándares de homologación, como el caso del ciclo ECE, el cual es un ciclo poligonal con periodos constantes de aceleración, deceleración y velocidad, que no representan precisamente la realidad de la conducción.

Seedam *et al.* [33], con el objeto de estudiar las emisiones y consumo de combustible, desarrollan un sistema portátil para medición de parámetros en ruta de motocicletas, para el desarrollo del ciclo de conducción la ciudad de Khon Kaen – Tailandia. Este ciclo se concibió para estudiar posteriormente las emisiones de motocicletas.

Emisiones bajo condiciones de trabajo en frío

Se tiene referencia de pocos estudios sobre las emisiones de motocicletas bajo condiciones de trabajo en frío. Yung-Chen *et al.* [34] evaluaron las emisiones de CO, HC y NO_x (sin incluir emisiones de PM y PN) de motocicletas de bajo cilindraje. Se usaron siete vehículos con carburador y dos con inyección electrónica, bajo condiciones de trabajo en frío y en caliente, en un dinamómetro de rodillos. Se encontró un aumento en los factores de emisión de CO y de HC para el arranque en frío. No hubo variación significativa del FE de NO_x entre los modos de operación.

Iodice y Senatore [35,36], presentan dos estudios sobre las emisiones de CO y HC de motocicletas durante las fases de trabajo en frío y en caliente. En el primero, se reprodujo en dinamómetro de rodillos el ciclo ECE, con una motocicleta de alto rendimiento alimentada con una mezcla etanol-gasolina en tres diferentes porcentajes (10%, 20%, y 30%). Se encontró que el aumento de la proporción de mezcla de etanol-gasolina produce una disminución de las emisiones de CO y HC durante la fase de trabajo en frío. Sin embargo, estas emisiones fueron mayores que las producidas durante la fase de trabajo en caliente para todas las mezclas de combustible. En el segundo estudio se reprodujeron los ciclos WMTC, ECE y del ciclo de referencia Europeo *Artemis Urban Cold* (ciclo constituido por fases urbano, rural y carretera), con dos motocicletas de alto rendimiento alimentadas con combustible comercial. Se halla de nuevo un aumento significativo de las emisiones de CO y HC durante la fase de trabajo en frío. En este estudio no se evalúan las emisiones de PM y PN durante la operación en frío y caliente.

Emisiones de PM

El PM está regulado para motocicletas sólo a partir de la normatividad Euro 5 [3]. Debido a la falta de regulación de las emisiones de PM en motocicletas, se ha estudiado poco el tema. Palke y Tyo [26] evaluaron las emisiones de PM en motocicletas de dos y cuatro tiempos con catalizador de oxidación selectiva de HC, siguiendo el ciclo ECE-R40 y el ciclo de conducción Indio (IDC) en dinamómetro de rodillos. Se hallaron FE de PM entre 8 y 43 mg/km en motocicletas de dos tiempos con cilindrajes de 50 a 147 cm³, mientras que el FE de PM en una motocicleta cuatro tiempos de 125 cm³ es de 3 mg/km, por su parte las motocicletas con catalizador presentan reducciones entre el 40 al 70% de las emisiones de PM. En este estudio las emisiones de PN no fueron evaluadas.

Ntziachristos *et al.* [21], realizaron la caracterización de las emisiones de PM en diferentes vehículos, entre ellos dos motocicletas con motor de dos tiempos y cilindradas de 49 y 100 cm³. En

este trabajo se usó un impactador electrostático de baja presión (ELPI). Las mediciones se realizaron en un banco de rodillos, siguiendo la parte urbana (UDC) del ciclo europeo de homologación de vehículos (NEDC). Se midieron diámetros medios de partículas entre 0,04 μm y 0,08 μm , se reporta un FE de PM entre 90 y 200 mg/km, y un FE PN entre 5 y 83×10^{12} partículas/km dependiendo de la motocicleta y condiciones de conducción. Este estudio es el primero del que se tiene referencia donde se evalúan las emisiones de material particulado en número. Prati y Costagliola [37], determinaron las emisiones de partículas finas y de compuestos orgánicos en ocho motocicletas (cinco de dos tiempos a carburador, dos de cuatro tiempos a carburador, y una de cuatro tiempos con inyección electrónica), usando el ciclo legislativo ECE-R47 en un dinamómetro de rodillos. Se encontró un FE de número de partículas de 7×10^{12} a 4×10^{13} partículas/km para todas las motocicletas, mientras que el FE de PM estuvo afectado por la tecnología y normatividad que puede cumplir la motocicleta así: 155,8 mg/km motor de dos tiempos a carburador (pre-Euro), entre 22,3 y 36,1 mg/km para motocicletas con motor de dos tiempos (Euro 1 y Euro 2) y cuatro tiempos a carburador (Euro 1 y Euro 2), y 13,6 mg/km para motocicletas con motor de cuatro tiempos con inyección electrónica.

En un trabajo reciente [38], se estudiaron en banco de rodillos las emisiones de PM de motocicletas que cumplen estándar Euro 4, bajo el ciclo de conducción WMTC (que incluye una fase de trabajo en frío y dos en caliente). Se encontró que las emisiones de masa de partículas fueron menores a 1,5 mg/km, muy por debajo de 4,5 mg/km (límite Euro 5 para motocicletas). Sin embargo, el FE de número de partículas fue cercano, o en algunos casos superó hasta por un factor de cuatro el límite de emisiones de vehículos de pasajeros (6×10^{11} partículas/km). Este es el primer trabajo del que se tiene referencia en el cual se estudian las emisiones de PM y PN incluyendo fase de trabajo en frío y caliente, sin embargo, no se especifica el FE para cada estado de operación.

El objetivo de este trabajo es presentar el efecto de la pauta de conducción, de los arranques en frío, y de la tecnología de suministro de combustible sobre las emisiones de PM_{2.5} en número y en masa, bajo condiciones dinámicas de conducción, en motocicletas representativas del valle de Aburrá. Con esto se espera entender mejor el aporte de este segmento vehicular en las emisiones de material particulado de la región.

Justificación y pregunta de investigación

De la revisión anterior se desprende que hay poca medición de PM y PN en motocicletas, que no se ha realizado mediciones de PM y PN bajo condiciones de conducción real y menos incluyendo análisis de emisiones de PN y PM durante el arranque en frío. Tampoco se ha evaluado el efecto de la pauta o estilos de conducción en las emisiones de PM y PN en motocicletas. Hay evidencia de que las emisiones de PM y PN en motocicletas están afectadas por la tecnología de suministro de combustible. Las mediciones de emisiones realizadas en motocicletas no incluyen pendientes en la vía, y menos pendientes significativas de regiones como la de área metropolitana del Valle de Aburrá.

Aunque las emisiones de PM y PN en motocicletas se han estudiado poco, debido a la falta de regulación, los estudios reportados indican que los FE de emisiones gaseosas tienden a ser mayores en ciclos locales que en ciclos regulatorios [18,27,32]. No se tiene conocimiento de que existan FE de PM para pruebas en ruta de motocicletas [24,25]. Se ha observado que los FE son

mayores en fases de trabajo en frío, y que hay un efecto significativo del grado de desarrollo tecnológico de la motocicleta en las emisiones [34–39].

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se plantea el siguiente problema de investigación, cuya respuesta se busca en la definición de los objetivos:

Hace falta conocer las emisiones de PM2.5 en masa y número de las motocicletas en la región metropolitana del Valle de Aburrá, teniendo en cuenta la pauta de conducción y los arranques en frío, para vehículos con carburador y con inyección electrónica.

De este problema se derivan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el impacto de los arranques en frío sobre las emisiones de PM2.5 en masa y en número en motocicletas representativas del Valle de Aburrá?
- ¿Cuál es el efecto de la pauta de conducción sobre las emisiones de PM2.5 en masa y en número, en motocicletas representativas del Valle de Aburrá?
- ¿Cómo afecta la tecnología de suministro de combustible de las motocicletas a las emisiones de PM2.5 en masa y en número?

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto de la pauta de conducción y de la tecnología de suministro de combustible sobre las emisiones de PM2.5 en masa y en número, bajo condiciones dinámicas de conducción, en motocicletas representativas del Valle de Aburrá.

Objetivos específicos

- Identificar la contribución de los arranques en frío a las emisiones de PM2.5 en masa y en número en motocicletas representativas del Valle de Aburrá.
- Evaluar el impacto de la pauta de conducción sobre las emisiones de PM2.5 en masa y en número en motocicletas representativas del Valle de Aburrá.
- Determinar el efecto de la tecnología de suministro de combustible sobre las emisiones de PM2.5 en masa y en número, en motocicletas bajo condiciones dinámicas de conducción.

Metodología

En la figura 1.1 se presenta la metodología desarrollada en tres fases para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

La fase uno inicia con la selección de motocicletas para pruebas en ruta, buscando que estén entre las marcas y cilindradas más vendidas, y además que cuenten con diferentes sistemas de suministro de combustible. La instrumentación se realiza alrededor del medidor de partículas Pegasor PPS-M, disponible en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad de Antioquia, cuya señal se ajustó usando como referencia el equipo DEKATI utilizado en las mediciones de

laboratorio. Con este equipo (PPS_M) se configuró un PEMS que permite la medición y almacenamiento de variables de operación de la motocicleta, datos de GPS, PM2.5 y PN2.5, durante aproximadamente cincuenta minutos. Una vez instrumentada la motocicleta y definido el tiempo máximo de operación del PEMS, se selecciona una vía pública que cumpla con criterios como segmentos de vía con ascensos, descensos y terreno llano. Luego de realizar las pruebas en ruta, los datos se procesan, realizando inicialmente una depuración, filtrado y sincronización de las variables. Luego se dividen los datos de cada prueba en segmentos de vía que se repiten durante el recorrido (llamados ciclos). Finalmente, se determinaron los FE de PN2.5 y PM2.5 según la temperatura media de cada ciclo: etapas de trabajo en frío y estabilizado en caliente.

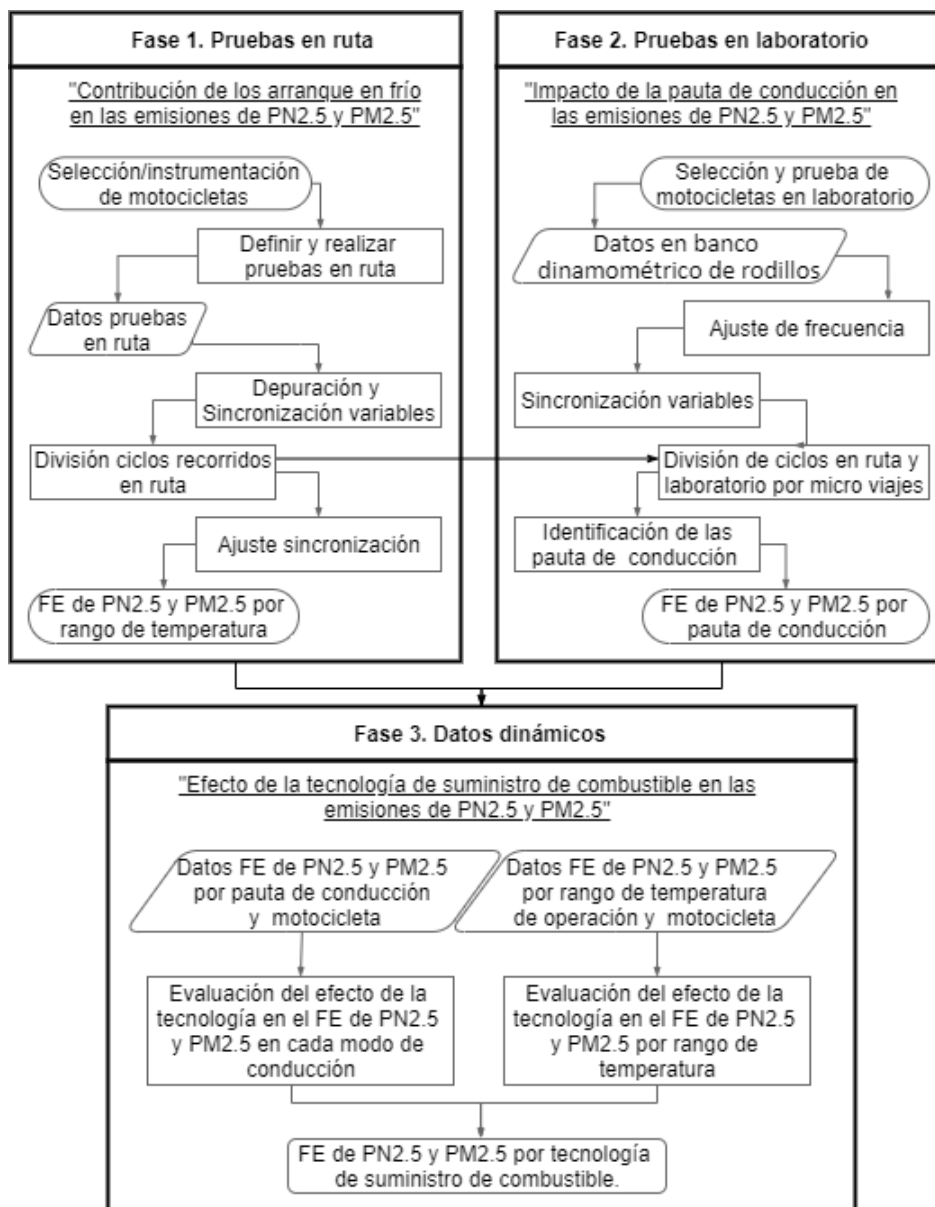


Figura 1.1. Resumen metodología

La fase dos corresponde al uso de los datos obtenidos en el proyecto FEVA-I, en el cual se desarrollaron los FE de varios contaminantes gaseosos y de PM para motocicletas del valle de

Aburrá bajo el ciclo de motocicletas de la región. Las motocicletas seleccionadas están entre las marcas y de las cilindradas más vendidas en el quinquenio 2.011-2.015. Estos datos se procesan para determinar el efecto de la pauta de conducción en las emisiones de PN2.5 y PM2.5 de motocicletas. Al provenir estos datos de diferentes equipos, con sistemas de medición de naturaleza y tiempos de muestreo diferentes, los datos se almacenaron con frecuencias diferentes, por esta razón se procede inicialmente con un ajuste en la frecuencia de muestreo, luego un proceso de sincronización de variables que pretende disminuir el desfase temporal de los datos durante toda la prueba en la que se siguió el ciclo de conducción para motocicletas del AMVA. Se identificaron los micro viajes de los ciclos reproducidos en laboratorio y, además, se incluyeron los ciclos con temperatura de operación media, alta y estabilizada en caliente, recorridos durante las pruebas en ruta. Se desarrolló una metodología propia para identificar las pautas de conducción de los micro viajes en función de las características dinámicas de la conducción dadas por la velocidad, aceleración, distancia recorrida, tiempo en ralentí, y número cambios significativos de aceleración y deceleración. Finalmente, se determinan los FE de PN2.5 y PM2.5 para cada pauta de conducción.

Dado que, tanto en las pruebas en ruta, como en laboratorio se usaron motocicletas con diferentes sistemas de suministro de combustible, en la fase tres, se analizan los resultados de FE de PN2.5 y PM2.5 descritos anteriormente, pero evaluando el efecto de la tecnología en el FE tanto para cada pauta de conducción, y para los arranques en frío.

Los desarrollos de cada una de las fases de la metodología resumida en las líneas anteriores se presentan en los capítulos siguientes. En el capítulo 2 se aborda el efecto de los arranques en frío en las emisiones de PN2.5 y PM2.5, determinado a partir de los datos de las pruebas en ruta. En el capítulo 3, se analiza el efecto de la pauta de conducción sobre las emisiones de PN2.5 y PM2.5, usando tanto datos de las pruebas en laboratorio, como los datos de las pruebas en ruta con temperaturas de operación media, alta, y estabilizada en caliente. En el capítulo 4 se aborda el efecto de la tecnología de suministro de combustible en las emisiones de PN2.5 y PM2.5 a partir de los datos de pruebas en ruta y laboratorio en los cuales se midieron motocicletas con diferentes sistemas de suministro de combustible. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros que se desprenden de esta investigación.

CAPÍTULO 2

Efecto de los arranques en frío

El Valle de Aburrá se estima que por cada 4,1 habitantes hay aproximadamente una motocicleta matriculada [7,13]. De acuerdo a la encuesta origen destino, realizada por el AMVA en 2.017 [40], de los 6,13 millones de viajes diarios que se realizan en la región, las motocicletas efectúan el 12 %, estos viajes en motocicleta tiene un tiempo de viaje promedio de 32 minutos, y una distancia promedio de 8,9 km. Sin embargo, de los 751.483 viajes diarios realizados en motocicletas, el 67% (514.845 viajes) presentan tiempos de viaje promedio de 21 minutos con distancias promedio de 6,6 km. Dadas las distancias recorridas cortas y bajos tiempos de duración de los viajes realizados diariamente en el Valle de Aburrá, cobra relevancia la evaluación del comportamiento de la temperatura y su efecto en las emisiones de partículas de las motocicletas, desde el arranque en frío hasta la operación estabilizada en caliente.

Metodología

La contribución de los arranques en frío en las emisiones de PM_{2.5} y PN_{2.5} se desarrolló con la metodología presentada en la figura 2.1.

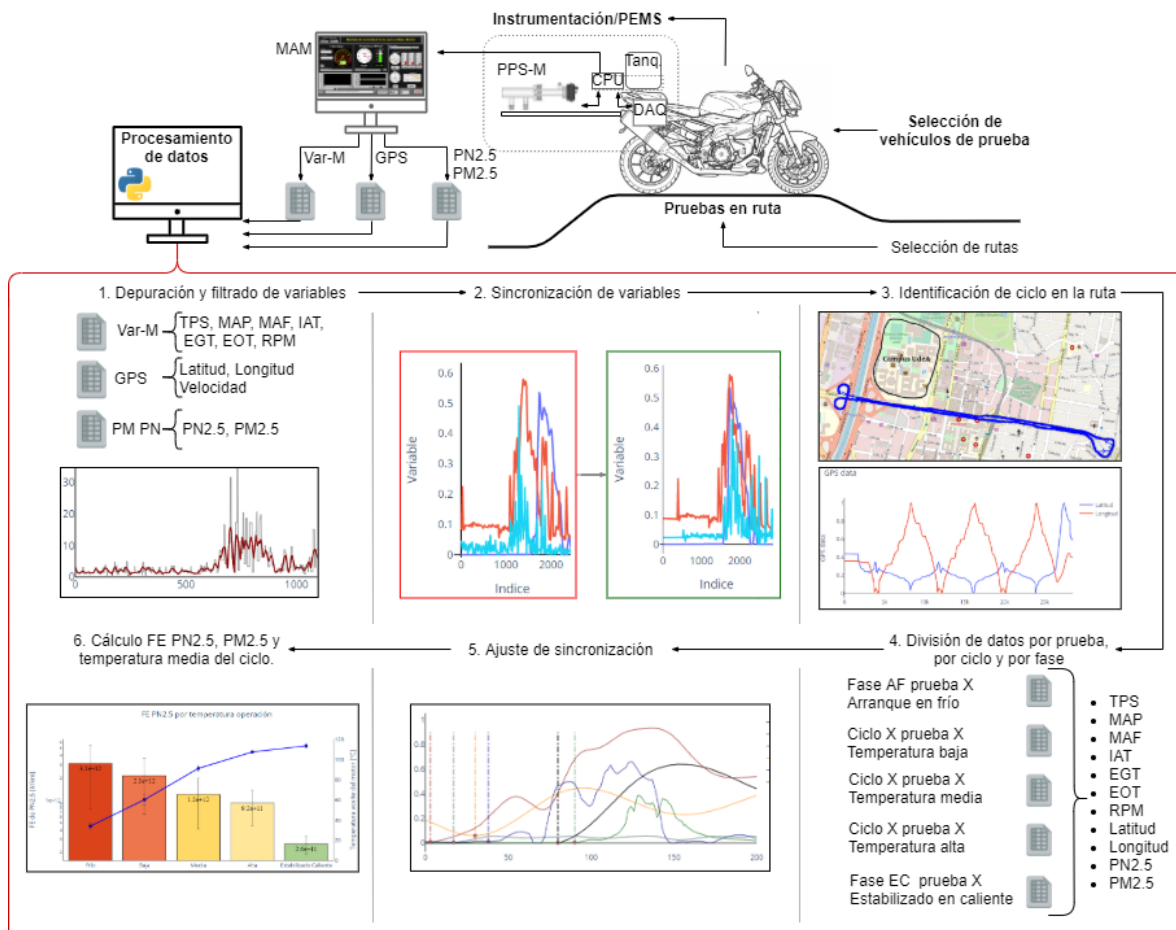


Figura 2.1. Metodología para analizar el efecto de la temperatura

La metodología está integrada por tres fases principales: la primera corresponde a la selección de motocicletas y al desarrollo de una configuración de instrumentos que permitan la portabilidad confiable y segura de los equipos de medición y almacenamiento de datos de variables medidas, como posición del acelerador (TPS), presión del aire de admisión (MAP), flujo de aire de admisión (MAF), temperatura del aire de admisión (IAT), temperatura de los gases de escape (EGT), temperatura del aceite del motor (EOT), revoluciones del motor (RPM), datos GPS, concentración de número de partículas (PN2.5), y concentración de masa de partículas (PM2.5). La segunda fase consiste en la realización de pruebas en ruta, y la tercera fase corresponde al procesamiento de datos.

Selección de motocicletas e instrumentación

Para las pruebas en ruta se usaron dos motocicletas con motor de cuatro tiempos, con cilindradas de 125 cm³ y 150 cm³, con capacidad para cumplir la norma de emisiones Euro 3, y de dos de las marcas con ensambladoras en la región (tabla 2.1). El cilindraje de estas motocicletas es de interés particular, puesto que se encuentra en el rango de cilindrajes (100 cm³ a 300 cm³), con mayor participación (71,68%) de la flota de motocicletas para el 2.018 [11]. La marca de estas motocicletas es de las más vendidas en el quinquenio 2.011-2.015, y en año 2,017 [2,41]. La norma de emisiones que pueden cumplir estas motocicletas (Euro 3), corresponde al requisito mínimo

exigido por la Ley 1,972 del 18 de julio de 2.019 para la comercialización de motocicletas en Colombia a partir de enero del 2,021 [6]. Finalmente, estos dos vehículos corresponden a las clasificadas en la categoría L3e de la norma Euro 4 y 5, o en la clasificación I de motocicletas de la EPA [4,42].

Tabla 2.1. Motocicletas usadas en las pruebas en ruta

Cilindrada [cm ³]	Modelo	Kilometraje [km]	Suministro de combustible
150	2.015	5.042	Inyección Electrónica – Euro 3
125	2.019	432	Carburador – Euro 3

Una vez identificadas y provistas cada una de las motocicletas, se procedió a desarrollar una configuración de los equipos que integrarían el PEMS. En la figura 2.2 se presentan tres versiones del PEMS configurado para motocicletas.



Figura 2.2. Versiones PEMS

La versión 1 del PEMS se configuró con los equipos utilizados en vehículos de carretera (automóviles). Esta configuración confiable y con tiempo de prueba prolongado, tuvo como falencia el sobrepeso ocasionado por el volumen y robustez de los equipos. Con el objeto de aumentar la portabilidad del PEMS, se configuró la versión 2. Esta es más compacta, se disminuye el tiempo de prueba con suministro limitado de aire, y se cambia la fuente de suministro eléctrico por un generador a gasolina compacto, disminuyendo aún más el peso del PEMS. Con esta configuración hubo inconvenientes con el ruido electromagnético del generador, el cual interfería con la operación de los sistemas electrónicos del PEMS. La versión final reemplazó el sistema de suministro eléctrico. En la figura 2.3 se presenta el esquema de la instrumentación que constituye el PEMS usado para pruebas en ruta con motocicletas (versión 3).

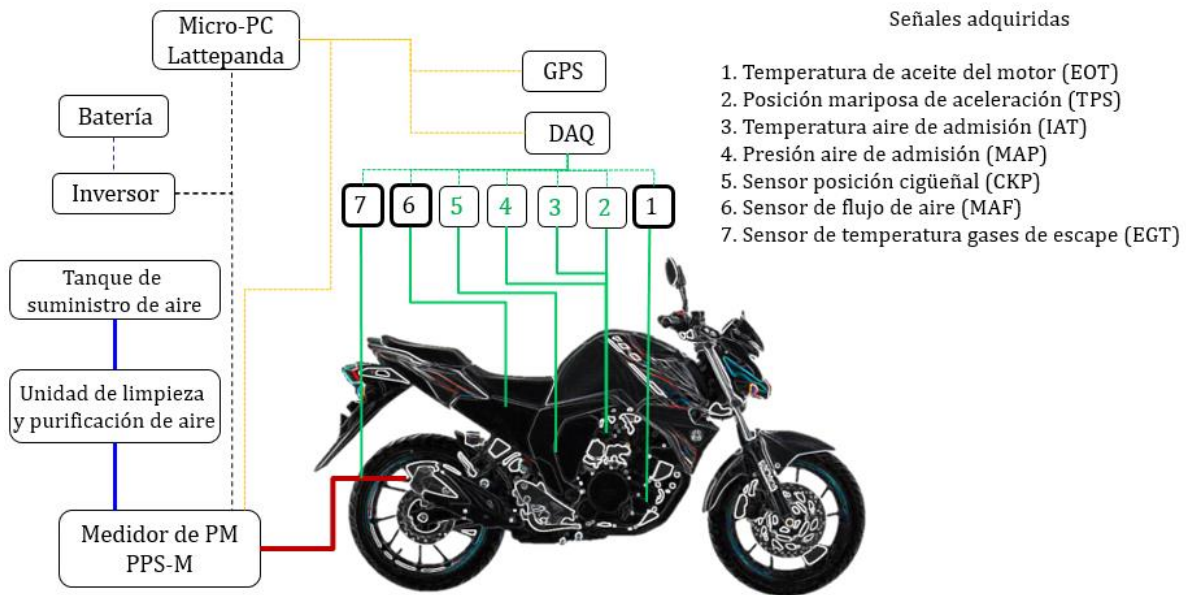


Figura 2.3. Instrumentación instalada en motocicletas para prueba en ruta

EL PEMS se divide en 4 subsistemas interconectados: El subsistema 1 de suministro eléctrico, está conformado por una batería de 12 V y 1.000 Ah, de ácido-plomo, la cual se conecta a un inversor de 600 W, de 12 V CC a 110 V CA. El subsistema 2 encargado de la adquisición de datos de las variables de operación de la motocicleta y de conducción. Éste está compuesto por una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), un sistema de posicionamiento global (GPS), y por sensores instalados en la motocicleta (EOT, TPS, IAT, MAP, CKP, MAF, EGT). El sensor EOT (termopar tipo K), se instaló en contacto directo con el aceite del motor. El sensor EGT (termopar tipo K), se instaló en el conducto que transporta los gases de escape al sensor de partículas. Para el caso la motocicleta con inyección electrónica, se adquieren las señales de sus sensores originales: IAT, MAP, TPS, y CKP. Para el caso de la motocicleta con carburador se adquirió únicamente la señal CPK. El sensor MAF de hilo caliente se instaló en el sistema de admisión, entre el cuerpo de aceleración o carburador, y el filtro de aire.

Debido a que los sistemas de inyección electrónica de combustible en motocicletas comerciales en Colombia no incorporan sensor MAF, no fue posible usar un MAF exclusivo para motocicletas. Por lo tanto, se usó un MAF de automóvil. Para realizar la caracterización del sensor MAF, se instaló en serie con respecto al sensor de flujo de aire del sistema de inyección en un motor de aspiración natural a gasolina de 1.600 cm³. Utilizando un escáner se registró para cada valor de flujo el voltaje correspondiente del MAF. En la figura 2.4 se presentan como puntos los datos de flujo de aire y voltajes registrados (puntos de referencia MAF). Se calculó la ecuación característica de la curva para relacionar el voltaje del sensor MAF con el flujo de aire de admisión.

Caracterización sensor MAF

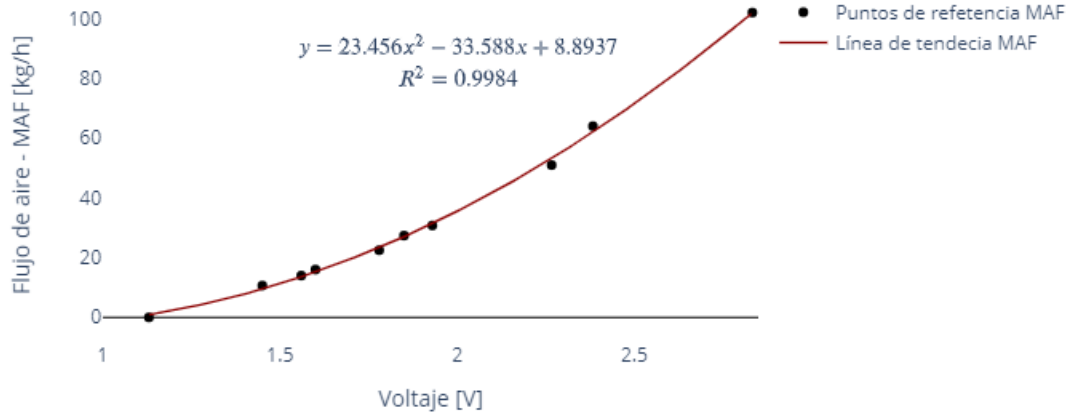


Figura 2.4. Comportamiento del sensor MAF

El subsistema 3 para medir PM_{2.5} y PN_{2.5} está conformado por tres componentes principales, el primero, un cilindro de aire seco comprimido, con capacidad de 2 m³, a una presión de 1.600 PSI (110,31 bar). El segundo corresponde a una unidad de limpieza y purificación de aire, integrada por cinco filtros conectados en serie (separador de neblina, filtro de eliminación de olores, filtro de aire, secador de aire de membrana, y un deshumidificador). El tercero corresponde a un equipo de medida de PN_{2.5} y PM_{2.5}. Este equipo (Pegador M o PPS-M), es de carga electrostática en una única corona de descarga, mediante ionización de una corriente de aire ultra-puro. Este equipo tiene una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Sus especificaciones técnicas se presentan en la tabla 2.2 [43-45].

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas PPS-M

Tamaño de partícula mínimo detectable	0,023 μm
Tamaño de partícula máximo detectable	2,5 μm
Rango de concentración de partículas (masa)	De 1 μg/m ³ a 290 mg/m ³
Rango de concentración de partículas (número)	300 #/cm ³ a 1,3x10 ⁹ #/cm ³

De acuerdo a la revisión bibliográfica, y a los reportes de emisión de PM en motocicletas, se encuentra que el rango de tamaño de las partículas emitidas a la salida del tubo de escape, está entre 0,031 μm y 0,382 μm [2,15,21,37]. Este rango está dentro de la capacidad de medida del PPS-M.

El subsistema 4, de almacenamiento de datos, está conformado por un micro-PC, que ejecuta tanto el programa de control y adquisición de datos del PPS-M, como el programa denominado Módulo

de Actividad de Motocicletas (MAM), el cual procesa la información proveniente de la DAQ y del GPS (figura 2.5). Este programa se desarrolló en el grupo GIMEL usando LabView®.



Figura 2.5. Interfaz de usuario del programa MAM

Como se aprecia en la imagen anterior, el programa MAM almacena datos de velocidad, latitud y longitud del sistema GPS, y además, de variables de operación de la motocicleta, como el flujo de aire de admisión, la presión del aire de admisión, la temperatura de aceite del motor, la temperatura del aire de admisión, la temperatura de gases de escape, la velocidad del motor, y la posición del acelerador.

En la figura 2.6, se presenta la versión 3 del PEMS utilizado durante las pruebas en ruta. EL PEMS cuenta con un tiempo de operación de máximo 100 minutos (limitado por el suministro de aire), una portabilidad que permite realizar las pruebas con seguridad para el conductor, la motocicleta y los equipos, y con un peso de aproximadamente 55,3 kg, el cual no excede al que tendría un pasajero, por lo cual no altera las mediciones.



Figura 2.6. Motocicletas y PEMS en ruta

Una vez instrumentada la motocicleta, y conociendo las limitaciones en el tiempo de medición (impuesto por el suministro de aire), se procedió a seleccionar la ruta para realizar las pruebas de arranque en frío.

Pruebas en ruta

Las rutas de prueba se seleccionaron teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- La cercanía de la ruta con un sitio denominado punto de control (PC). Esto es necesario, entre otras razones, por las limitaciones del PEMS para medir durante tiempos prolongados, pero principalmente por los requerimientos durante la preparación previa y labores posteriores a cada medición (encendido, calentamiento de equipos de medida, verificación y grabación de datos), así como a la seguridad necesaria para el almacenamiento de los vehículos de prueba y del PEMS.
- La ruta debe contener secciones de vía con ascensos, descensos, y terreno llano dentro de un mismo circuito. Esta condición es necesaria para representar las condiciones topográficas de la región metropolitana del Valle de Aburrá.
- Debe ser posible recorrer el circuito al menos tres veces (circuito recorrido con temperatura en frío, media y caliente), sin sobrepasar el tiempo de medición limitado por el suministro de aire (aproximadamente 100 minutos).

Siguiendo estos criterios se usaron las siguientes rutas:

Ruta Calle Barranquilla (en Medellín), según se ve en la figura 2.7. Esta ruta es cercana al campus principal de la Universidad de Antioquia (PC1), con un circuito cerrado de aproximadamente 4.6 km. Esta ruta se usó para las pruebas con la motocicleta de 150 cm³ de cilindrada, durante el mes de febrero del 2.020, periodo pre-pandemia del Covid-19.

Se realizaron un total de 6 pruebas con la motocicleta de 150 cm³, cada una iniciando desde el arranque en frío (al inicio del día), y recorriendo el circuito descrito 3 veces. Cada prueba tiene una duración promedio de 45 minutos y un recorrido promedio de 16,3 km (comprende 3 ciclos o circuitos).



Figura 2.7. Ruta 1: Calle Barranquilla en Medellín

Debido a que durante la pandemia del Covid-19 el ingreso a las instalaciones de la Universidad de Antioquia estuvo restringido, fue necesario seleccionar una nueva ruta de pruebas para la motocicleta de 125 cm³ de cilindrada. Se seleccionó una ruta con un punto de control conveniente (PC2), como se muestra en la figura 2.8. Esta ruta está formada por un circuito cerrado de 2,9 km en la comuna Villa Hermosa (en Medellín), ente los barrios El Pinal y Boston. En esta ruta se realizaron las pruebas de la motocicleta de 125 cm³ de cilindrada, durante el mes de agosto del 2.020. Periodo de pandemia del Covid-19.

Se realizaron un total de 5 pruebas con la motocicleta de 125 cm³, cada una iniciando desde el arranque en frío, y recorriendo 3 veces el circuito descrito. El recorrido total en cada prueba fue de aproximadamente 9,5 km, con una duración media de 35 minutos.

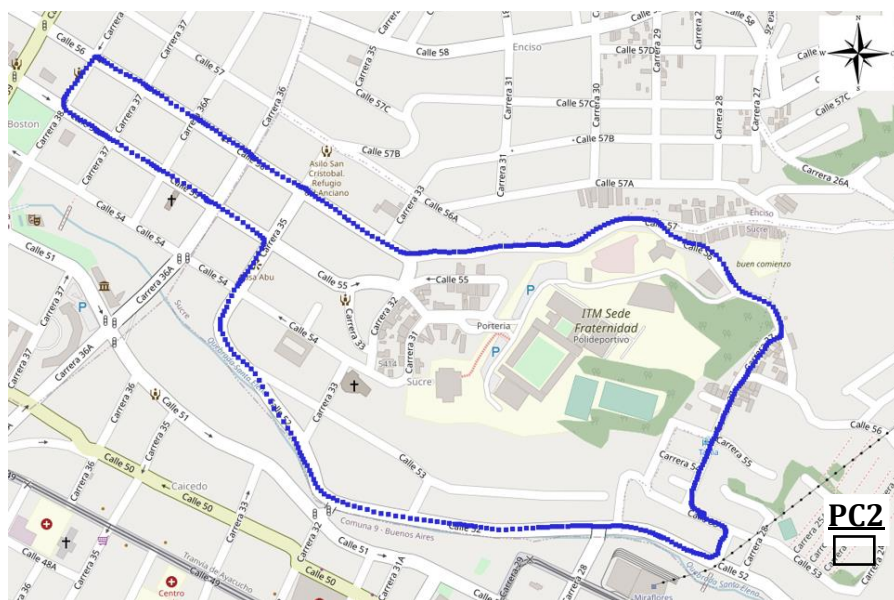


Figura 2.8. Ruta 2: Comuna Villa Hermosa en Medellín

Procesamiento de datos: Pruebas en ruta

Como se observa en la figura 2.1, el procesamiento de datos consta de seis pasos que se describen a continuación:

1. Depuración y filtrado de variables:

En las pruebas en ruta se midieron y almacenaron datos con una frecuencia de 10 Hz, para variables como temperatura de gases de escape, temperatura de aceite de motor, posición de la mariposa de aceleración, revoluciones del motor, flujo másico de aire de admisión, concentración de PN2.5 y PM2.5, y variables suministradas por el GPS (latitud, longitud, y velocidad). Dadas las condiciones de operación, es posible encontrar datos atípicos y/o desconexiones temporales de algunos sensores, lo que hace necesaria una fase de depuración y filtrado.

En la figura 2.9 se presentan los resultados de la depuración y el filtrado de la señal de flujo másico del aire de admisión, medido con el sensor de hilo caliente (MAF).

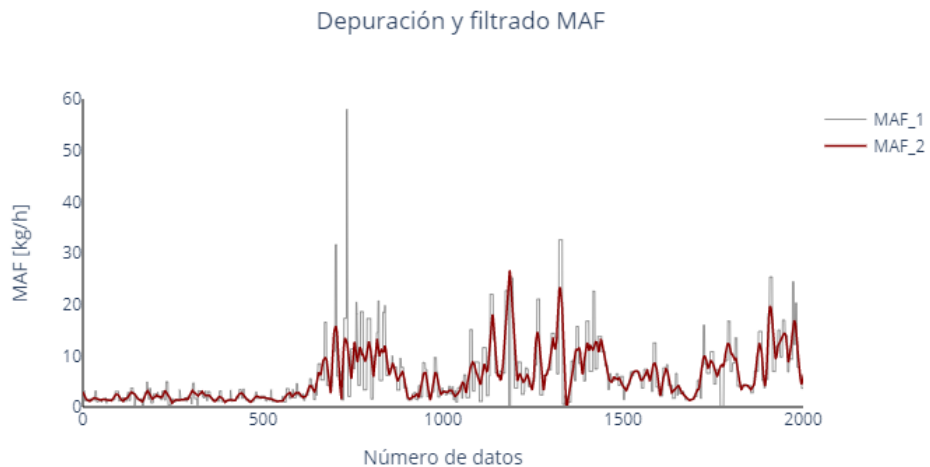


Figura 2.9. Depuración y filtrado de la señal del MAF

En esta figura se presenta en color rojo la variable final del flujo de aire de admisión, luego de la depuración y filtrado. Se usa un filtro Savitzky–Golay con una ventana de 31 datos y un polinomio de tercer orden [46]. Además, se reemplazan los datos negativos por el valor correspondiente al flujo de aire en ralentí del motor. Se aprecia como la depuración y filtrado mitiga el ruido de la medición.

En la figura 2.10 se presenta el resultado del procesamiento de la señal de EGT, para una de las pruebas realizadas. Se usó dos veces consecutivas un filtro de Savitzky–Golay con una ventana de 101 datos, y un polinomio de tercer orden. La señal bruta [EGT_1] está en color gris, y la señal

procesada [EGT_2] está en color rojo. Se observa como el filtro aplicado a la señal permite atenuar el ruido o inestabilidad de la medición, permitiendo usar la señal resultante para establecer la temperatura de los gases de escape en cada instante.

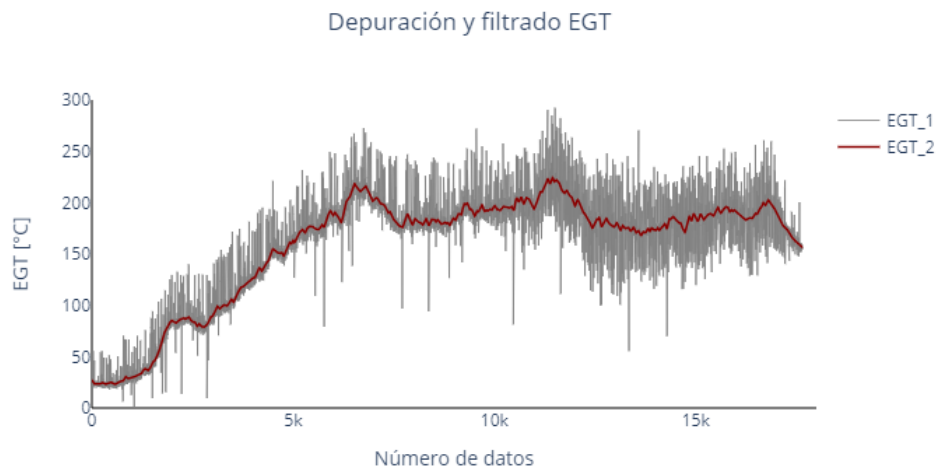


Figura 2.10. Filtrado EGT

2. Sincronización:

Es necesario realizar un ajuste temporal de las variables medidas a los eventos de conducción que las generan, y así poder concluir con confiabilidad sobre los efectos de las variables en las emisiones. Cada una de las variables se normaliza respecto a su valor máximo, con el fin de evaluar de manera gráfica y en la misma escala, el desfase temporal de las diferentes señales. De este modo se pueden sincronizar las variables de operación, emisiones y el primer incremento significativo de velocidad del vehículo.

En la figura 2.11 se presentan las variables a sincronizar. La velocidad (Vel) es la variable de referencia (color negro), las revoluciones del motor (RPM) se muestran en color rojo, la temperatura del aceite del motor (EOT) en gris, la temperatura de los gases de escape (EGT) en amarillo, el flujo de aire de admisión (MAF) en azul, y la concentración de numero de partículas (PN) en verde. Se aprecia que las variables no responden a los eventos de la conducción, lo que hace necesaria la fase de sincronización.

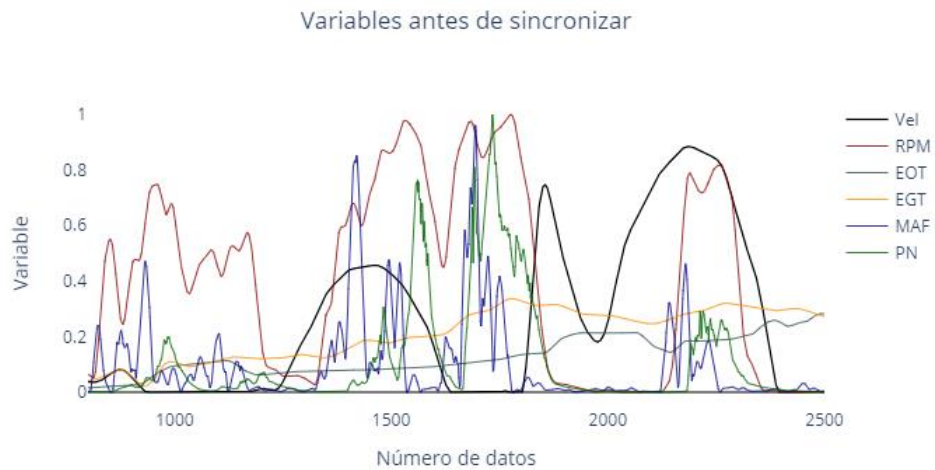


Figura 2.11. Variables antes de sincronizar

Para realizar la sincronización de las variables, es necesario identificar los índices de aquellos puntos que deben coincidir, de manera tal que las variables medidas de la motocicleta respondan a los eventos de conducción. En la figura 2.12 se presentan los índices identificados para la sincronización de una prueba realizada en la calle Barranquilla. Los índices están representados por una circunferencia en color naranja y una línea vertical punteada del color respectivo de cada variable. La sincronización consiste en hacer coincidir los índices de todas las variables con aquél de la velocidad de la motocicleta.

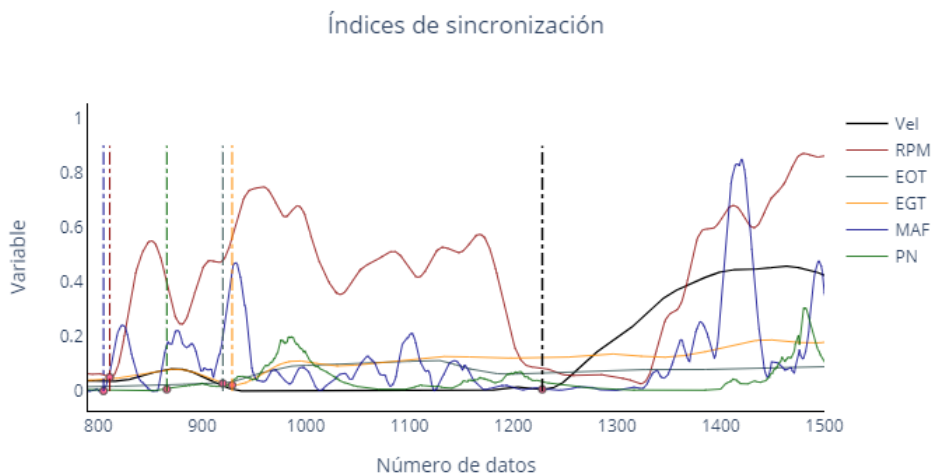


Figura 2.12. Índices para sincronización

El efecto de la sincronización se presenta en la figura 2.13. Es evidente que el comportamiento de las variables de operación y emisiones de la motocicleta responden a los eventos de conducción, por lo tanto, es posible relacionar los mismos.

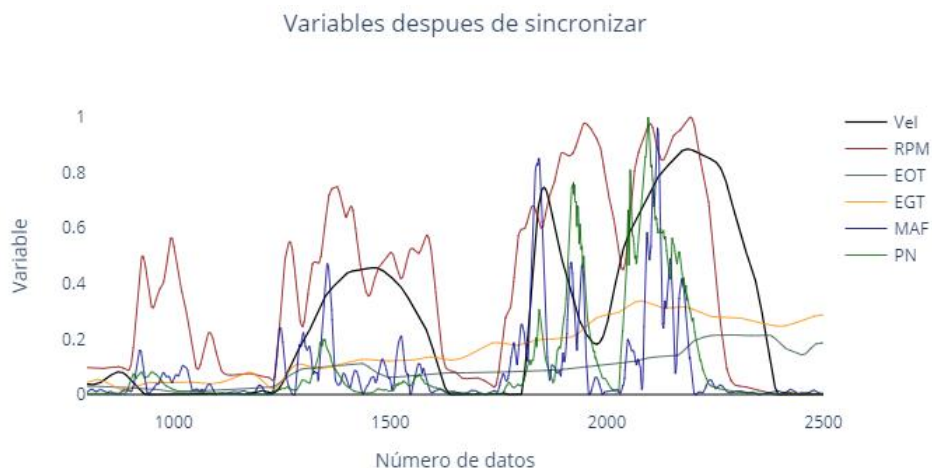


Figura 2.13. Variables después de sincronizar

3. Identificación de ciclos en una ruta:

En las figuras 2.14 y 2.15 se presentan normalizados los datos de latitud, longitud y velocidad de dos pruebas realizadas, una en la comuna Villa Hermosa y la otra en la calle Barranquilla. Para cada ruta recorrida se identificaron los fragmentos que se repiten. Además, en cada punto inicial y final de los fragmentos se tiene un instante de velocidad cero, que permite identificar un punto de partida y uno de fin. Estos fragmentos se denominan ciclos (Sección B, C, y D de las figuras 2.14 y 2.15), y pueden variar entre pruebas, debido a cambios en el sentido de recorrido, o por las condiciones de tráfico.

Además, se identifica el recorrido anterior al primer ciclo como un recorrido donde la temperatura del motor de la motocicleta es la más baja dado que se inicia la prueba desde el arranque en frío (sección A de las figuras 2.14 y 2.15), esta parte de la prueba se denomina segmento de trabajo en frío. Así mismo, el recorrido posterior al último ciclo, donde la temperatura del motor ha de ser la más alta, se denomina como segmento de trabajo estabilizado en caliente (sección E de las figuras 2.14 y 2.15).

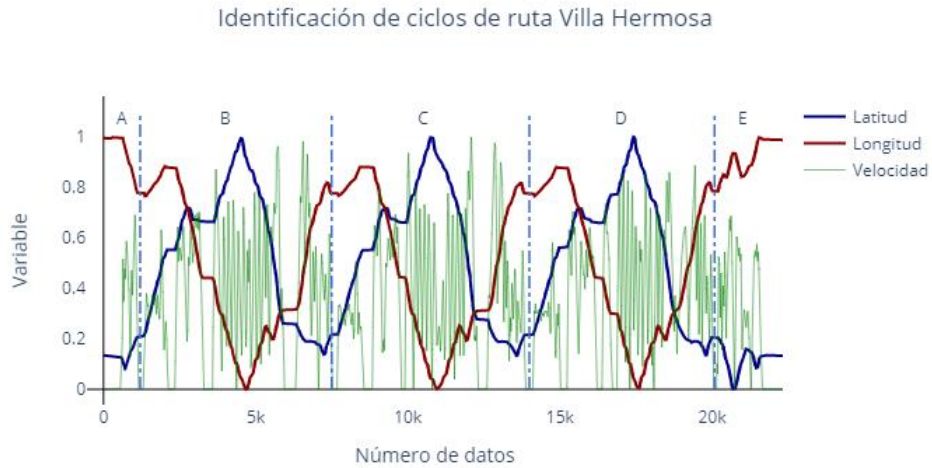


Figura 2.14. Ciclos y segmentos de prueba en ruta – Villa Hermosa

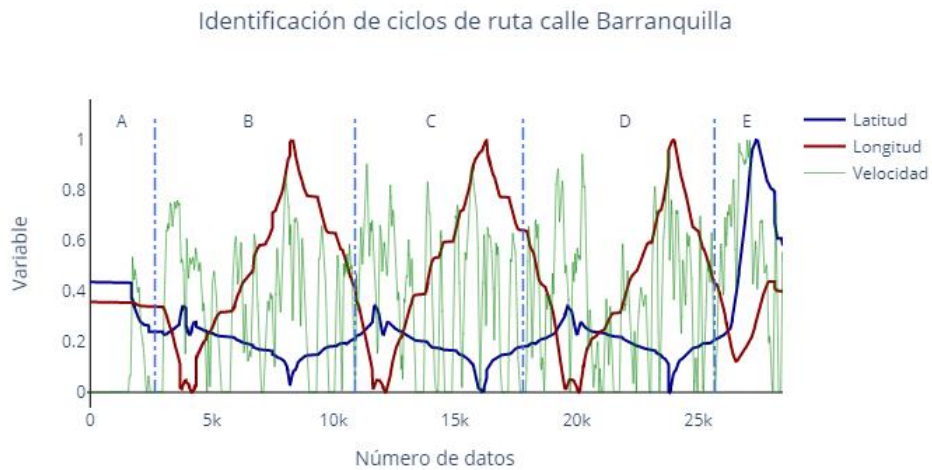


Figura 2.15. Ciclos y segmentos de prueba en ruta - calle Barranquilla

De las cinco pruebas realizadas en la comuna Villa Hermosa (figura 2.14) se obtuvieron cinco segmentos correspondientes a la sección A (segmento de trabajo en frío), cinco ciclos de trabajo correspondientes a la sección B (ciclo 1), cinco ciclos de trabajo correspondientes a la sección C (ciclo 2), cuatro ciclos de trabajo correspondientes a la sección D (ciclo 3), y cuatro segmentos de trabajo correspondientes a la sección E (segmento de trabajo estabilizado en caliente).

De las cinco pruebas en ruta realizadas en la calle Barranquilla (figura 2.15), se obtuvieron tres segmentos correspondientes a la sección A (segmento de trabajo en frío), cinco ciclos de trabajo correspondientes a la sección B (ciclo 1), cuatro ciclos de trabajo correspondientes a la sección C (ciclo 2), tres ciclos de trabajo correspondientes a la sección D (ciclo 3), y tres segmentos de trabajo correspondientes a la sección E (segmento de trabajo estabilizado en caliente).

La diferencia entre el número de segmentos disponibles para el procesamiento radica en que durante las pruebas ocurrieron desconexiones temporales del PEMS o fallos en los programas de grabación de datos, lo que produjo que algunas pruebas quedaran incompletas.

4. División de datos por ciclo:

Una vez identificados los puntos de inicio y fin de los ciclos o segmentos de ruta, dados por los índices de las coordenadas de latitud, longitud, y velocidad cero, se dividen los datos de cada prueba. Luego, se realiza un análisis particular de lo acontecido en el rango de temperatura propio de cada ciclo o segmento de ruta.

La tabla 2.3, presenta algunos parámetros del perfil velocidad-tiempo de los segmentos de trabajo en frío de la ruta Villa Hermosa (VH).

Tabla 2.3. Variables segmento de trabajo en frío ruta Villa Hermosa

Prueba	Distancia [m]	Duración [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima [km/h]	Ralentí [%]
P1_VH	294,2	132,0	8,0	28,6	24,6
P2_VH	292,9	175,0	6,0	25,1	34,5
P3_VH	259,9	155,0	6,0	25,9	35,7
P4_VH	285,8	200,0	5,1	33,7	43,7
P5_VH	278,1	120,0	8,3	31,1	22,4

Para los segmentos de trabajo en frío de la ruta Villa Hermosa, se encuentra que la distancia recorrida promedio es de $282,2 \pm 6,2$ m, la duración promedio es de $156,4 \pm 14,4$ s, la velocidad promedio $6,7 \pm 0,6$ km/h, la velocidad máxima promedio de $28,9 \pm 1,6$ km/h, y el tiempo en ralentí promedio de 32,2 % de la duración total del segmento. Los tiempos en ralentí altos se deben a que durante los primeros segundos antes de iniciar el recorrido, se realizaba validación de que los sistemas del PEMS estuvieran operativos luego del encendido del motor de la motocicleta.

La tabla 2.4, presenta algunos parámetros del perfil velocidad-tiempo de los segmentos de trabajo en frío de la ruta calle Barranquilla (CB).

Tabla 2.4. Variables segmento de trabajo en frío ruta calle Barranquilla

Prueba	Distancia [m]	Duración [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima [km/h]	Ralentí [%]
P1_CB	338,8	265,9	4,5	31,4	69,6
P3_CB	352,7	180,9	7,0	45,7	69,2
P5_CB	244,0	170,9	5,1	30,7	57,7

Los segmentos de trabajo en frío de la ruta calle Barranquilla, presentan distancias recorridas promedio de $311,9 \pm 34,14$ m, duración promedio $205,9 \pm 3,0,1$ s, velocidad promedio de $5,6 \pm 0,73$ km/h, velocidad máxima promedio de $35,9 \pm 4,8$ km/h, y un ralentí promedio de 65.5%. El alto tiempo en ralentí para este segmento radica, además, del tiempo preparación para la prueba, en

que, la avenida ferrocarril presenta dos semáforos desde la salida de la portería de la Universidad de Antioquia hasta la avenida calle Barranquilla. Estos semáforos normalmente se cogieron en rojo.

Se presentan similitudes en las variables de Los segmentos de trabajo en frío de la ruta calle Barranquilla y de la ruta Villa Hermosa, principalmente en la distancia recorrida con diferencias de 9.5%, y en la velocidad promedio con diferencias del 16.4%. La velocidad máxima, y la duración de los recorridos, con diferencias del 24,2% y del 31,6% respectivamente, responden a que la ruta del segmento de trabajo en frío de la ruta barranquilla, es una avenida principal (avenida ferrocarril) con semáforos, mientras que el segmento de trabajo en frío de la ruta Villa Hermosa (calle 52) es una calle de bajo flujo vehicular, sin semáforos.

La tabla 2.5, presenta algunos parámetros del perfil velocidad-tiempo de los segmentos de trabajo estabilizado en caliente de la ruta Villa Hermosa.

Tabla 2.5. Variables segmento de trabajo estabilizado en caliente ruta Villa Hermosa

Prueba	Distancia [m]	Duración [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima [km/h]	Ralentí [%]
P1_VH	459,8	92,9	17,8	31,3	5,8
P3_VH	512,0	101,8	18,1	30,5	1,9
P4_VH	532,1	116,6	16,4	30,5	2,4
P5_VH	469,7	100,1	16,8	30,9	8,1

Para los segmentos de trabajo estabilizado en caliente de la ruta Villa Hermosa, se encuentra que la distancia recorrida promedio es de $493 \pm 17,1$ m, la duración promedio es de 102 ± 5 s, la velocidad promedio $17.3 \pm 0,4$ km/h, la velocidad máxima promedio 30.8 ± 0.2 km/h, y el tiempo en ralentí promedio de 4,5 %.

La tabla 2.6 presenta algunos parámetros del perfil velocidad-tiempo de los segmentos de trabajo estabilizado en caliente de la ruta calle Barranquilla.

Tabla 2.6. Variables segmento de trabajo estabilizado en caliente ruta Calle Barranquilla

Prueba	Distancia [m]	Duración [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima [km/h]	Ralentí [%]
P1_CB	2.442,2	259,9	33,8	58,6	1,9
P2_CB	2.611,3	323,1	29,0	62,7	22,7
P5_CB	2.812,1	383,9	26,3	51,3	10,2

Los segmentos de trabajo estabilizado en caliente se recorrieron en un tramo de la ruta nacional 62, para luego desviarse por la calle 77, y finalmente unirse a la carrera 53 (avenida ferrocarril), para el ingreso al punto de control PC2. Este tramo, principalmente sobre la ruta nacional 62, no presenta semáforos, ni reductores de velocidad. Por tal motivo, los segmentos de trabajo estabilizado en caliente presentan mayores velocidades promedio (entre 26,3 km/h a 33,8 km/h).

Dado que los ciclos son circuitos de la ruta que se repiten, en la tabla 2.7 se presentan los promedios de algunos parámetros de los perfiles de velocidad-tiempo de las pruebas que componen cada circuito de la comuna Villa Hermosa.

Tabla 2.7. Variables ciclos 1 a 3 ruta Villa Hermosa

Ciclo	Distancia promedio [m]	Duración promedio [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima promedio [km/h]	Ralentí promedio [%]
C1_VH	2.938,4	615,9	17,2	42,5	11,6
C2_VH	2.949,7	608,7	17,5	43,7	10,9
C3_VH	2.886,5	618,2	16,8	42,7	10,9

Los ciclos 1 a 3 de la comuna Villa Hermosa recorren una distancia promedio de 2.924,9±19,4 m, una duración promedio de 614,3±2,8 s, una velocidad promedio de 17,2±0,2 km/h, una velocidad máxima promedio de 42,9±0,4 km/h, y un tiempo en ralentí promedio de 11,1%.

La tabla 2.8, presenta los promedios de las variables de los perfiles de velocidad-tiempo de las pruebas que componen cada circuito de la calle Barranquilla.

Tabla 2.8. Variables ciclos 1 a 3 ruta calle Barranquilla

Ciclo	Distancia promedio [m]	Duración promedio [s]	Velocidad promedio [km/h]	Velocidad máxima promedio [km/h]	Ralentí promedio [%]
C1_CB	4.256,6	681,1	22,6	62,1	24,8
C2_CB	4.597,1	711,9	23,6	66,7	19,3
C3_CB	4.724,8	794,2	20,9	59,8	21,5

Los ciclos 1 a 3 de la calle Barranquilla recorren una distancia promedio de 4.526,2±139,7 m, una duración promedio de 729,0±33,7 s, una velocidad promedio de 22,41±0,8 km/h, una velocidad máxima promedio de 62,94±2,0 km/h, y un tiempo en ralentí promedio de 21,9 %.

Las dispersiones reducidas entre las variables promedio de cada circuito tanto de las pruebas en la ruta Villa Hermosa (C1_VH a C3_VH), y de la ruta calle Barranquilla (C1_CB a C3_CB). permite relacionar las emisiones particulares de cada ciclo, respecto al valor medio de la temperatura del aceite del motor en cada ciclo.

5. Ajuste de sincronización:

Después de separar los datos por segmentos y ciclos, se procede con un ajuste en la sincronización (segunda sincronización). En la figura 2.16 se presentan las variables de uno de los ciclos de prueba en la ruta calle Barranquilla antes de la segunda sincronización. Se aprecia que persiste un desfase entre las variables, esto es debido a que la sincronización inicial solo se realiza con el primer evento significativo de velocidad, sin embargo, las variables suelen tender a desfasarse durante la prueba. La división de la prueba en segmentos o ciclos, permite realizar una segunda sincronización, que asegura el acople de las variables con el primer evento significativo de velocidad del respectivo segmento.

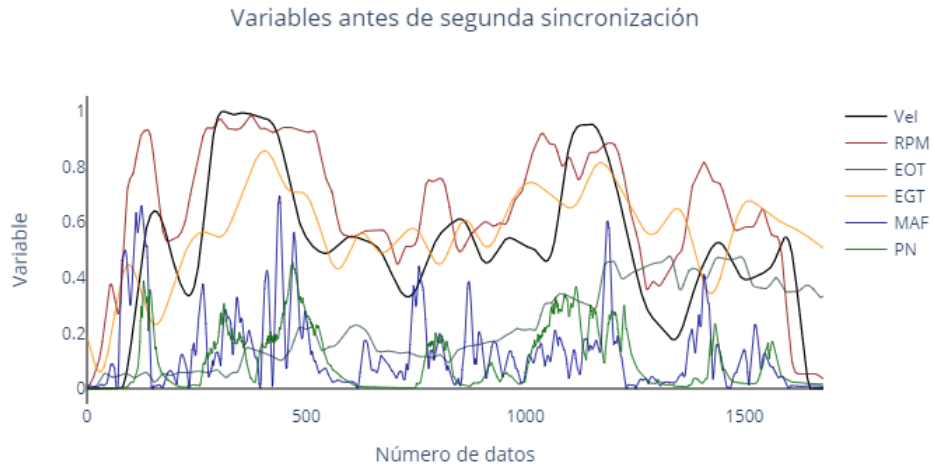


Figura 2.16. Variables antes de sincronización

La identificación de los índices para la segunda sincronización del ciclo de la figura anterior, se presentan en la figura 2.17. Los índices están resaltados por una circunferencia en rojo, y una línea punteada del color respectivo de cada variable.

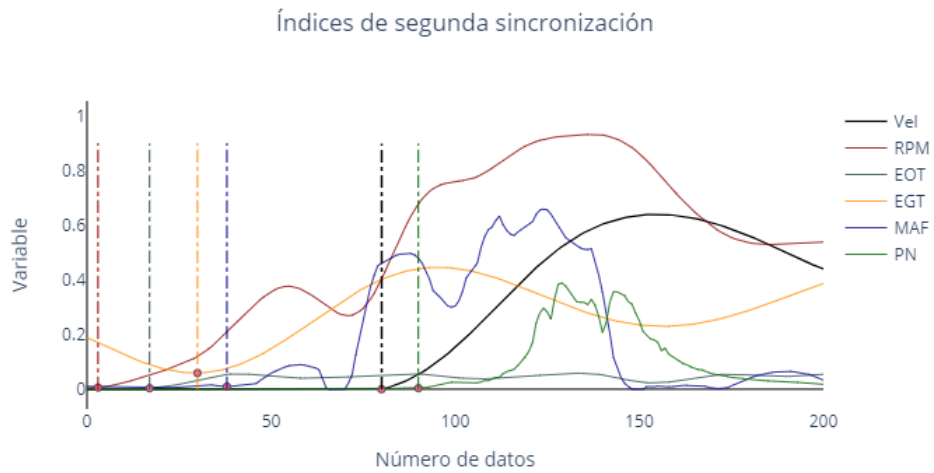


Figura 2.17. Índices para sincronización

En la figura 2.18 se presenta el efecto de la segunda sincronización. Donde las variables de la motocicleta y las emisiones, responden a los eventos de conducción dados el perfil de velocidad del vehículo.

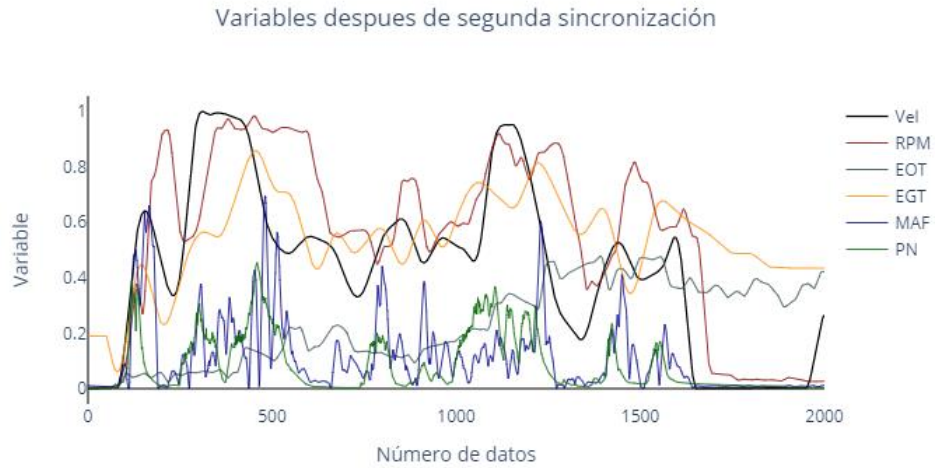


Figura 2.18. Variables después de ajuste de sincronización

6. Determinación del factor de emisión por rango de temperatura de operación:

La temperatura de operación del motor de cada ciclo o segmento se establece como el valor medio de la temperatura del aceite del motor, dado por la siguiente expresión:

$$\bar{T} = \frac{1}{t_n - t_0} \int_{t_0}^{t_n} T dt \quad (2.1)$$

El factor de emisión de PN2.5, dado en número de partículas por kilómetro recorrido para cada ciclo o segmento se determina de la siguiente forma:

$$FE_{PN} = \frac{PN \text{ [#]}}{\Delta X \text{ [km]}} \quad (2.2)$$

La distancia recorrida durante el ciclo o segmento se calcula integrando la velocidad medida por GPS en kilómetros por hora respecto al tiempo.

$$\Delta X = \int_0^n v \text{ [m/s]} dt \quad (2.3)$$

El número de partículas de un segmento o ciclo se calcula integrando flujo de partículas por segundo respecto al tiempo.

$$PN = \int_0^n \dot{PN} \text{ [# / s]} dt \quad (2.4)$$

El flujo de partículas por segundo está dado por el producto entre el número de partículas en cada centímetro cúbico (concentración) y el flujo volumétrico de los gases de escape, en centímetros cúbicos por segundo.

$$\dot{PN} = cPN \text{ [#}/cm^3] * \dot{V}_g [cm^3/s] \quad (2.5)$$

La concentración de número de partículas es una variable medida directamente por el sensor de partículas PPS-M.

El flujo volumétrico de los gases de escape se define como el cociente del flujo másico y la densidad de los gases de escape.

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{m}_g [kg/h]}{\rho_g [kg/m^3]} \quad (2.6)$$

La densidad de los gases de escape en cada instante de tiempo se calcula a partir de la ecuación de estado de gases ideales, usando la temperatura medida de los gases de escape en cada instante de tiempo, dada por el sensor EGT:

$$\rho_g(t) = \frac{P_g [kPa]}{R_g [kJ/kg * K] * T_g [K](t)} \quad (2.7)$$

Debido a que la presión absoluta de los gases de escape no se pudo medir, se usa la ecuación 2.8, donde se utiliza la presión atmosférica de la región, y una sobrepresión estimada. Esta sobrepresión ha de ser ligeramente superior a la presión atmosférica para que puedan salir los productos de la combustión por el tubo de escape.

$$P_g = P_{atm \text{ Medellín}} + P_s = 8.5113 [Pa] + 2.500 [Pa] = 87,613 [kPa] \quad (2.8)$$

La constante de gas de los productos de la combustión ($R_g = 0,293 \text{ kJ}/kgK$) se toma como constante [47].

El flujo másico de los gases de escape se calcula por medio del balance de masa:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_c \quad (2.9)$$

EL flujo másico de aire de admisión (\dot{m}_a) se midió con el sensor MAF.

El flujo másico de combustible (\dot{m}_c), se estima al considerar que el dosado es aproximadamente estequiométrico (ecuación 2.10).

$$F_{st} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (2.10)$$

Se calcula el dosado estequiométrico (F_{st}) con la ecuación 2.11 [1]. Se utiliza la fórmula química la gasolina con 10 % de etanol ($C_{5,9606}H_{14,714}O_{0,20782}$), para el cálculo del dosado estequiométrico [47].

$$F_{st} = \frac{\left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}\right) (PM_{O_2} + 3,76PM_{N_2})}{nPM_C + mPM_H + pPM_O} \quad (2.11)$$

Se usa el dosado estequiométrico ($F_{st} = 14,59$) en la ecuación para el cálculo del flujo másico de los gases de escape:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a [kg/h] + \frac{\dot{m}_a [kg/h]}{F_{st}} \quad (2.12)$$

El factor de emisión de PM2.5 en mg por kilómetro recorrido para cada ciclo o segmento, se determina como:

$$FE_{PM} = \frac{PM [mg]}{\Delta X [km]} \quad (2.13)$$

La masa de material particulado de un segmento o ciclo se calcula integrando el flujo de másico de material particulado por segundo respecto al tiempo.

$$PM = \int_0^n \dot{PM} [mg/s] dt \quad (2.14)$$

El flujo másico de material particulado por segundo está dado por el producto entre la masa de partículas en cada centímetro cúbico (concentración) y el flujo volumétrico de los gases de escape en centímetros cúbicos por segundo.

$$\dot{PM} = cPM [mg/cm^3] * \dot{V}_g [cm^3/s] \quad (2.15)$$

La concentración másica de partículas es una variable medida por el sensor de partículas PPS-M.

Para cada variable presentada, se indica mediante barras de error la desviación estándar de la media, dada por el cociente entre la desviación estándar (σ) y la raíz cuadrada del número de mediciones (N).

$$\sigma_{media} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.16)$$

Resultados

Temperatura de operación, distancia recorrida y duración de los segmentos y ciclos de operación

En la figura 2.19 se presenta el comportamiento de la temperatura para los diferentes segmentos y ciclos de trabajo. Los segmentos (frío y estabilizado en caliente) y los ciclos de trabajo (1, 2 y 3), corresponden a una determinada temperatura de operación del motor. En el segmento de trabajo en frío, la temperatura promedio del motor es de $33,1 \pm 3,6$ °C. Además, esta fase incluye los arranques en frío con temperatura promedio de $30,5 \pm 4,45$ °C. El ciclo 1 con temperatura promedio de $60,1 \pm 5,7$ °C, se denomina ciclo con temperatura de operación baja. El ciclo 2, con temperatura promedio de $91,2 \pm 3,1$ °C, se denomina ciclo con temperatura de operación media, y el ciclo 3, con temperatura promedio de $107,5 \pm 0,9$ °C, se denomina temperatura de operación alta. En el segmento de trabajo estabilizado en caliente, la temperatura promedio del motor es de $113,6 \pm 2,2$ °C.

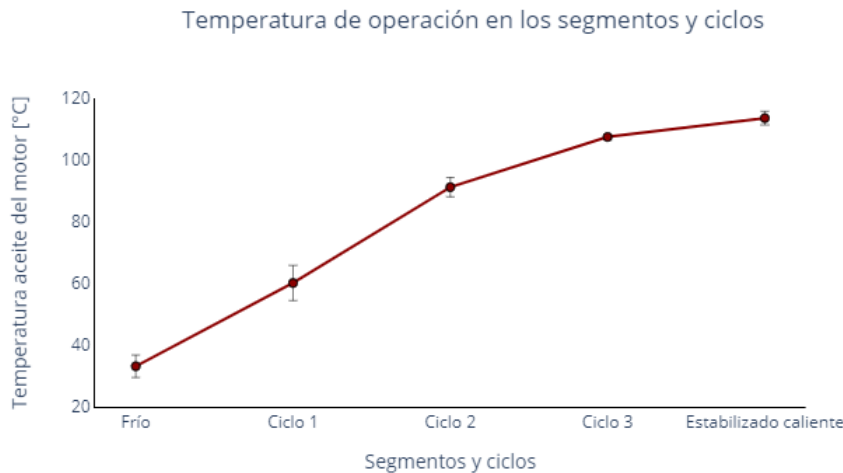


Figura 2.19. Temperatura de motor respecto a segmentos y ciclos

Se observa que es mayor el incremento de temperatura entre el segmento de trabajo en frío y el ciclo 1, y entre éste y el ciclo 2, respecto al incremento registrado entre el ciclo 2 y el 3. Los cambios de temperatura son aún menores entre el ciclo 3 y la fase de trabajo estabilizado en caliente. Esto se debe a que los sistemas de alimentación de combustible tienen como estrategia de operación incrementar la alimentación de combustible con el objeto de que el motor alcance rápidamente altas temperaturas de operación, luego la temperatura tiende a estabilizarse durante el resto del tiempo de uso del vehículo.

La figura 2.20 presenta la distancia acumulada promedio y la duración acumulada promedio para cada segmento y ciclo de trabajo desde el inicio de las pruebas en ruta. La distancia acumulada en km se refiere al recorrido desde el inicio de las pruebas hasta alcanzar la temperatura promedio

representativa de cada segmento o ciclo de trabajo. La duración acumulada en minutos se refiere al tiempo transcurrido desde el inicio de las pruebas hasta alcanzar la temperatura promedio respectiva de cada segmento o ciclo de trabajo.

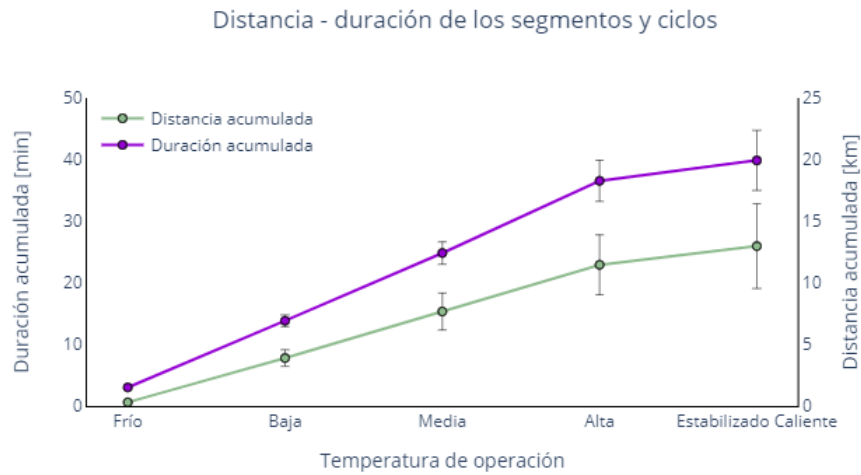


Figura 2.20. Distancia y duración respecto a la temperatura de operación de recorridos

Los arranques en frío, con temperatura hasta 33 °C, son aquellos con duración de recorridos hasta alrededor de 3,02 minutos y una distancia recorrida hasta cerca de 0,30 km. La temperatura de operación baja (aproximadamente 60,1 °C), se alcanza en recorridos con duración hasta alrededor de 14,15 minutos y una distancia recorrida hasta cerca de 3,89 km. La temperatura de operación media (aproximadamente 91,2 °C), se alcanza en recorridos con duración hasta alrededor de 24,8 minutos y una distancia recorrida hasta cerca de 7,66 km. La temperatura de operación alta (aproximadamente 107,5 °C), se alcanza en recorridos con duración hasta alrededor de 36,55 minutos y una distancia recorrida hasta cerca de 11,46 km. Finalmente, una temperatura de operación estabilizada en caliente (aproximadamente 113,6 °C), se alcanza en recorridos con duración hasta alrededor de 39,86 minutos y una distancia recorrida hasta cerca de 12,97 km. La duración acumulada y la distancia recorrida acumulada de un recorrido o viaje realizado en motocicleta se puede usar para establecer la temperatura de operación alcanzada. Esta relación permite establecer que, si se supone arranque en frío, los 514.845 viajes diarios en motocicletas (67% del total reportado por el AMVA), cuyos recorridos promedio son hasta 6,6 km, y duraciones promedio hasta 21 minutos, no alcanzarían temperaturas de operación altas, y menos aún estabilizadas en caliente.

Efecto de la temperatura en las emisiones de PN2.5 y PM2.5

La figura 2.21 presenta los FE de PN2.5 y PM2.5 de la motocicleta de 150 cm³, para cada temperatura de operación. Se aprecia una relación inversa entre los FE y la temperatura de operación, que se acentúa al comparar los FE entre temperatura de operación en frío

($5,8 \times 10^{12} \pm 2,98 \times 10^{12}$ #/km – PN2.5, y $1,27 \pm 0,65$ mg/km – PM2.5), y la temperatura de operación estabilizada en caliente ($3,3 \times 10^{11} \pm 1,9 \times 10^{11}$ #/km – PN2,5, y $0,07 \pm 0,04$ mg/km – PM2.5).

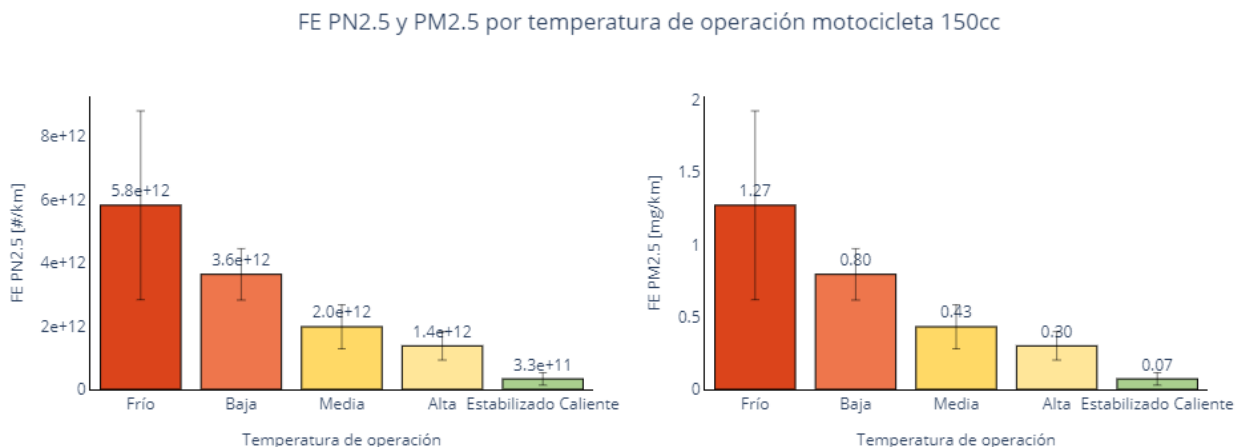


Figura 2.21. Efecto de la temperatura en el FE de PN y PM (motocicleta 150 cm³)

Al evaluar el comportamiento de los FE entre las temperaturas de operación frío, baja, y media, se encuentra que la disminución del FE es de alrededor de 46%, para aumentos de temperatura cercanos al 40 %. Mientras que, para las temperaturas de operación alta y estabilizada en caliente, la temperatura de operación presenta un aumento 5,4%, y el FE disminuye un 76,4%. Se evidencia que durante la etapa de calentamiento del motor los FE se ven afectados significativamente por la temperatura de operación. Una razón posible para este comportamiento es que, a bajas temperaturas de operación, la estrategia del sistema de alimentación de combustible es aumentar la inyección para favorecer el calentamiento del motor. Una vez alcanzada la temperatura de operación en caliente el sistema de inyección entra en operación de lazo cerrado, donde se efectúa corrección de mezcla y control de emisiones. Los FE de PN2.5 y PM2.5 en esta motocicleta presentan una disminución escalonada durante la etapa de calentamiento, lo cual posiblemente esté relacionado con el control preciso de la alimentación de combustible y del sistema de encendido, así como a un aumento gradual en la calidad de la combustión a medida que aumenta la temperatura.

La figura 2.22 presenta los FE de PN2.5 y PM2.5 de la motocicleta de 125 cm³, para cada temperatura de operación. Aunque la relación de los FE es inversa respecto a la temperatura de operación, la disminución del FE de emisión no se presenta de forma sucesiva entre las temperaturas media, alta, y estabilizada en caliente. Esto probablemente se deba al bajo control del carburador en la alimentación de combustible durante el calentamiento del motor.

FE PN2.5 y PM2.5 por temperatura de operación motocicleta 125cc

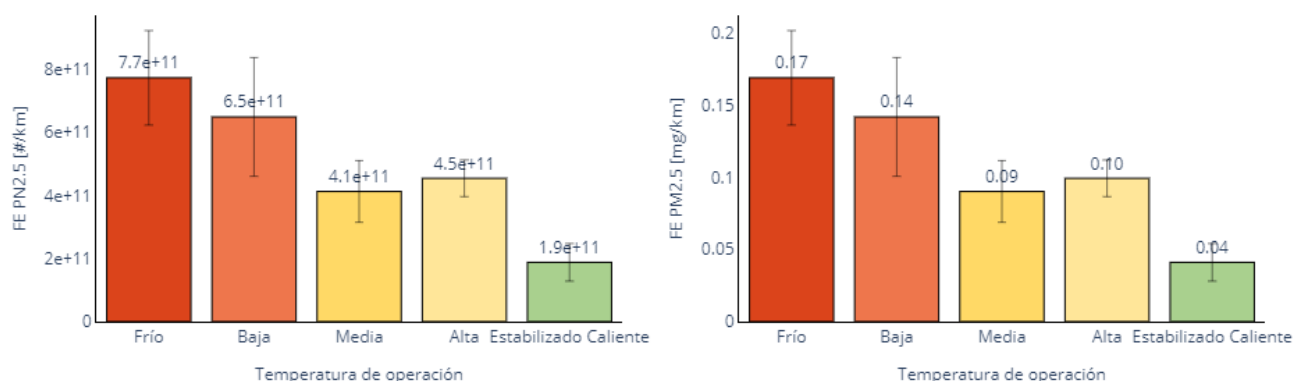


Figura 2.22. Efecto de la temperatura en el FE de PN y PM (motocicleta 125 cm³)

El efecto de la temperatura sobre las emisiones de partículas es evidente al comparar los FE entre la temperatura de operación en frío ($7,7 \times 10^{11} \pm 1,5 \times 10^{11}$ #/km - PN2.5, y $0,17 \pm 0,03$ mg/km - PM2.5) y estabilizado en caliente ($1,9 \times 10^{11} \pm 5,9 \times 10^{10}$ #/km - PN2.5, y $0,04 \pm 0,01$ mg/km - PM2.5).

Los FE de PN2.5 y PM2.5 de la fase de operación estabilizado en caliente de las motocicletas son similares entre sí, $3,3 \times 10^{11}$ #/km - PN2.5, y $0,07$ mg/km - PM2.5 para la motocicleta 125 cm³, y $1,9 \times 10^{11}$ #/km - PN2.5, y $0,04$ mg/km - PM2.5 para la motocicleta 150 cm³. Además, son cercanos a los reportados por los factores de emisión para motocicletas de 150 cm³ ($1,5 \times 10^{11}$ #/km-PN2.5, y $0,1$ mg/km-PM2.5) con motor estabilizado en caliente, obtenidos bajo el ciclo de conducción de motocicletas del AMVA [2]. Así mismo, estos FE son comparables en el orden de magnitud con el FE de PN2.5 (6×10^{11} #/km) reportado para motocicletas de hasta 125 cm³, bajo el ciclo de conducción WMTC [38]. Respecto a las emisiones de la fase de operación en frío, se encontró diferencias significativas en los FE de PN2.5 y PM2.5, siendo mayores los FE de la motocicleta de 150 cm³ ($5,8 \times 10^{12}$ #/km - PN2.5, y $1,27$ mg/km - PM2.5), respecto a los FE de la motocicleta de 125 cm³ ($7,7 \times 10^{11}$ #/km - PN2.5, y $0,17$ mg/km - PM2.5).

La relación entre la temperatura de operación, la distancia recorrida, la duración del recorrido, y los FE de PN2.5 y PM2.5 cobra mayor relevancia al revisar los resultados de la encuesta origen destino realizada por el AMVA en el año 2.017 [40]. Cuyos resultados para motocicletas indican que, de los 751.483 viajes diarios en este tipo de vehículos, el 29% tiene un recorrido de entre 5 y 10 km, y el 34% restante tienen recorridos inferiores a 5 km. En cuanto a la duración de los viajes, el 4% tienen una duración entre 0 y 5 min, el 21% tiene una duración entre 5 y 15 min, el 42% tienen una duración entre 15 y 30 min, y el 14% tienen una duración entre 45 y 60 min.

En la tabla 2.9 se presentan los FE por duración acumulada, distancia acumulada, y temperatura de operación, asociados a la duración, y a la distancia de los viajes diarios de motocicletas publicados por el AMVA. T_o se refiere a la temperatura de operación de la motocicleta, t_{AMVA} se

refiere a la duración en minutos de los viajes diarios en motocicleta del AMVA, Δt_{T_o} se refiere a la duración acumulada en minutos por temperatura de operación, X_{AMVA} se refiere a la distancia recorrida en kilómetros por los viajes diarios de motocicletas del AMVA, y ΔX_{T_o} se refiere a la distancia recorrida acumulada en kilómetros por temperatura de operación.

Tabla 2.9. FE de PN y PM por duración y distancia de viajes en motocicletas

T_o	t_{AMVA} [min]	Δt_{T_o} [min]	X_{AMVA} [km]	ΔX_{T_o} [km]	FE motocicletas 125cm ³		FE motocicletas 150 cm ³	
					PN2.5 [#/km]	PM2.5 [mg/km]	PN2.5 [#/km]	PM2.5 [mg/km]
Frío	0 a 5	3,02±0,41	0 a 1	0,29±0,01	7,7x10 ¹¹	0,17	5,8x10 ¹²	1,27
Baja	5 a 15	13,82±0,95	1 a 5	3,89±0,67	6,5x10 ¹¹	0,14	3,6x10 ¹²	0,80
Media	15 a 30	24,83±1,81	5 a 10	7,66±1,49	4,1x10 ¹¹	0,09	2,0x10 ¹²	0,43
Alta		36,55±3,33		11,46±2,42	4,5x10 ¹¹	0,10	1,4x10 ¹²	0,30
Estabilizado en caliente	30 a 45	39,86±4,87	> 10	12,97±3,44	1,9x10 ¹¹	0,04	3,3x10 ¹¹	0,07

Para cada temperatura de operación, se aprecian coincidencias entre, la duración acumulada y la duración de los viajes publicados por el AMVA, y entre la distancia acumulada y la distancia de los viajes publicados por el AMVA. Esto permite relacionar los FE de PN2.5, y PM2.5 con los viajes diarios en motocicletas, de acuerdo a su duración o distancia recorrida.

Los viajes con duración de 0 a 5 minutos (3% de los viajes diarios), y los viajes con distancias recorridas de 0 a 1 km (5% de los viajes diarios), se pueden asociar con los FE de temperatura de operación en frío, que presentan duraciones acumuladas cercanas a 3,02 minutos y distancias acumuladas cerca de 0,29 km. Los viajes con duración de 5 a 15 minutos (20% de los viajes diarios), y los viajes con distancias recorridas de 1 a 5 km (29% de los viajes diarios), se pueden asociar con los FE de temperatura de operación baja, que presentan duraciones acumuladas cercanas a 13,82 minutos y distancias acumuladas cerca de 3,89 km. Los viajes con duración de 15 a 30 minutos (42% de los viajes diarios), y los viajes con distancias recorridas de 5 a 10 km (29% de los viajes diarios), se pueden asociar con los FE de temperatura de operación media, que presenta duraciones acumuladas cercanas a 24,83 minutos y distancias acumuladas cerca de 7,66 km. Por último, los viajes con duración de 30 a 45 minutos (12% de los viajes diarios) y con distancias recorridas mayores a 10 km (33 % de los viajes diarios), se pueden asociar con los FE de temperatura de operación alta (duración acumulada cercana de 36,55 minutos y distancia recorrida acumulada cercana de 11,46 km) o estabilizado en caliente (duración acumulada cercana a 39,86 minutos y distancia recorrida acumulada cercana de 12,97 km).

Dado que los mayores FE de PN2.5 y PM2.5 para ambas motocicletas, corresponden a los asociados a viajes diarios con duración entre 0 y 30 min (67%), y a los viajes diarios con distancia recorrida entre 0 y 10km (63%). Se puede establecer que, en el AMVA las emisiones de PN2.5 y PM2.5 de motocicletas son más altas de lo estimado, debido a que las valoraciones de los inventarios generalmente se desarrollan usando FE con temperaturas estabilizadas en caliente, y la realidad

es que en esta clase de vehículos aproximadamente el 65% de los viajes, se hacen con temperatura por debajo de la estabilizada en caliente.

Síntesis

Este capítulo presenta el desarrollo de una configuración de equipos que integran un PEMS para motocicletas, que permite de manera segura y por periodos razonables (máximo 100 minutos), medir y almacenar variables del vehículo (IAT, MAF, MAP, EGT, EOT, RPM, TPS), de la conducción (latitud, longitud y velocidad), y de emisiones de partículas (PM y PN). El PEMS permitió la realización de pruebas dinámicas de conducción en ruta, desde el arranque en frío hasta la operación estabilizada en caliente, permitiendo realizar el estudio de emisiones de motocicletas en condiciones reales de conducción.

Se realizó la selección de rutas de prueba con tramos de ascenso, descenso, y terreno llano. Éstas contienen secciones que se pueden repetir varias veces durante un evento de calentamiento (segmentos y ciclos), desde el arranque en frío hasta estabilizado en caliente, permitiendo comparar los FE según a la temperatura media del motor, en cada segmento y ciclo de trabajo. Se encontró que la temperatura de operación afecta de manera significativa los FE de PN2.5 y PM2.5.

Se identifica una relación entre la temperatura de operación del motor, con la duración de los recorridos, y con la distancia recorrida en motocicletas. El FE de PN2.5 y PM2.5 por tanto, se puede asociar a estas variables (temperatura, duración, y distancia), esto permite estimar con mayor precisión las emisiones de las motocicletas, si se conocen las características de distancia recorrida o duración de los viajes que se realizan en el Valle de Aburrá.

CAPÍTULO 3

Efecto de la pauta de conducción

Tanto las emisiones contaminantes, como el consumo de combustible en motocicletas se ven afectados por factores como la velocidad, la aceleración, la selección de marcha, la pendiente de la vía, y el tráfico, entre otros [20]. De éstos factores, el conductor puede controlar durante la conducción cotidiana variables como velocidad, aceleración, y selección de marcha. Este comportamiento de la conducción influencia a su vez los modos de conducción (ralentí, aceleración, deceleración, y el crucero) [28,48]. La evaluación de impacto de las pautas de conducción sobre las emisiones de material particulado cobra aún más relevancia, conociendo que la conducción de motocicletas en el Valle de Aburrá está caracterizada por pautas (patrones) de conducción, afectadas por los cambios de aceleración [23].

Metodología

La metodología para determinar el efecto de la pauta de conducción en las emisiones de PN_{2.5} y PM_{2.5} de motocicletas en el valle de Aburrá, se presenta en la figura 3.1.

La metodología presenta dos secciones principales, la primera se refiere al uso de datos de pruebas en ruta, y la segunda al uso de datos de pruebas de laboratorio. La primera sección representa la realización de pruebas en ruta y procesamiento de datos adquiridos por el PEMS, hasta su combinación con los datos de las pruebas en laboratorio. De las pruebas en ruta, procesadas y analizadas en el capítulo 2, son usados los ciclos de temperatura de operación media y alta, y los segmentos de trabajo estabilizado en caliente, tomados luego de las fases de depuración, filtrado y sincronización.

La segunda sección (pruebas en laboratorio), que corresponde al uso de datos de las pruebas de laboratorio, con las cuales se desarrollaron los FE de motocicletas del Valle de Aburrá. Se presenta en dos fases claramente definidas, la primera fase, inicia con la reproducción del ciclo AMVA de motocicletas con vehículos representativos de la región. En estas pruebas, se almacenaron datos de varios equipos, del banco de rodillos se obtuvo la velocidad de referencia, la pendiente de la vía, y la velocidad reproducida con una frecuencia de 20Hz. El flujo de los gases de escape (EFR) y la temperatura de los gases de escape (EGT) con una frecuencia de 10Hz, se midieron mediante un PEMS de la marca Horiba. La concentración de PN_{2.5} con una frecuencia de 1Hz se midió con un equipo Dekati Elpi. La segunda fase corresponde al procesamiento de datos en seis pasos: depurado y filtrado, ajuste de frecuencia, sincronización de variables; división de pruebas en micro viajes (para datos de laboratorio y datos de ruta), agrupamiento e identificación de pautas de conducción, y cálculo de FE de PN_{2.5} y PM_{2.5}.

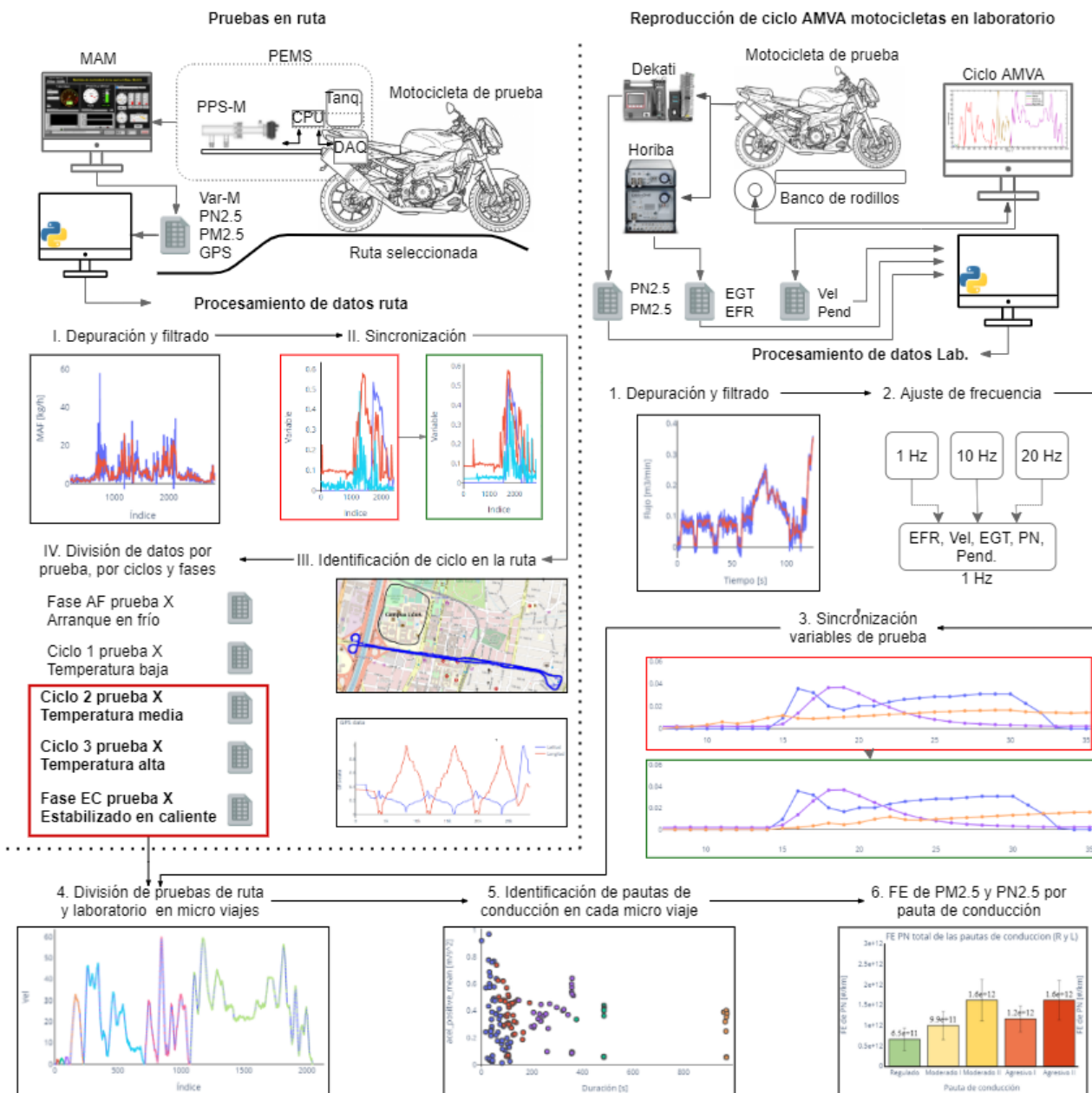


Figura 3.1. Metodología para analizar el impacto de la pauta de conducción

Pruebas de laboratorio

En la tabla 3.1, se presentan las especificaciones de las motocicletas usadas durante el desarrollo de los FE de motocicletas del valle de Aburrá. Estas motocicletas pertenecen a dos de las marcas más vendidas en el quinquenio 2.011-2.015 en el valle de Aburrá [2,41].

Tabla 3.1. Motocicletas usadas en las pruebas de laboratorio

Cilindrada [cc]	Modelo	Kilometraje [km]	Suministro de combustible
110	2.017	1.828	Carburador – Euro 2
160	2.013	11.813	Carburador- Euro 2
150	2.015	4.186	Inyección Electrónica – Euro 3

Se presenta en la figura 3.2 el perfil de velocidad-tiempo, y la pendiente asociada a la vía del ciclo de motocicletas del valle de Aburrá reproducido en banco de rodillos, usado para el desarrollo de los FE de motocicletas del valle de Aburrá. Los parámetros del ciclo reproducido se presentan en la tabla 3.2 [19,23].

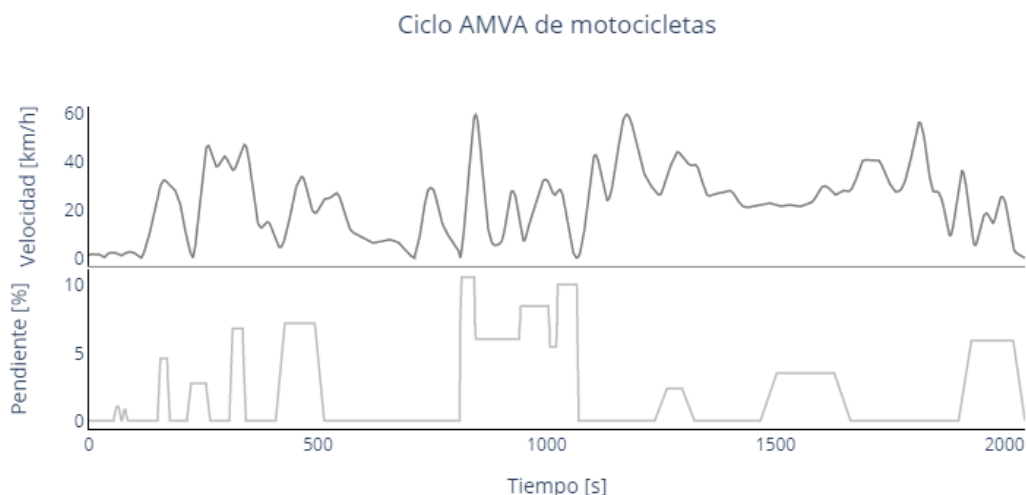


Figura 3.2. Ciclo AMVA de motocicletas reproducido

Tabla 3.2. Parámetros ciclo AMVA motocicletas reproducido [19]

Variables	Valor ciclo AMVA
Velocidad promedio [km/h]	23,01
Velocidad promedio en movimiento [km/h]	23,13
Aceleración promedio [m/s ²]	0,57
Deceleración promedio [m/s ²]	-0,51
Tiempo en aceleración [%]	40,90
Tiempo en deceleración [%]	46,85
RMS aceleración [m/s ²]	0,63
Cambios de aceleración/deceleración (y viceversa) [#]	22
Datos característicos del ciclo	
Duración [s]	2.045
Distancia recorrida [km]	14

Para la reproducción del ciclo se utilizó un banco de rodillos con capacidad de reproducir carga positiva (simulación de ascensos) instantáneamente. Ajustando las pendientes del ciclo de conducción, de acuerdo a las condiciones técnicas del equipo [19]. Se hizo un total de 12 pruebas, 3 reproducciones del ciclo AMVA para cada motocicleta de pruebas.

En la medición de PM, se usó un equipo de marca DEKATI, y de referencia HR-ELPI+VI, compuesto por una torre de catorce etapas de impactadores electrostáticos de baja presión, que separan las partículas por su tamaño en función de la carga eléctrica que adquieren, midiendo desde 0,006 μm

a $10\ \mu\text{m}$ (PM10), además de tener una etapa exclusiva para $2,5\ \mu\text{m}$ (PM2.5). Este equipo tiene una frecuencia de muestreo de un segundo [2].

En la medición del flujo de gases de escape (EFR), y de la temperatura de los gases de escape (EGT), se usó un PEMS de la marca HORIBA ONE. Para el caso del EFR se usó un tubo Pitot que se conecta a uno de los módulos del PEMS.

Procesamiento de datos

Como se observa en la figura 3.1, el procesamiento de datos consta de seis pasos que se describen a continuación:

1. Depuración y filtrado:

Siguiendo el procedimiento de depuración y filtrado descrito en el capítulo 2, se elimina el ruido y la inestabilidad de las variables medidas en laboratorio. La figura 3.3, presenta el resultado de la depuración y filtrado del flujo de los gases de escape de una de las pruebas realizadas.



Figura 3.3. Filtrado EFR

2. Ajuste de frecuencia:

Dado que cada equipo tiene frecuencias de muestreo diferentes, se hace necesario llevar las variables a una frecuencia común, determinada por la frecuencia de muestreo más alta, en este caso 1Hz (frecuencias de los datos del Dekati ELPI). Para las variables con frecuencia de 20Hz (velocidad real, pendiente de la vía, velocidad reproducida), se realiza un muestreo que selecciona los datos correspondientes a la unidad entera de cada segundo. Por otro lado, el muestreo del EFR, inicialmente a 10Hz, se realiza mediante integración numérica, con el objeto de asegurar que la variable final contenga toda la información del flujo durante cada ventana temporal.

3. Sincronización de variables:

Siguiendo el procedimiento de sincronización descrito en el capítulo 2. Se realiza el ajuste para asegurar la convergencia temporal de los datos de las pruebas en laboratorio. En la figura 3.4, se presentan las variables de una de las pruebas realizadas en laboratorio, antes del proceso de sincronización.

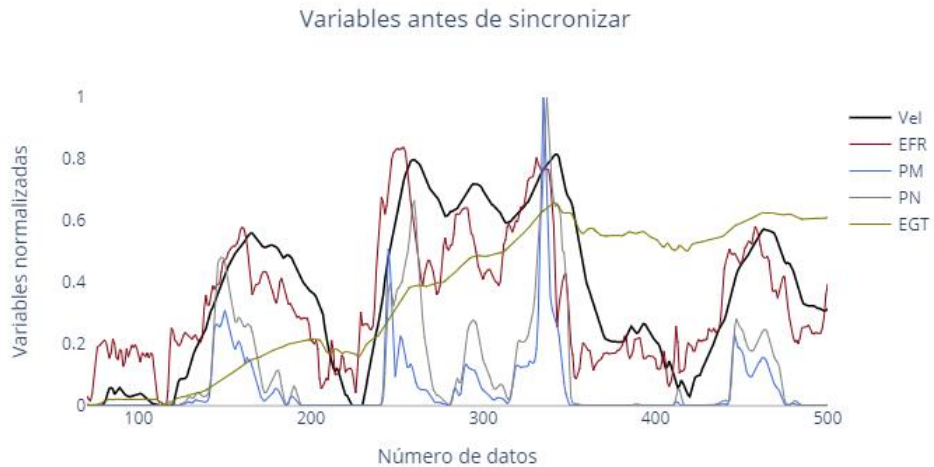


Figura 3.4. Variables antes de sincronización ciclo AMVA

En la figura 3.5, se presenta el efecto de la sincronización. Es evidente que los comportamientos de las variables responden a eventos de conducción de la motocicleta, por lo tanto, es posible relacionar los mismos.

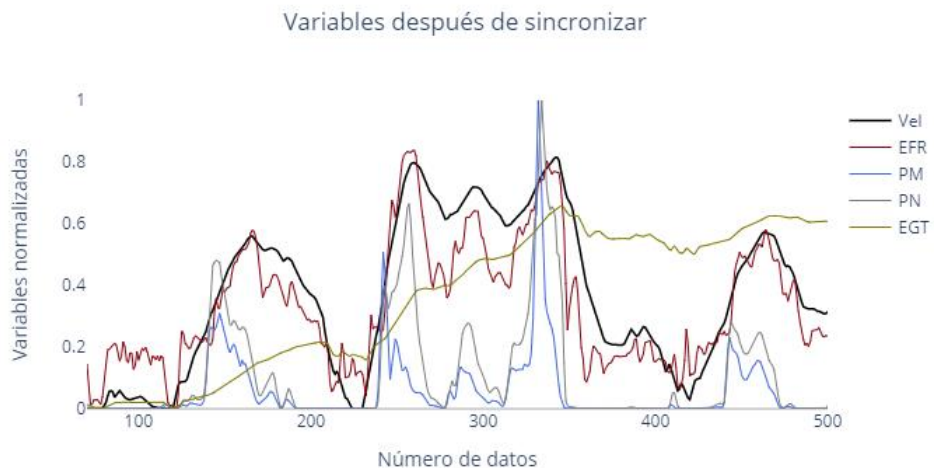


Figura 3.5. Variables después de sincronización ciclo AMVA

4. División de datos por micro viajes:

Un micro viaje se define como el tramo de un recorrido o prueba, compuesto desde el primer cambio de velocidad (inicio de movimiento del vehículo) hasta el inicio del siguiente cambio de velocidad, después de pasar por cero (reposo). Como se aprecia en las figuras 3.6 y 3.7, para los perfiles de velocidad y número de datos de las pruebas realizadas en ruta, y en laboratorio, se identifican los puntos de inicio y fin de los micro viajes (líneas punteadas en azul).

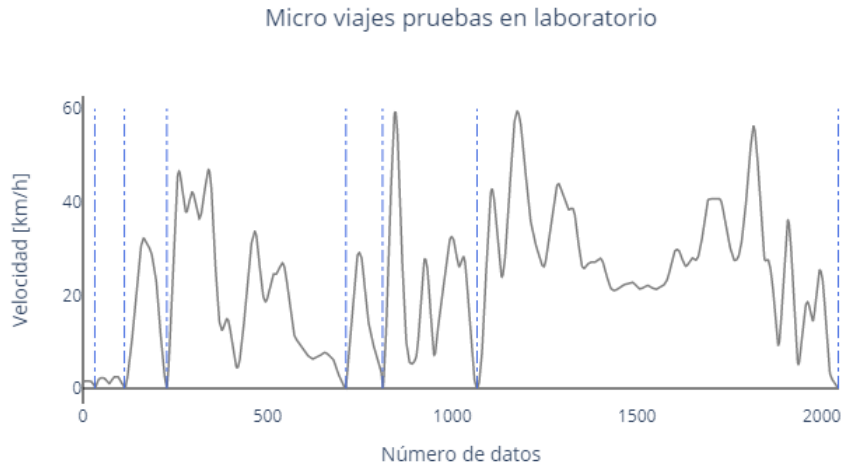


Figura 3.6. División de ciclo AMVA en micro viajes

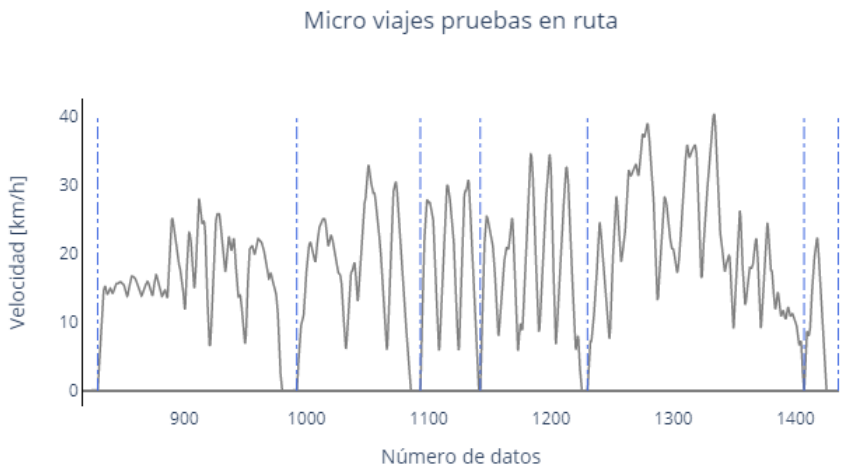


Figura 3.7. División de ciclo prueba en ruta en micro viajes

Se tiene un total de 187 micro viajes, 109 para las pruebas en ruta (10 pruebas en dos motocicletas), y 78 para las pruebas de laboratorio (12 pruebas en cuatro motocicletas).

5. Agrupamiento de micro viajes:

La identificación de las pautas de conducción a que corresponden cada uno de los micro viajes, se inicia con la caracterización dinámica de éstos. Para cada micro viaje se determinan las siguientes variables: Velocidad promedio, duración promedio, aceleración positiva promedio, y el porcentaje de tiempo en ralentí. Luego se usa esta información para analizar cómo se agrupan los micro viajes, usando el algoritmo K-means [49]. En la figura 3.8, se presenta la gráfica de codo, en la cual se indica número de grupos a utilizar [50].

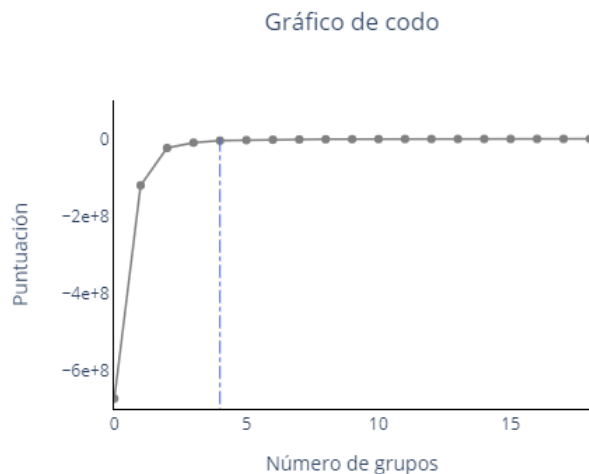


Figura 3.8. Determinación del número de grupos

Se determina para el agrupamiento, cuatro grupos, siendo el número que mejor separaba los micro viajes, de manera que se diferencian claramente entre grupos y cada grupo contiene un número significativo de micro viajes. En la figura 3.9 se muestran los micro viajes agrupados según la aceleración positiva promedio y la distancia recorrida. Se identifican los cuatros grupos por colores (identificados del 1 al 4), por tipo de marcador (rombo o círculo), y por el tipo de prueba al que pertenece el micro viaje (R para pruebas en ruta, L para pruebas en laboratorio).

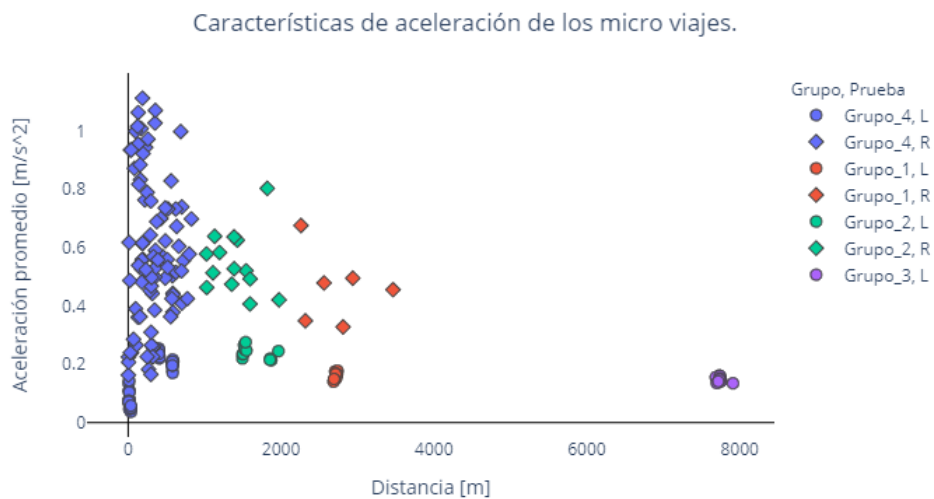


Figura 3.9. Características de aceleración de los micro viajes

Se distinguen cuatro grupos de micro viajes: el grupo 1 (en rojo), conformado por micro viajes de pruebas en ruta y laboratorio, con distancias recorridas entre 2 km y 4 km, y aceleraciones positivas promedios entre bajas y medias. El grupo 2 (en verde), conformado por micro viajes de

pruebas en ruta y laboratorio, con distancias recorridas entre 1 km y 2 km, y aceleraciones positivas promedio medias. El grupo 4 (en azul), conformado por micro viajes de pruebas en ruta y laboratorio, con distancias recorridas hasta de 1 km, presentando alta dispersión en las aceleraciones positivas promedio, desde bajas aceleraciones positivas hasta altas aceleraciones positivas. El grupo 3 (en morado) conformado por micro viajes de pruebas en laboratorio, con altas distancias recorridas (cercana a 8 km) y bajas aceleraciones positivas promedio. La razón de que el grupo 3 este conformado únicamente por micro viajes de pruebas en laboratorio, es que las pruebas en ruta se realizaron en vías donde no fue posible recorrer largas distancias con tiempos de viaje prolongados.

Para identificar la agresividad característica de cada grupo, se desarrolló un indicador llamado índice de agresividad, el cual relaciona el número de cambios significativos de aceleración, la aceleración positiva promedio, la proporción de tiempo en ralentí, la distancia recorrida promedio, y la velocidad promedio de los micro viajes que integran cada grupo (ver ecuación 3.1).

$$I_A = \frac{C_a[\#] \times a_{pos}[m/s^2] \times t_R[\%]}{\Delta X[km] \times vel [km/h]} \quad (3.1)$$

Donde:

C_a : Cambios de aceleración promedio de los micro viajes

a_{pos} : Aceleración positiva promedio de los micro viajes

t_R : Proporción de tiempo en ralentí promedio de los micro viajes

vel : Velocidad promedio de los micro viajes

ΔX : Distancia recorrida promedio de los micro viajes

Este índice de agresividad se usó como criterio para diferenciar las pautas de conducción de los cuatro grupos de micro viajes. En la tabla 3.3 se presentan los parámetros de cada pauta de conducción.

Tabla 3.3. Parámetros de las pautas de conducción

Pauta	Velocidad promedio [km/h]	Aceleración positiva promedio [m/s ²]	Cambios de aceleración promedio [#]	Duración promedio [s]	Distancia recorrida promedio [m]	Tiempo en ralentí promedio [%]	Índice de agresividad
Regulado	28,79	0,15	44,08	966,50	7.749,41	0,66	0,14
Moderado	23,31	0,26	82,16	455,55	2.718,81	4,00	3,69
Agresivo I	14,13	0,44	11,53	71,07	304,66	18,26	6,60
Agresivo II	23,44	0,40	112,92	242,56	1.510,67	5,11	10,00

la pauta Regulado, con un índice de agresividad bajo (0,14), presenta aceleración promedio baja (0,15 m/s²), alta velocidad promedio (28,79 km/h), y distancia recorrida alta (7,7 km). La pauta Moderado, con un índice de agresividad medio (3,69), presenta aceleración promedio media (0,26

m/s²), media velocidad promedio (23,31 km/h), y distancia recorrida media (2,7 km). La pauta Agresivo I, con un alto índice de agresividad (6,60), presenta aceleración promedio alta (0,44 m/s²), baja velocidad promedio (14,13 km/h), y baja distancia recorrida (0,3 km). Finalmente, la pauta Agresivo II, con un índice de agresividad alto (10), presenta aceleración promedio alta (0,40 m/s²), media velocidad promedio (23,4 km/h), y distancia recorrida media (1,5 km).

Se presentan las pautas de conducción según la velocidad promedio, y la distancia recorrida de los micro viajes en la figura 3.10. En la figura 3.11 se presentan las pautas de conducción según la velocidad promedio, y la duración de los micro viajes.

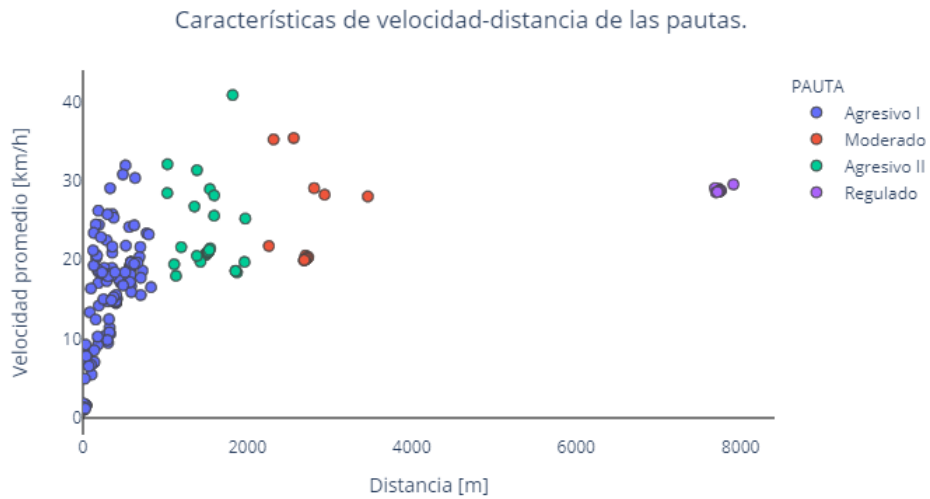


Figura 3.10. Características de velocidad – distancia de las pautas de conducción

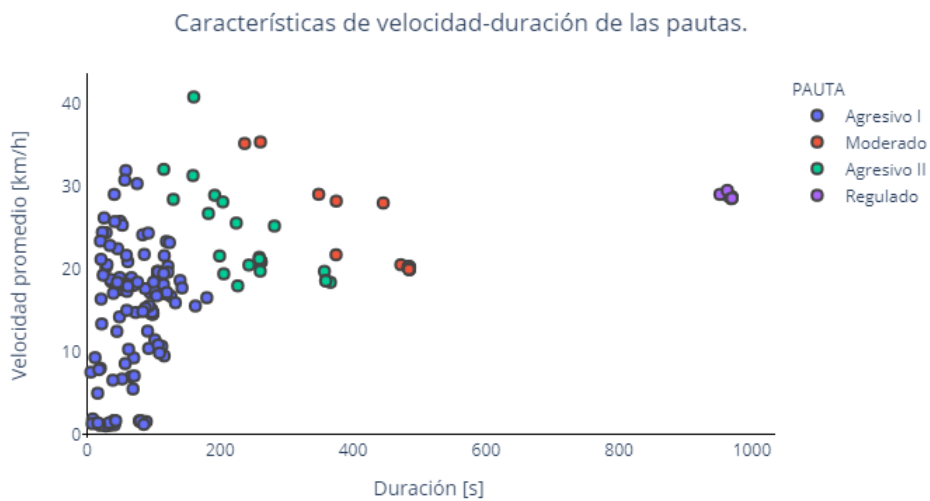


Figura 3.11. Características de velocidad – duración de las pautas de conducción

Las distancias recorridas de los micro viajes, a diferencia de la duración de los micro viajes, permiten una distinción clara entre pautas de conducción. Se observa que las pautas agresivas se caracterizan por micro viajes menores a 2 km, y las pautas que tienden a ser moderadas a reguladas se caracterizan por distancias mayores a 2 km, con aceleraciones promedio tendiendo a bajas, y velocidades promedio tendiendo a altas (ver tabla 3.3).

6. Desarrollo de FE de PN2.5 y PM2.5:

Los FE por pautas de conducción se calcularon según el tipo de prueba (ruta y laboratorio) a la que pertenece cada micro viaje. La diferencia radica en que en las pruebas en ruta se midió el flujo de aire de admisión (MAF), y con este parámetro se estimó el flujo de gases de escape. En este caso se procede según lo descrito en el capítulo 2 (ecuaciones 2.1 a 2.15). En las pruebas de laboratorio se midió el flujo de los gases de escape (EFR), mediante un tubo de Pitot, conectados a uno de los módulos del equipo Horiba. En este caso el FE de PN2.5 por pauta de conducción para pruebas en laboratorio está determinado por:

$$FE_{PN} = \frac{PN \text{ [#]}}{\Delta X \text{ [km]}} \quad (3.2)$$

La distancia recorrida durante cada micro viaje se calcula integrando respecto al tiempo la velocidad medida en el banco de rodillos, .

$$\Delta X = \int_0^n v \text{ [m/s]} dt \quad (3.3)$$

El número de partículas de un micro viaje se calcula integrando flujo de partículas por segundo respecto al tiempo.

$$PN = \int_0^n P\dot{N} \text{ [# /s]} dt \quad (3.4)$$

El flujo de partículas por segundo está dado por el producto entre la concentración instantánea de partículas, y el flujo volumétrico de los gases de escape en centímetros cúbicos por segundo:

$$P\dot{N} = cPN \text{ [# /cm}^3\text{]} * \dot{V}_g \text{ [cm}^3\text{/s]} \quad (3.5)$$

La concentración de número de partículas (PN) se mide directamente con el equipo Dekati ELPI.

El flujo volumétrico de los gases de escape (EFR) se mide directamente con el equipo Horiba OBS ONE.

El factor de emisión de PM2.5, en miligramos por kilómetro recorrido para cada micro viaje se define como:

$$FE_{PM} = \frac{PM [mg]}{\Delta X [km]} \quad (3.6)$$

La masa de material particulado de un segmento o ciclo se calcula integrando flujo de másico de material particulado por segundo respecto al tiempo.

$$PM = \int_0^n \dot{PM} [mg/s] dt \quad (3.7)$$

El flujo másico de material particulado por segundo está dado por el producto entre la concentración másica de partículas y el flujo volumétrico de los gases de escape:

$$\dot{PM} = c_{PM} [mg/cm^3] * \dot{V}_g [cm^3/s] \quad (3.8)$$

La concentración másica de partículas (PM) se mide directamente con el equipo Dekati ELPI.

De forma similar a lo descrito en el Capítulo 2, para cada variable presentada, se indica mediante barras de error la desviación estándar de la media.

Resultados

Efecto de la pauta de conducción en las emisiones de PN2.5

En la figura 3.12, se presentan los FE de PN2.5 por pautas de conducción para las motocicletas probadas en ruta y laboratorio.

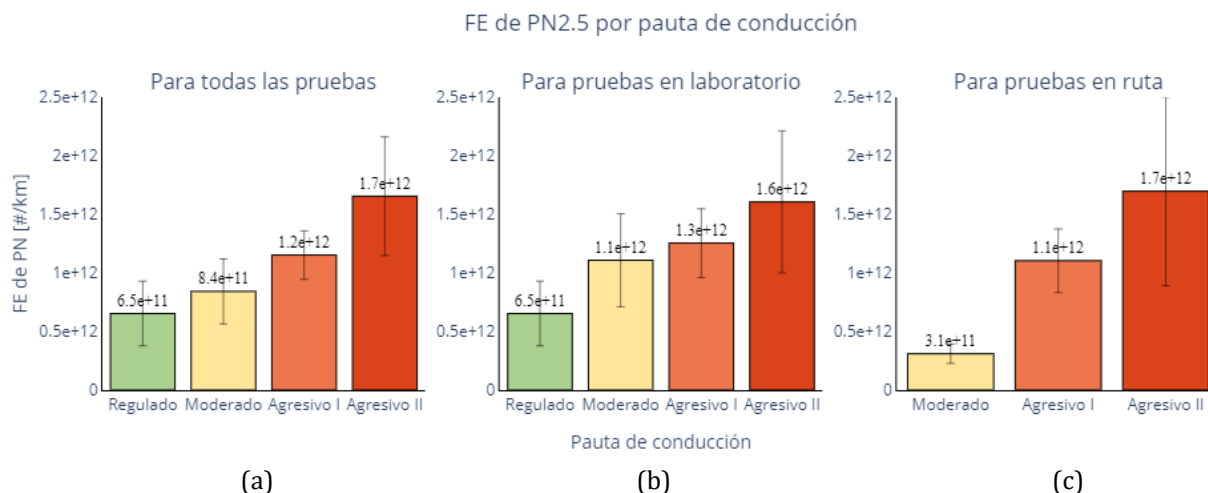


Figura 3.12. FE de PN2.5 por pautas de conducción

La figura 3.12a presenta el FE de PN2.5 de todas las pruebas combinadas. La figura 3.12b, presenta los FE de PN2.5 de las pruebas en laboratorio, para todas las pautas (Regulado, Moderado, Agresivo I, y Agresivo II). La figura 3.12c, presenta los FE de PN2.5 para las pautas moderado, agresivo I, y agresivo II de las pruebas en ruta. La pauta regulada no se presenta puesto que no fue posible reproducirla en las pruebas en ruta.

De los FE de las pruebas en laboratorio (figura 3.12b), y de las pruebas en ruta (figura 3.12c), se halló similitud entre los FE de las pautas agresivo I, y Agresivo II. La pauta Agresivo I presenta FE de PN2.5 de $1,3 \times 10^{12} \pm 2,9 \times 10^{11}$ #/km, para las pruebas en laboratorio, y de $1,1 \times 10^{12} \pm 2,7 \times 10^{11}$ #/km, para la prueba en ruta. La pauta Agresivo II presenta FE de PN2.5 de $1,6 \times 10^{12} \pm 6,1 \times 10^{11}$ #/km, para las pruebas en laboratorio, y de $1,7 \times 10^{12} \pm 8,0 \times 10^{11}$ #/km, para las pruebas en ruta. Por su lado los FE de PN2.5 de la pauta Moderado en las pruebas en laboratorio es de $1,1 \times 10^{12} \pm 3,9 \times 10^{11}$ #/km y en las pruebas en ruta es de $3,11 \times 10^{11} \pm 8,3 \times 10^{10}$ #/km. Finalmente la pauta Regulada solo reproducida en las pruebas de laboratorio, presenta un FE de PN2.5 de $6,5 \pm 2,7 \times 10^{11}$ #/km.

Cuando se consideran las emisiones de las pruebas en ruta y laboratorio (figura 3.12a), se encontró que la pauta Agresivo II presenta 1,4, 2, y 2,6 veces mayor FE de PN2.5, respecto a las pautas Agresivo I, Moderado, y Regulado. De forma similar, en los FE de las pruebas en laboratorio (figura 3.12b) la pauta Agresivo II presenta 1,2, 1,5, y 2,5 veces mayor FE de PN2.5, respecto a las pautas Agresivo I, Moderado, y Regulado. Por su lado los resultados de las pruebas en ruta (figura 3.12c), donde solo se reprodujeron las pautas Moderado, Agresivo I, y Agresivo II, se encontró que el FE de PN2.5 de la pauta Agresivo II, es 1.5, y 5.5 veces mayor a los FE de las pautas Moderado y Agresivo I.

La figura 34a, evidencia que, tanto para las pruebas en ruta como en laboratorio, la pauta de conducción afecta el FE de partículas. El valor medio del FE de PN2.5 para la pauta Regulado, fue 22.6% menor que para la pauta Moderado, y está a su vez fue 30% menor que para la pauta Agresivo I. Finalmente, las emisiones en la pauta Agresivo II, fueron las más altas, siendo 29,4% mayores que para la pauta Agresivo I, 50.6% mayor que para la pauta Moderado.

Efecto de la pauta de conducción en las emisiones de PM2.5

En la figura 3.13, se presentan los FE de PM2.5 de las motocicletas probadas en ruta y laboratorio. La figura 3.13a para las pruebas en laboratorio, y figura 3.13b para pruebas en ruta. No se muestran los resultados combinados, ya que el método que usan los equipos Dekati y Pegasor para la medición de PM2.5 usados en ambas pruebas es diferente. En las pruebas en ruta se usó un sensor de partículas PPM-S, que calcula la masa en función del número de partículas, suponiendo una densidad y diámetro medio constantes. En las pruebas en laboratorio se usó un equipo Dekati ELPI, el cual, mediante cada impactador mide la masa de las partículas en función de su rango de tamaño.

FE de PM2.5 por pauta de conducción

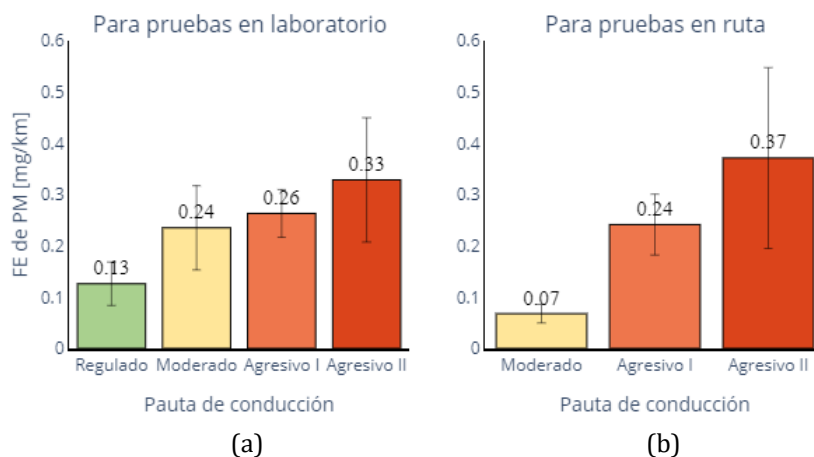


Figura 3.13. FE de PM2.5 por pautas de conducción

De los FE de las pruebas en laboratorio (figura 3.13a), y de las pruebas en ruta (figura 3.13b), se halló similitud en los FE de PM2.5 de las pautas Agresivo I, y Agresivo II. La pauta Agresivo I, presenta un FE de PM2.5 de $0,26 \pm 0,05$ mg/km en las pruebas en laboratorio, y de $0,24 \pm 0,06$ mg/km en las pruebas en ruta. La pauta Agresivo II, presenta un FE de PM2.5 de $0,33 \pm 0,12$ mg/km en las pruebas de laboratorio, y de $0,37 \pm 0,17$ mg/km en las pruebas en ruta. Por su lado la pauta Moderado presenta un FE de PM2.5 de $0,24 \pm 0,08$ mg/km en las pruebas de laboratorio, y de $0,07 \pm 0,02$ mg/km en las pruebas en ruta. Finalmente, el FE de PM2.5 de la pauta Regulado es las pruebas de laboratorio es de $0,13 \pm 0,04$ mg/km.

De forma similar al FE de PN2.5, el FE de PM2.5 es afectado por la pauta de conducción, donde el FE aumenta conforme al índice de agresividad propio de cada pauta de conducción. Así, para las pruebas en ruta, los FE de la pauta Agresivo II fueron las más altas, siendo 21,2% mayores que para la pauta Agresivo I, y 27,3% mayores que para la pauta Moderado. Por su lado la pauta Regulada con el menor FE de PM2.5, presentan una reducción en el FE del 45,8% respecto a la pauta Moderado, del 50% respecto a la pauta Agresivo I.

Efecto de la pauta de conducción y de la temperatura de operación

En las figuras 3.14 y 3.15 se presentan respectivamente, el efecto cruzado de la pauta de conducción y la temperatura de operación en los FE de PN2.5 y PM2.5, de las pruebas en ruta. Los micro viajes que conforman las pautas de operación en caliente, son aquellos que presentan temperaturas de motor entre 91 °C y 113°C, correspondientes a los ciclos o segmentos identificados como de temperatura de operación media, alta, y estabilizada en caliente (capítulo 2). Por su lado, los micro viajes que conforman las pautas de operación en frío, son aquellos que presentan temperaturas de motor entre 34 °C y 60°C, correspondientes a los ciclos o segmentos identificados en el capítulo 2 como de temperatura de operación fría y baja.

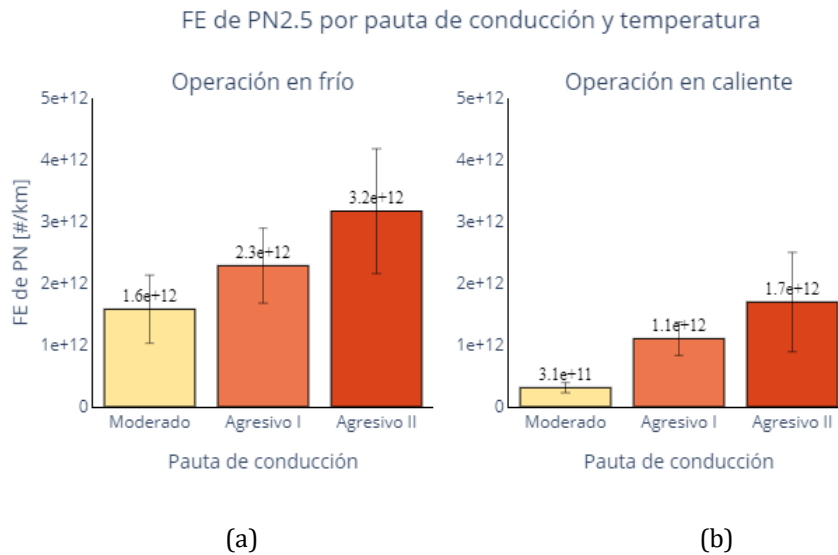


Figura 3.14. FE PN2.5 por pauta y temperatura de operación

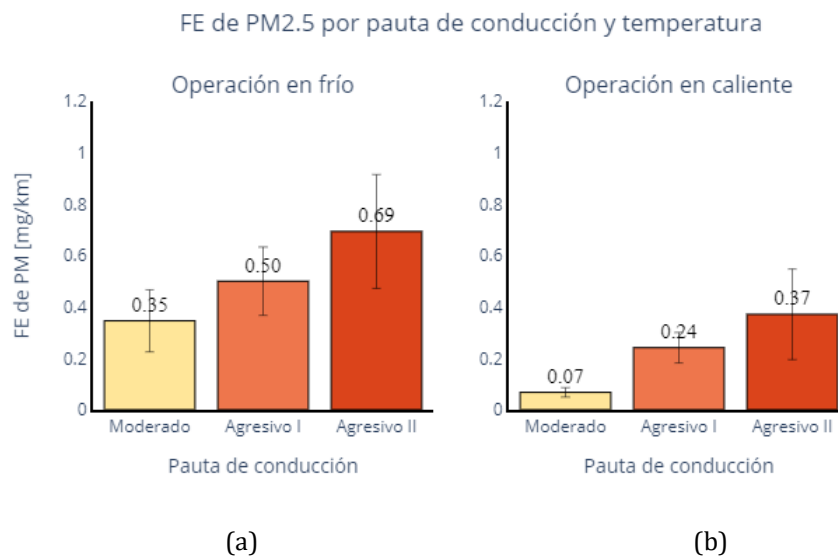


Figura 3.15. FE PM2.5 por pauta y temperatura de operación

Se aprecia en ambas figuras que los FE de PN2.5 y PM2.5 son mayores si la motocicleta se trabaja con temperaturas de operación en frío, para todas las pautas de conducción. Las disminuciones observadas en los FE de PN2.5, y PM2.5 son cercanas de 80% para la pauta moderado, 52% para la pauta agresivo I, y 46,4% para la pauta agresivo II.

Los resultados del presente capítulo se ponen en contexto al analizar los datos de movilidad medidos con GPS de 177 viajes realizados en motocicleta para el desarrollo de los ciclos de conducción del AMVA. Se encontró que el 4,5% de estos micro viajes corresponden a la pauta regulado (la pauta con menor FE de PN2.5 y PM2.5), el 20,3% corresponden a la pauta moderado, el 10,7% corresponden a la pauta agresivo I, y el 20,9 % corresponden a la pauta agresivo II. El

46,6% restante corresponden a otras pautas no reproducidas en las pruebas realizadas en el desarrollo del presente trabajo. Las pautas con mayor FE de PN2.5 y PM2.5 (agresivo I y agresivo II), corresponden al 30 % de los micro viajes realizados en ruta. Si esos micro viajes se realizan con temperatura de operación en frío o baja, los FE de PN2.5 y PM2.5 serán en promedio un 48,3% mayores a los FE de las pautas con temperatura de operación en caliente.

Síntesis

En este capítulo se establece el impacto de las pautas de conducción sobre las emisiones de PN2.5 y PM2.5 de las motocicletas en el Valle de Aburrá. Se identificaron cuatro pautas de conducción (regulado, moderado, agresivo I, y agresivo II), a través del desarrollo de un parámetro denominado índice de agresividad. En este análisis se incluyeron los micro viajes de pruebas en ruta (descritas en el capítulo 2), así como de mediciones en laboratorio. En estas últimas, se usaron motocicletas representativas de la región, y se reprodujo el ciclo de conducción de motocicletas del AMVA en un banco de rodillos.

Se evidencia una relación entre la pauta de conducción (índice de agresividad) y las emisiones de PM. Así mismo, a mayor distancia recorrida, la agresividad de la pauta tiende a ser menor, mientras que las emisiones disminuyen. Las pautas con mayor índice de agresividad (Agresivo I y Agresivo II) y mayor FE de PN2.5 y PM2.5, presentan particularmente los mayores tiempos en ralentí, las mayores aceleraciones positivas promedio, y menores distancias recorridas promedio. Así, las pautas tienden a ser agresivas en cuanto aumentan en una ruta los tiempos con velocidad cero y cuanto menor sea la distancia recorrida.

Además, al usar resultados de las pruebas en ruta con temperatura de operación en frío y baja, descritos en el capítulo 2, se pudo evidenciar un efecto cruzado entre la temperatura de operación y la pauta de conducción en los FE de PN2.5 y PM2.5. Se encontró que la temperatura de operación acentúa el efecto de la pauta de conducción sobre los FE de PM. Esto es relevante al identificar que las pautas con mayor FE presentan menor distancia recorrida. Si se tiene en cuenta que, de los viajes diarios realizados en motocicletas en el Valle de Aburrá, el 34% recorren distancias menores a cinco kilómetros, es probable que las emisiones de PM de motocicletas sean mayores a las estimadas hasta ahora.

CAPÍTULO 4

Efecto de la tecnología de suministro de combustible

Se debe tener cuidado al comparar las emisiones entre motocicletas, debido a las diferencias que hay en el peso, la cilindrada, el tipo de motor, los sistemas de tratamiento de gases, la norma de emisiones que pueden cumplir, y el año de modelo, entre otros aspectos [3,20]. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) clasifica las motocicletas en tres categorías, de acuerdo a su cilindrada, mientras que las normas Euro 4 y 5 de la Unión Europea, clasifican los vehículos de dos y tres ruedas en siete categorías, de acuerdo, entre otros aspectos al tipo de motor, la masa máxima, la cilindrada, la potencia máxima, y la relación de potencia peso [4,42].

Las emisiones de las motocicletas están lejos de considerarse insignificantes, a pesar de su reducido tamaño y cilindraje respecto a los vehículos de pasajeros. Esto se debe, entre otras cosas, a que los sistemas de control de emisiones, y el motor mismo no son tan eficientes en las primeras [2,51]. La falta de ajuste de la relación aire/combustible de los motores de las motocicletas, generalmente causa altos niveles de emisión de contaminantes, incluido el material particulado [33]. En Colombia, a partir de enero del año 2.021 sólo se podrán comercializar motocicletas que cumplan mínimo con la norma Euro 3. Estas consideraciones justifican realizar un análisis particular de las emisiones de PM de motocicletas según la tecnología de suministro de combustible y la norma de emisiones que cumplen.

Metodología

Se utilizaron los datos y resultados de los capítulos 2 y 3 del presente trabajo, en los cuales se procesaron datos de pruebas en ruta y laboratorio, obtenidos probando motocicletas de 100 cm³ a 160 cm³. En las pruebas de laboratorio se usaron cuatro motocicletas, de las cuales tres cuentan con sistema de alimentación a carburador, con capacidad para cumplir la norma Euro 2, y una motocicleta cuenta con sistema de alimentación de inyección electrónica de combustible, con capacidad de cumplir la norma Euro 3. De estas motocicletas una cuenta con sistema de transmisión automática, y las otras tres con sistema de transmisión mecánica. En las pruebas en ruta se usaron dos motocicletas de transmisión mecánica, con capacidad para cumplir la norma Euro 3, una de estas motocicletas con sistema de alimentación a carburador, y otra con sistema de alimentación con inyección electrónica de combustible. En la tabla 4.1 se presentan las especificaciones de las motocicletas usadas en ruta y laboratorio. Las motocicletas están numeradas de la M1 a la M6, de acuerdo a la norma de emisiones (Euro 2 o Euro 3) que pueden aprobar y de mayor a menor cilindraje del motor.

Tabla 4.1. Características técnicas de las motocicletas

Motocicleta	Cilindrada [cm ³]	Modelo	Kilometraje [km]	Suministro de combustible	Sistema de transmisión	Norma Euro	Prueba
M1	150	2015	4186	Inyección	Mecánica	Euro 3	Laboratorio
M2	150	2015	5042	Inyección	Mecánica	Euro 3	Ruta
M3	125	2019	432	Carburador	Mecánica	Euro 3	Ruta
M4	160	2013	11813	Carburador	Mecánica	Euro 2	Laboratorio
M5	125	2013	7737	Carburador	Automática	Euro 2	Laboratorio
M6	110	2017	1828	Carburador	Mecánica	Euro 2	Laboratorio

Se observa hay cierta variedad de cilindrajes en las motocicletas probadas. Para eliminar el efecto de esta variable en el análisis, se modificaron los FE de emisión hallados en los capítulos 2 y 3, dividiéndolos por la cilindrada del vehículo. De este modo se puede evaluar el efecto de la tecnología de suministro de combustible (carburador, e inyección), de la norma de emisiones que pueden cumplir (Euro2, y Euro 3), y del sistema de transmisión (mecánica, y automática).

En cada caso, el factor de emisión de PM_{2.5} modificado se define como:

$$FE_{PM}^* = \frac{FE_{PM} [mg - \#/km]}{V_c [cm^3]} \quad (4.1)$$

El volumen desplazado del motor (V_c) se calcula a partir del diámetro del pistón (ϕ), y de la carrera (l):

$$V_c = \frac{\pi}{4} * \phi^2 [cm^2] * l [cm] \quad (4.4)$$

La tabla 4.2 presenta el cilindraje de cada motocicleta V_c , calculado a partir de datos de sus manuales de servicio.

Tabla 4.2. Cilindraje calculado de las motocicletas

Motocicleta	V_u [cm ³]
M1	149,3
M2	149,3
M3	126,4
M4	152,9
M5	124,8
M6	102,0

El efecto de la tecnología en las emisiones de PN_{2.5} y PM_{2.5} se abordó en dos partes. En primer lugar, se usaron los datos recopilados de las pruebas en ruta, donde se evaluó la contribución de la temperatura de operación (Capítulo 2). Se valoran los FE específicos por unidad de cilindrada para las temperaturas de operación frío, baja, media, alta y estabilizado en caliente, de las dos motocicletas probadas en ruta. Una de éstas cuenta con sistema de inyección electrónica de

combustible, y la otra con sistema de alimentación de combustible a carburador. Ambas motocicletas pueden cumplir con la norma Euro 3, según información de los fabricantes.

La segunda parte se abordó usando datos de pruebas en ruta y en laboratorio, con los cuales se evaluó el impacto de las pautas de conducción en los FE de PN25 y PM2.5 (Capítulo 3). Se identifica, por consiguiente, el efecto de la tecnología en los FE específicos por unidad de cilindrada, para las diferentes pautas de conducción identificadas. Esto se realiza para las motocicletas con sistema de alimentación de combustible a carburador (Euro 2 y Euro3), para las motocicletas con sistema de alimentación de combustible mediante inyección electrónica (Euro 3), y para las motocicletas con transmisión mecánica versus automática.

De forma similar a lo descrito en el Capítulo 2, para cada variable presentada, se indica mediante barras de error la desviación estándar de la media.

Resultados

Efecto de la tecnología de suministro de combustible y la temperatura de operación

En la figura 4.1 se presenta el comportamiento de la temperatura del motor durante el proceso de calentamiento en las pruebas de ruta, para una motocicleta Euro 3 con inyección electrónica de combustible (EFI), y para una motocicleta Euro 3 con sistema de alimentación a carburador.

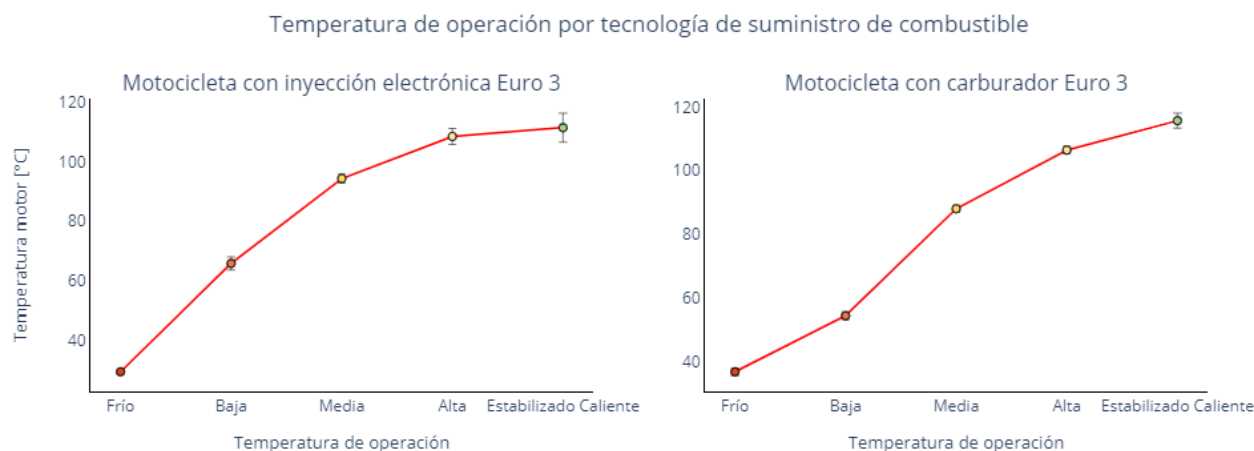


Figura 4.1. Temperatura de operación por tecnología de suministro de combustible

Se aprecia que las temperaturas de operación alta y estabilizada en caliente son similares entre ambas motocicletas, para la motocicleta con EFI: 108,4 °C y 111,3 °C, y para la motocicleta con carburador: 106,5 °C y 115,7°C. La fase de calentamiento entre la temperatura de operación en frío hasta la temperatura de operación alta, es más continua para la motocicleta con EFI. Además, en esta motocicleta se evidencia un aumento menos progresivo de la temperatura entre la operación con temperatura alta y la operación estabilizado en caliente. Este mejor proceso de calentamiento en la motocicleta con EFI, es consecuencia del control más preciso de la inyección de combustible, la operación de lazo abierto en beneficio del calentamiento del motor (entre temperaturas de

operación en frío hasta temperatura de operación media), y la operación en lazo cerrado en beneficio del control de emisiones (entre temperaturas de operación media hasta temperatura de operación estabilizada en caliente).

En la figura 4.2 se presentan los FE de PN2.5 y PM2.5 por unidad de cilindrada, para las temperaturas de operación en frío, baja, media, alta y estabilizado caliente, de motocicletas Euro 3, una con inyección electrónica de combustible (EFI), y una con sistema de alimentación a carburador.

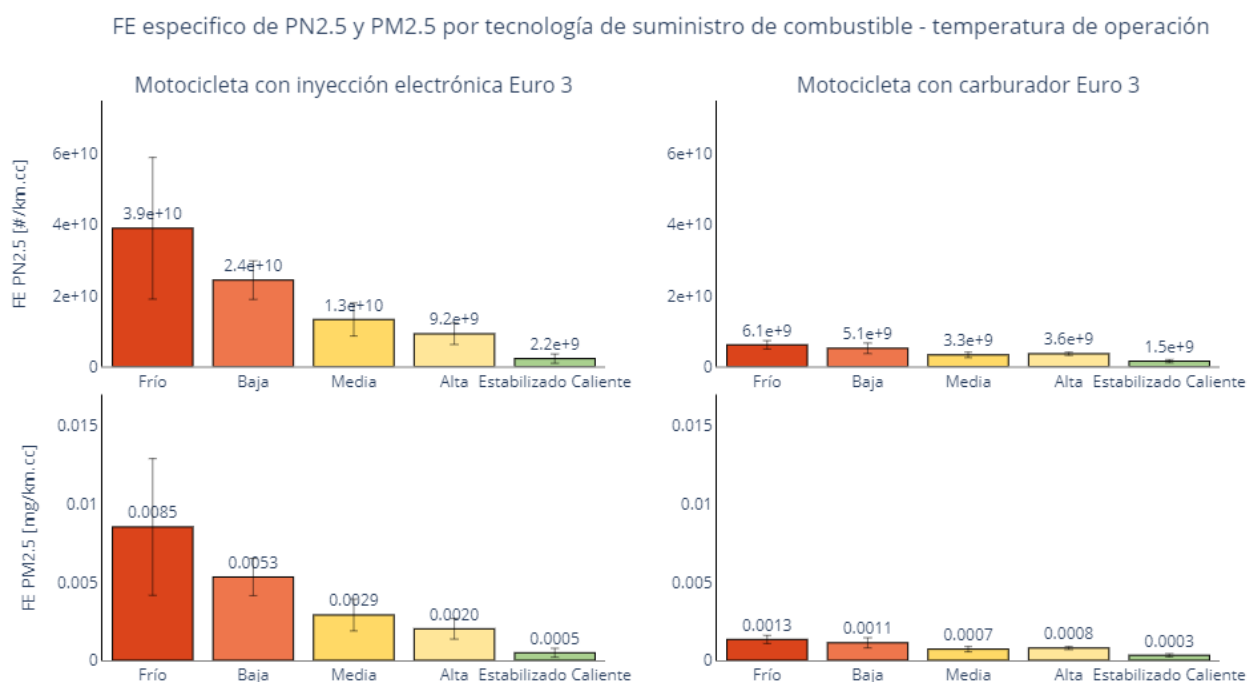


Figura 4.2. FE de PN2.5 por tecnología y temperatura de operación

La motocicleta con EFI presenta una diferencia considerable entre los FE de temperatura de operación en frío y estabilizado en caliente, pasando de $3,9 \pm 1,9 \times 10^{10}$ #/km·cc a $2,2 \pm 1,3 \times 10^9$ #/km·cc (para PN2.5), y de $0,0085 \pm 0,0043$ mg/km·cc a $0,0005 \pm 0,0002$ mg/km·cc (para PM2.5). La disminución de los FE es de alrededor de 94,2% (entre operación en frío y estabilizado en caliente), este resultado confirma el efecto del control de emisiones luego del proceso de calentamiento del motor (operación en lazo cerrado). Por otro lado, la motocicleta con carburador presenta también una diferencia significativa entre los FE de temperatura de operación en frío y estabilizado en caliente, pero en este caso es menor que para la motocicleta con EFI. Se pasa de $6,1 \pm 1,2 \times 10^9$ #/km·cc a $1,5 \pm 0,47 \times 10^9$ #/km·cc (para PN2.5), y pasando de $0,0013 \pm 0,0002$ mg/km·cc a $0,0003 \pm 0,0001$ mg/km·cc (para PM2.5). La disminución de los FE es de alrededor de 76,2%. Este comportamiento al cambiar la temperatura de operación, se debe a que los vehículos con sistema de alimentación a carburador generalmente se calibran para operación en un lugar específico (de manera mecánica), de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar. En este caso, la motocicleta con carburador Euro 3, proporcionada por un ensamblador local, ha sido calibrada para operar en el Valle de Aburrá.

Los FE de las motocicletas son similares en la fase de operación estabilizada en caliente. Esto indica que para la fase de trabajo estabilizado en caliente no se presenta un efecto marcado de la tecnología de suministro de combustible en las emisiones de PM. Sin embargo, para las temperaturas de operación en frío, baja, media, y alta se evidencian diferencias significativas para entre los FE de PN2.5 y PM2.5 (de un orden de magnitud), siendo la motocicleta con EFI la que presenta mayores emisiones. Esto indica que durante la fase de calentamiento se presenta un efecto adverso de la tecnología de suministro de combustible sobre las emisiones de PM.

Efecto de la tecnología de suministro de combustible y de las pautas de conducción

La figura 4.3 presentan el FE de PN2.5 por unidad de cilindrada, según la norma Euro que pueden cumplir las motocicletas, y según la pauta de conducción.

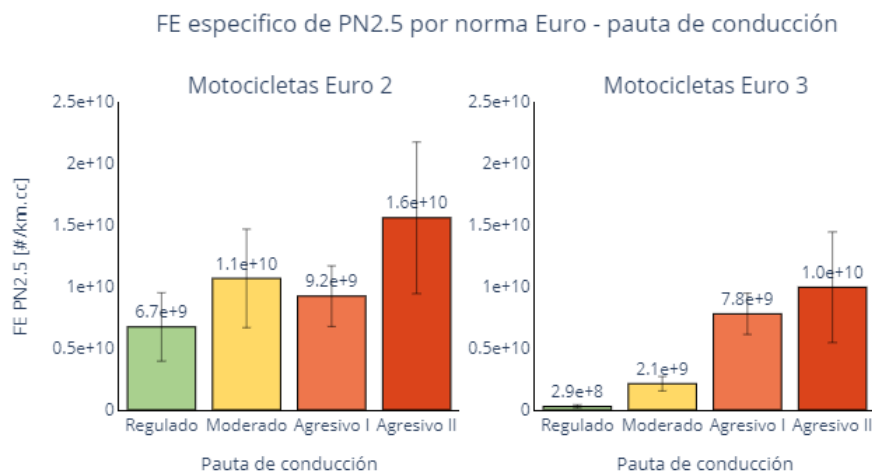


Figura 4.3. FE de PN2.5 por norma Euro y pauta de conducción

La figura 4.4 presenta el FE de PM2.5 de forma similar a la figura anterior.

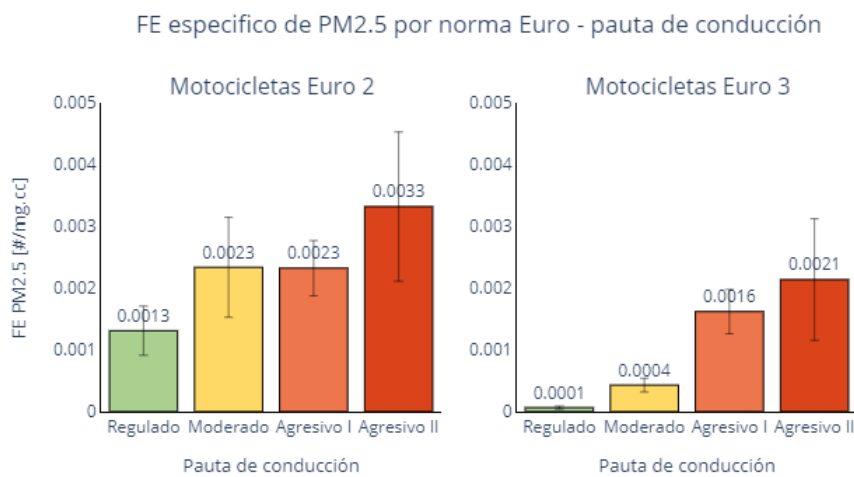


Figura 4.4. FE de PM2.5 por norma Euro y pauta de conducción

Al analizar los resultados entre pautas de conducción, se encuentra que, en general, las motocicletas Euro 3 presentan menores FE de PN2.5 y PM2.5, que los hallados para las motocicletas Euro 2. En particular, para el FE promedio de PN2.5, se encuentra que en la motocicleta Euro 3, éste es 24 veces menor en la pauta regulado, 5,2 veces menor en la pauta moderado, 1,2 veces menor en la pauta agresivo I, y 1,6 veces menor en la pauta agresivo II. Respecto al FE promedio de PM2.5 se tiene que éste es 13 veces menor para la pauta regulado, 5,8 veces menor para la pauta moderado, 1,4 veces menor para la pauta agresivo I, y 1,8 veces menor para la pauta agresivo II. El efecto del avance tecnológico para cumplir las normas de emisiones Euro, se acentúa principalmente en las pautas moderado y regulado. Esto significa que la modernización de las motocicletas a Euro 3 tendrá un efecto positivo en los FE de PM (aunque el PM, no esté limitado por la norma Euro 3), dependiendo principalmente de la pauta de conducción. Esto implica que, no solo basta con una modernización, sino, además, se deben de mejorar las condiciones que propicien pautas de conducción con menores índices de agresividad.

En las figuras 4.5 y 4.6 se presentan los FE de PN2.5 y PM2.5 por unidad de cilindrada, para cada pauta de conducción, por tipo de sistema de alimentación de combustible (carburador o EFI), y sistema de transmisión de potencia, mecánica (MT) o automática (AT), para motocicletas probadas en ruta y laboratorio.

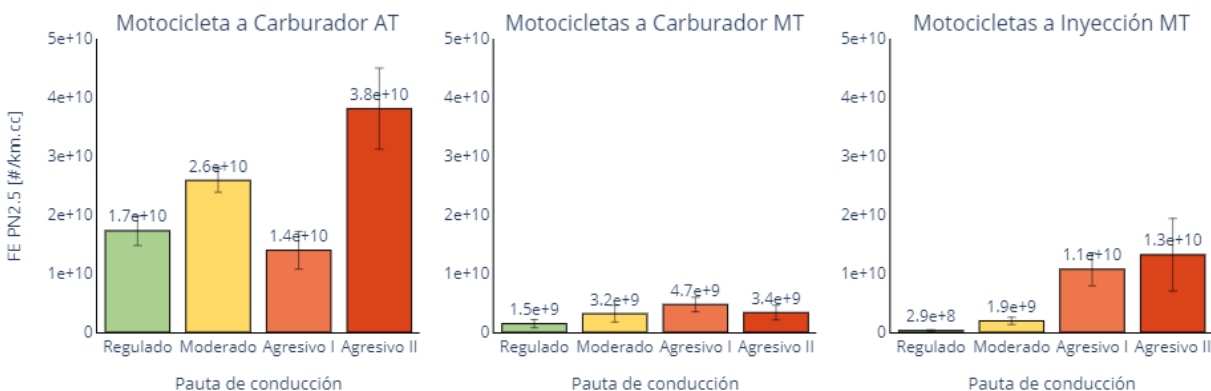


Figura 4.5. FE de PN2.5 por tecnología y pauta de conducción

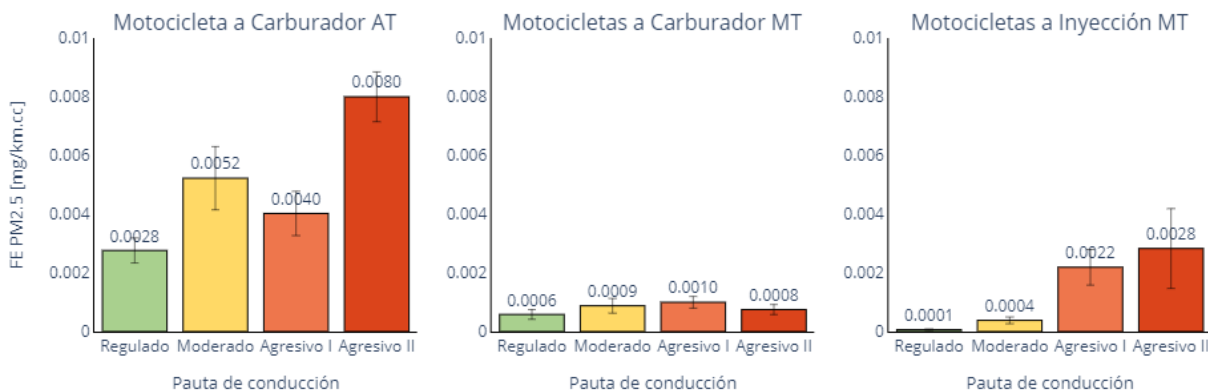


Figura 4.6. FE de PM2.5 por tecnología y pauta de conducción

La motocicleta con sistema de alimentación a carburador y con transmisión automática presenta los mayores FE para todas las pautas. El caso donde los FE de PN2.5 y PM2.5 es más marcado, corresponde a la pauta Regulado: donde el FE de PN2.5 es de $17 \pm 2,5 \times 10^9 \text{ \#/km}\cdot\text{cc}$ (motocicleta a carburador con AT). Este FE presenta una disminución de 11,3 veces en la motocicleta a carburador con MT, y una disminución de 58 veces en la motocicleta EFI con MT. La principal razón para este FE elevado es que la transmisión es variable continua (CVT), que basa la transmisión de potencia principalmente por fricción entre algunos componentes (poleas - banda, y zapata - campana). En este tipo de transmisiones, a bajas revoluciones se presenta alto deslizamiento, y este deslizamiento disminuye conforme aumenta la fricción, la cual es proporcional a las revoluciones del motor. Por esta razón, en este tipo de motocicletas se hace necesario aumentar las revoluciones del motor, si el objetivo de la conducción tener una respuesta rápida del vehículo, lo que equivale a tener un comportamiento similar al de una motocicleta con transmisión mecánica. La motocicleta a carburador con AT se probó bajo el ciclo de conducción del AMVA en banco de rodillos.

Las motocicletas con MT (con carburador, y con EFI) presentan pocas diferencias entre sí, en los FE de PN2.5 y PM2.5 para las diferentes pautas de conducción. Sin embargo, no hay una tendencia que indique que una de estas dos tecnologías de suministro de combustible tenga los menores FE para todas las pautas. La motocicleta con EFI presenta los menores FE para las pautas regulado y moderado, donde el FE de PN2.5 es respectivamente 5,2 veces, y 1,7 veces menor al FE hallado para la motocicleta con carburador. Este efecto se debe a que el sistema de inyección trabaja en modo de lazo cerrado (donde se produce control de emisiones), posiblemente bajo algunos parámetros de operación comunes con las pautas regulado y moderado. La motocicleta con carburador, por su lado, presenta los menores FE para las pautas agresivo I, y agresivo II, donde el FE de PN2.5 es respectivamente 2,2 veces, y 3.8 veces menor al FE hallado para la motocicleta con EFI. El mayor FE en las pautas agresivo I, y agresivo II de la motocicleta con EFI, se debe a que el sistema alimentación responde mejor a los requerimientos de potencia, dados en los cambios bruscos de aceleración. Ésta respuesta del sistema de inyección a los requerimientos de conductor (operación de lazo abierto), mejoran la percepción de potencia solicitada, aunque afectan las emisiones.

Síntesis

En este capítulo se modificó la definición de los FE al dividirlos por la cilindrada de cada motocicleta, con el fin de eliminar el efecto de esta variable sobre las emisiones. De este modo se puede identificar el impacto sobre las emisiones PM del sistema de suministro de combustible, del sistema de transmisión de potencia, y de la norma de emisiones Euro.

La evaluación del efecto de la tecnología de suministro de combustible sobre las emisiones de PN2.5, y PM2.5, se aborda de dos formas: En primer lugar, se usan los datos del capítulo 2, donde se identificó el efecto de la temperatura de operación sobre las emisiones de PM, con dos motocicletas MT, con capacidad de cumplir la norma Euro 3, una con EFI, y la otra con carburador. Estos resultados se evalúan para cada motocicleta probada, permitiendo valorar específicamente

el efecto del sistema de alimentación en el proceso de calentamiento del motor. Se encontró que el proceso de calentamiento y estabilización de la temperatura es mejor en la motocicleta con EFI, aunque este beneficio afecta negativamente las emisiones de PM, principalmente en operación con temperatura frío, baja, media y alta. En estas condiciones de temperatura los FE de PM son superiores hasta por un grado de magnitud respecto a la motocicleta con carburador. En ambas tecnologías los FE son similares en la fase de trabajo estabilizado en caliente.

La segunda aproximación se realizó a partir de los datos del capítulo 3, donde se halló el impacto de la pauta de conducción sobre las emisiones de PM, usando datos de pruebas en ruta (dos motocicletas), y en laboratorio (cuatro motocicletas). Estos resultados se evalúan para las seis motos probadas, de las cuales cuatro cuentan con sistema de alimentación por carburador (tres Euro 2, y una Euro 3), y dos motocicletas con EFI (Euro 3). Además, de estas motocicletas, una cuenta con sistema de transmisión automática, y las cinco restantes con transmisión mecánica. Se encontró que las motocicletas Euro 3 presentan menores FE de PN2.5 y PM2.5 para todas las pautas de conducción, principalmente en las pautas regulado y moderado. En la evaluación de la tecnología de suministro de combustible y del sistema de transmisión, se halló que la motocicleta a carburador con transmisión automática presenta por mucho los mayores FE (hasta 58 veces mayor), respecto a las demás motocicletas. Por otro lado, se encontró que, entre motocicletas con sistema de transmisión mecánica, los FE fueron similares, aunque con diferencias principalmente en las pautas regulado y moderado, donde se evidencia un marcado efecto de la tecnología, con los menores FE hallados para las motocicletas con EFI. Sin embargo, estas motocicletas (con inyección) presentan los mayores FE para en las pautas agresivo I y agresivo II.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo de investigación se abordó el problema de determinar las emisiones de material particulado en motocicletas bajo condiciones dinámicas. Se analizan cuatro motocicletas medidas en banco de rodillos bajo el ciclo de conducción del AMVA, y se midieron dos motocicletas adicionales bajo condiciones de conducción real, estudiando en éstas el efecto de los arranques en frío, de la temperatura del motor, de las pautas de conducción y de la tecnología de suministro de combustible, en las emisiones de PN2.5 y de PM2.5.

Respecto al efecto de los arranques en frío

- El PEMS configurado para motocicletas, con un peso de 55kg permite realizar pruebas en ruta durante periodos de aproximadamente 100 min, siendo de este modo apto para realizar pruebas en rutas urbanas y extra urbanas en motocicletas de cualquier categoría, de manera segura para los equipos y el conductor.
- Se encontró que la temperatura de operación del motor afecta significativamente a las emisiones de PM. A menor temperatura, mayores son los FE de PN2.5 y de PM2.5
- La duración del recorrido, la distancia recorrida y la temperatura de operación (frío, baja, media, alta, y estabilizado en caliente), están estrechamente correlacionados. Esto permite asociar los FE de PN2.5 y PM2.5 hallados para cada temperatura de operación a los viajes de motocicletas, si de estos se conocen la duración o la distancia recorrida.

Respecto al impacto de la pauta de conducción

- Se definió un índice de agresividad que permitió diferenciar claramente las pautas de conducción según las variables dinámicas de la motocicleta. De este modo se identificaron cuatro pautas de conducción. La pauta Regulado (índice de agresividad 0,14) está caracterizada por un tiempo en ralentí muy bajo, cambios de aceleración medios, bajas aceleraciones positivas promedio, y velocidades promedio altas, mientras que en el extremo opuesto la pauta Agresivo II (índice de agresividad 10,0) está caracterizada por un tiempo en ralentí medio, cambios de aceleración altos, altas aceleraciones positivas promedio, y velocidades promedio medias.
- Las pautas de conducción identificadas mediante el índice de agresividad tienen alto efecto sobre los FE de PN2.5 y de PM2.5 de las motocicletas con temperatura de operación en caliente probadas en ruta y en laboratorio. Se encontró que, a mayor agresividad de la pauta de conducción, se tienen mayores emisiones de PM. La pauta

regulada presenta cerca de 60% menos emisiones de PN2.5 y PM2.5, respecto a la pauta Agresivo II.

- El efecto de la pauta de conducción en los FE de PN2.5 y de PM2.5 se ve afectado aún más por la temperatura de operación. Si la motocicleta opera con temperaturas entre 34 °C y 60 °C (operación en frío), los FE de PN2.5 y de PM2.5 son en promedio un 59,3% mayores a los FE de las pautas con temperatura entre 91 °C y 113 °C (operación en caliente).

Respecto al efecto de la tecnología de suministro de combustible

- Dado que las motocicletas probadas tenían cilindrajes distintos, se modificaron los FE dividiéndolos por el cilindraje de cada motocicleta. Con esto se buscó eliminar la incidencia del tamaño del motor en las emisiones, y así evaluar el efecto del sistema de alimentación de combustible, del tipo transmisión de potencia, y de la norma Euro que cumplen los vehículos.
- Durante el calentamiento del motor desde temperaturas de operación en frío, hasta temperaturas de operación estabilizado en caliente, se encontró que con respecto a la motocicleta con carburador, la motocicleta con inyección electrónica, con una dosificación más precisa de combustible, logrando un proceso de calentamiento más continuo (con menos oscilaciones).
- Se encontró que la motocicleta con inyección electrónica de combustible (Euro 3) presenta mayores FE de PN2.5 y PM2.5, durante el proceso de calentamiento (temperaturas de operación por debajo de estabilizadas en caliente), respecto a la motocicleta con carburador (Euro 3). Los FE de PN2.5 y de PM2.5 son similares sólo durante la fase de trabajo estabilizado en caliente. Por lo tanto, no se aprecia un efecto positivo de los sistemas de inyección sobre las emisiones de PM durante el proceso de calentamiento del vehículo.
- Se encontró que las motocicletas Euro 3 presentan menores FE de PM para todas las pautas de conducción, respecto a las motocicletas Euro 2. Los FE de PM2.5 disminuyen entre 1,4 y 13 veces, mientras que los FE de PN2.5 disminuyen entre 1,2 y 24 veces. Esta disminución se enfatiza en las pautas regulado y moderado, con disminuciones de hasta 95,6 % en los FE de PN2.5 y de hasta 9,3% para PM2.5. Este resultado sugiere los beneficios potenciales de una renovación tecnológica. Además, se sugiere buscar estrategias que propendan por aumentar el porcentaje de viajes con pautas regulado y moderado, lo cual tendría un efecto significativo en las emisiones de PM. Esto se puede lograr mejorando la educación de los conductores, así como la malla vial de la región.
- Se encontró un efecto significativo del sistema de transmisión en los FE por pauta de conducción. Los FE de PN2.5 y de PM2.5 para todas las pautas de conducción son

mayores entre un 66,4% a 91,1%, en la motocicleta a carburador con transmisión automática, respecto a la motocicleta a carburador con transmisión mecánica.

- Las motocicletas con inyección electrónica de combustible y con transmisión mecánica, presentan menores FE de PN2.5 y de PM2.5, en las pautas regulado y moderado, y con operación estabilizado en caliente. Esto implica que las bondades en las emisiones del control electrónico en el suministro de combustible sólo se aprecian en modos de conducción con altas y medias velocidades promedio, bajas aceleraciones positivas promedio, y bajos tiempos en ralentí. Este beneficio se desvanece en las pautas agresivo I, y agresivo II, donde los FE son mayores a los hallados para la motocicleta a carburador con transmisión manual.

Trabajos futuros

Con el fin de fortalecer los resultados hallados en este trabajo se enuncian a continuación algunas alternativas a tener en cuenta para trabajos futuros:

- Realizar pruebas de calibración del PEMS de motocicletas respecto a la instrumentación de laboratorio, recorriendo ciclos como el WMTC y el ciclo de motocicletas del AMVA.
- Ampliar el espectro de cilindrajes, tecnologías de suministro de combustible y sistemas de transmisión para pruebas en ruta y en laboratorio con el objeto de evaluar con mayor precisión el efecto de estas variables en los FE de PN2.5 y de PM2.5.
- Realizar estudios de arranque en frío detallados, que incluyan además de PM, emisiones gaseosas.
- Evaluar la operación de lazo abierto y cerrado de los sistemas de inyección electrónica de combustible de motocicletas, en los arranques en frío y bajo pautas de conducción de alto índice de agresividad y su efecto en los FE de PN2.5 y de PM2.5.
- Implementar un modelo de análisis modal de emisiones (AME) para motocicletas y evaluar como descriptor adicional el índice de agresividad de la pauta de conducción y/o la temperatura de conducción, para la predicción de FE de PN2.5 y de PM2.5 en motocicletas en el valle de Aburrá.

Referencias

- [1] Payri F and Desantes J 2017 *Motores de combustión interna alternativos* ed E Reverté
- [2] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) and UdeA (Universidad de Antioquia) 2017 *Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá - FEVA. Entregable 3 de 4*
- [3] Delphi 2018 *Worldwide emissions etandards - Passenger cars and light duty vehicles 2018/2019*
- [4] Parliament E and Council E 2013 *Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the council of 15 January 2013* (European Union)
- [5] ANDI (Cámara de la Industria Automotriz de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia) 2019 *Las motocicletas en Colombia: aliadas del desarrollo del país vol 2*
- [6] Congreso de Colombia 2019 *Ley 1972 de 18 de julio del 2019* (Colombia)
- [7] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) 2017 Presentación: Ampliación vía distribuidora sur 28
- [8] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) 2018 Acuerdo Metropolitano N°04 de 2018-POECA 20
- [9] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) 2016 Acuerdo Metropolitano 15 - POECA 23
- [10] DANE - Instituto Nacional de Estadística 2019 Resultados Censo Nacional de Poblacion y Vivienda
- [11] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) and UPB (Universidad Pontificia Bolivariana) 2018 *Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá – año 2016*
- [12] RUNT (Registro Único Nacional de Tránsito) 2018 *Boletin de prensa 002 de 2018*
- [13] Mercado D 2019 El valle de Aburrá superó las 900.000 motos matriculadas. *Casa Editor. El Tiempo*
- [14] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) and UPB (Universidad Pontificia Bolivariana) 2014 *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011*
- [15] AMVA and Antioquia U de 2018 Presentacion Articulación Universidad-Empresa-Estado para determinar los factores de emisión reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (FEVA – 1)
- [16] Toro V, Ramirez J, Quiceno R and Zuluaga C 2001 Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión Corinair. *ACODAL* **191** 42–9
- [17] Franco V, Kousoulidou M, Muntean M, Ntziachristos L, Hausberger S and Dilara P 2013 Road vehicle emission factors development: A review. *Atmos. Environ.* **70** 84–97
- [18] Tzeng G-H and Chen J-J 1998 Developing a Taipei motorcycle driving cycle for emissions and fuel economy. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **3** 19–27
- [19] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) and UdeA (Universidad de Antioquia) 2017 *Articulación Universidad-Empresa-Estado para determinar los factores de emisión reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (FEVA – 1). Entregable 2 de 4*
- [20] Barlow T, Latham S, Mccrae I and Boulter P 2009 *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.* (JHS)

- [21] Ntziachristos L, Giechaskiel B, Pistikopoulos P, Fysikas E and Zissis S 2003 Particle Emissions Characteristics of Different On-Road Vehicles. *SAE Int.* 11
- [22] Giraldo W and Toro M V 2008 Estimación de la emisión de contaminates por motocicletas en el Valle de Aburrá. *DYNA* **75** 241–50
- [23] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) and UdeA (Universidad de Antioquia) 2017 *Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá - FEVA. Entregable 1 de 4*
- [24] Vojtisek-lom M, Zardini A, Pechout M, Dittrich L, Forni F, Montigny F, Carriero M, Giechaskiel B and Martini G 2020 A miniature Portable Emissions Measurement System (PEMS) for real-driving monitoring of motorcycles. *Atmos. Meas. Tech.* 39
- [25] Bischoff G, Keller S and Heubuch A 2020 Portable Emission Measurement Technology and RDE on Motorcycles as Instruments for Future Challenges. *MTZ-Magazine* 54–8
- [26] Palke D R and Tyo M A 1999 The Impact of Catalytic Aftertreatment on Particulate Matter Emissions from Small Motorcycles *SAE Int.* 9
- [27] Tsai J-H, Chiang H-L, Hsu Y-C, Peng B-J and Hung R-F 2005 Development of a local real world driving cycle for motorcycles for emission factor measurements. *Atmos. Environ.* **39** 6631–41
- [28] Chen K S, Wang W C, Chen H M, Lin C F, Hsu H C, Kao J H and Hu M T 2003 Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions. *Sci. Total Environ.* **312** 113–22
- [29] Tong H Y, Tung H D, Hung W T and Nguyen H V. 2011 Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam. *Atmos. Environ.* **45** 5191–9
- [30] Tung H D, Tong H Y, Hung W T and Anh N T N 2011 Development of emission factors and emission inventories for motorcycles and light duty vehicles in the urban region in Vietnam. *Sci. Total Environ.* **409** 2761–7
- [31] Iodice P and Senatore A 2015 Exhaust emissions of new high-performance motorcycles in hot and cold conditions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **12** 3133–44
- [32] Tuan L A, Tuan P M, Truc N T and Vinh N D 2012 Measurements of Emission factors and Fuel Consumption for Motocycles on a Chassis Dynamometer based on a localized driving cycle *ASEAN Eng. Journal, part C* **1** 74–86
- [33] Seedam A, Satiennam T, Radpukdee T and Satiennam W 2015 Development of an onboard system to measure the on-road driving pattern for developing motorcycle driving cycle in Khon Kaen city , Thailand. *IATSS Res.* **39** 79–85
- [34] Yao Y-C, Tsai J-H, Ye H-F and Chiang H-L 2009 Comparison of Exhaust Emissions Resulting from Cold- and Hot-Start Motorcycle Driving Modes. *Air Wate Manag. Assoc.* **59** 1339–46
- [35] Iodice P and Senatore A 2013 Influence of Ethanol-gasoline Blended Fuels on Cold Start Emissions of a Four-stroke Motorcycle. *SAE Int.* 8
- [36] Iodice P and Senatore A 2015 Exhaust emissions of new high-performance motorcycles in hot and cold conditions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 3133–44
- [37] Prati M V and Costagliola M A 2009 Emissions of Fine Particles and Organic Compounds from Mopeds. *Environ. Eng. Sci.* **26** 111–21

- [38] Giechaskiel B, Zardini A A, Lahde T, Perujo A, Kontses A and Ntziachristos L 2019 Particulate Emissions of Euro 4 Motorcycles and Sampling Considerations. *Atmos. - MDPI* 17
- [39] Kim Oanh N T, Thuy Phuong M T and Permadi D A 2012 Analysis of motorcycle fleet in Hanoi for estimation of air pollution emission and climate mitigation co-benefit of technology implementation. *Atmos. Environ.* **59** 438–48
- [40] AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) 2017 Encuesta de Origen - Destino - Análisis de Viajes
- [41] RUNT (Registro Único Nacional de Tránsito) 2017 *Boletín de Prensa 007 Marcas más matriculadas en el primer semestre de 2017*
- [42] EPA (Environmental Protection Agency) 2005 *40 CFR Parts 85, 86, et al. Environmental Test Procedures for Testing Highway and Nonroad Engines and Omnibus Technical Amendments.* vol 70 (United States)
- [43] Besch M C, Thiruvengadam A, Kappanna H K, Cozzolini A, Carder D K and Gautam M 2011 Assessment of novel in-line particulate matter sensor with respect to OBD and emissions control applications. *ASME* 2011 1–13
- [44] Lanki T, Tikkanen J, Janka K, Taimisto P and Lehtimäki M 2011 An electrical sensor for long-term monitoring of ultrafine particles in workplaces *J. Phys. Conf. Ser.* **304**
- [45] Kousoulidou M, Fontaras G, Ntziachristos L, Bonnel P, Samaras Z and Dilara P 2013 Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors. *Atmos. Environ.* **64** 329–38
- [46] Savitzky A and Golay M 1964 Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* **36** 1627–39
- [47] Agudelo A F, Agudelo J R and Benjumea P N 2007 *Diagnóstico de la Combustión de biocombustibles en Motores.* (Imprenta Universidad de Antioquia)
- [48] Tsai J, Chiang H, Hsu Y and Weng H 2003 The speciation of volatile organic compounds (VOCs) from motorcycle engine exhaust at different driving modes. *Atmos. Environ.* **37** 2485–96
- [49] Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, Piatko C D, Silverman R and Wu A Y 2002 An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **24**
- [50] Purnima B and Arvind K 2014 EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means in WSN. *Int. J. Comput. Appl.* **105** 17–24
- [51] Prati M V., Zamboni G, Costagliola M A, Meccariello G, Carraro C and Capobianco M 2011 Influence of driving cycles on Euro 3 scooter emissions and fuel consumption. *Energy Convers. Manag.* **52** 3327–36

Anexos

Pruebas en ruta

Para las pruebas de conducción real en motocicletas, se configuró un PEMS conformado por unos equipos y sensores. En este anexo se presentan los resultados de la caracterización de los sensores de temperatura de gases de escape (EGT), de temperatura de aceite del motor (EOT), y de flujo de aire de admisión (MAF). Se presenta también, las características técnicas de los equipos.

Caracterización de sensores utilizados en el PEMS

Se midió el flujo del aire de admisión con un sensor de hilo caliente (MAF). El sensor se instaló en serie respecto al sensor MAF, de un motor atmosférico de encendido provocado de 1600 cm³. Con un escáner se registró el flujo másico del aire de admisión, y con un voltímetro el voltaje del sensor que se caracteriza. En la figura A.1 se presenta el resultado de la caracterización del sensor MAF.

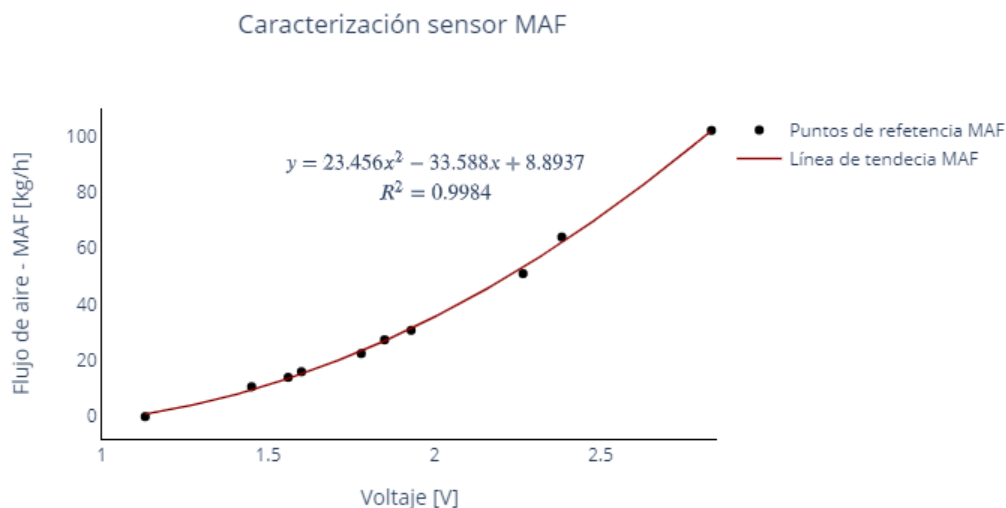


Figura A.1. Comportamiento sensor de aire de admisión

Se midió la temperatura de los gases de escape y del aceite del motor, con el uso termopares tipo K. Los sensores se introdujeron en un fluido caliente, se registró la señal de voltaje generada por cada termopar (puntos de referencia), mientras con un termómetro de mercurio se registró la temperatura correspondiente. En la figura A.2 y A.3 se presentan los resultados de la caracterización de los sensores EGT y EOT.

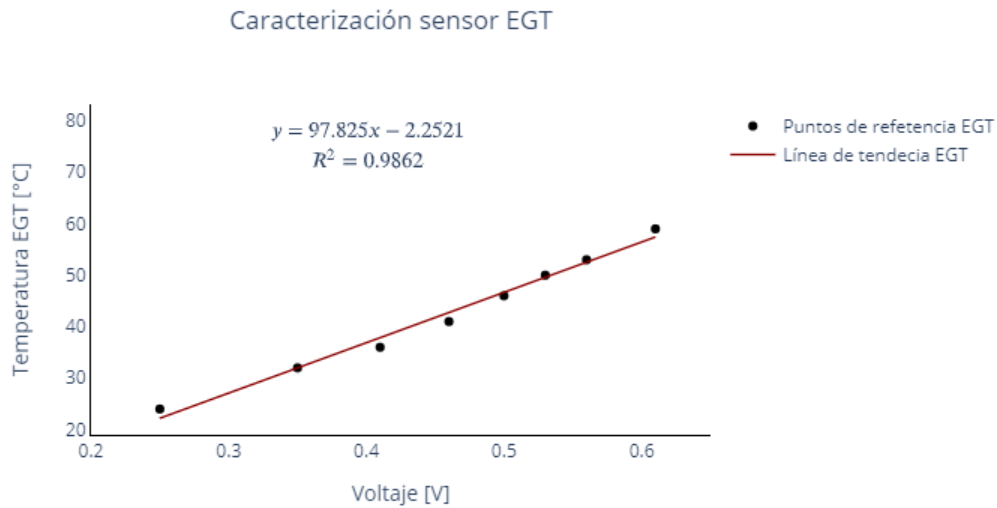


Figura A.2. Caracterización sensor de temperatura gases de escape

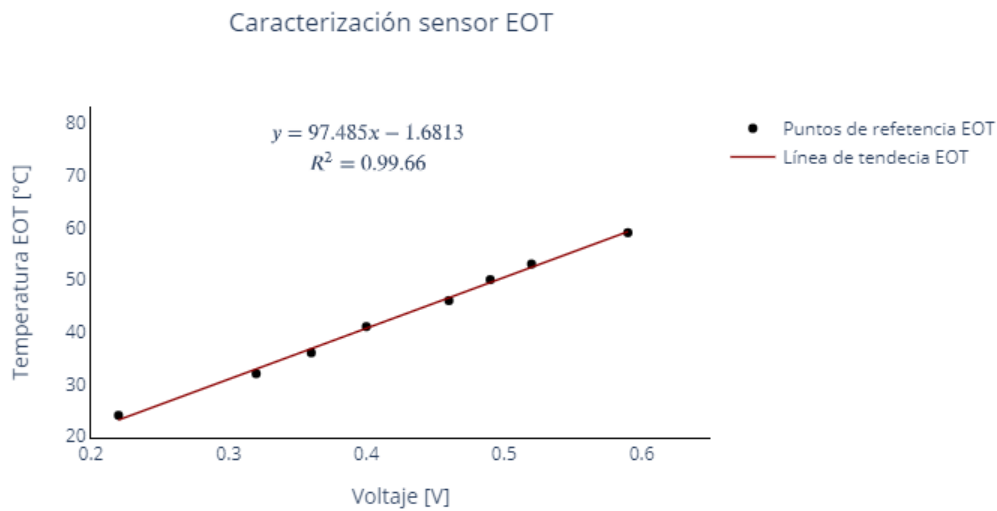


Figura A.3. Comportamiento sensor de temperatura aceite del motor

Se utilizó un circuito de acondicionamiento de señal, desde el cual se tomó el voltaje en el sistema de adquisición de datos.

Especificaciones técnicas de los equipos utilizados en el PEMS

Se utilizó para la medición de material particulado, un equipo de carga electrostática en una única corona de descarga, mediante ionización de una corriente de aire ultra-puro (equipo Sensor de Partículas Pegasor M o PPS-M). En el PPS-M las partículas se cargan por los iones generados por

una descarga de corona, que se genera alrededor de una punta afilada a alto voltaje. Después de la carga, las partículas no se recogen en ningún filtro, ni se acumulan en ninguna parte del sensor. Sin embargo, a medida que las partículas cargadas salen del sensor, producen una corriente eléctrica que se escapa de la copa de Faraday. La medición de esta corriente es proporcional a la concentración y al área de la superficie de las partículas. Este equipo tiene una frecuencia de muestreo de 10 Hz, y sus especificaciones técnicas se presentan en la tabla A.1

Tabla A.1. Especificaciones técnicas PPS-M

Tamaño de partícula mínimo detectable	0,023 μm
Tamaño de partícula máximo detectable	2,5 μm
Rango de concentración de partículas (masa)	De 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 290 mg/m^3
Rango de concentración de partículas (número)	300 $\#/\text{cm}^3$ a $1,3 \times 10^9 \#/\text{cm}^3$

El suministro de aire es provisto por un cilindro de aire seco comprimido, con capacidad de 2 m^3 , a una presión de 1.600 PSI (110,31 bar). Se aseguró un flujo de aire puro al PPS-M, con la instalación de una unidad de limpieza y purificación de aire, integrada por cinco filtros conectados en serie (separador de neblina, filtro de eliminación de olores, filtro de aire, secador de aire de membrana, y un deshumidificador). En la tabla A.2. se presentan las referencias de los filtros que componen la unidad de limpieza y purificación.

Tabla A.2. Referencias filtros unidad de limpieza y purificación

Descripción
Filtro de aire AMF AF20-FO2C-A
Separador de neblina AMF150C-FO2
Filtro de eliminación de olores AMF 150C-FO2
Separador de neblina deshumidificador AMF IR200C-FO2
Secador de aire de membrana AMF IDG3-FO2-S

Para la adquisición y almacenamiento de dato, se utilizó una DAQ conectada a un Micro-PC. Las características de esto equipos se presentan en la tabla A.3.

Tabla A.3. Referencias equipos adquisición y almacenamiento de datos

Descripción	Referencia
Micro-PC	LattePanda 2GB/32GB (sistema operativo Windows 10)
Tarjeta de adquisición de datos	National Instruments USB – 6218 (programa LabVIEW)

Pruebas en laboratorio

En la reproducción del ciclo de motocicletas del AMVA, realizado en laboratorio, se midió el flujo de los gases de escape (Equipo HORIBA), y la concentración de material particulado en masa y número (equipo Dekati). En este anexo se presentan las especificaciones de los equipos utilizados en la medición de estas variables.

En la tabla A.4 se presentan las especificaciones técnicas respectivamente del equipo Dekati-ELPI.

Tabla A.4. Especificaciones técnicas del equipo de medición de PM Dekati-ELPI

c	0,006 – 10 μm
Número de clases de tamaño	14 100/500 con alta resolución
Tasa de flujo de muestra	10 lpm
Dimensiones del equipo	H407 x W454 x D242 mm
Diámetro del plato colector	25 mm
Unidad de masa	15 kg sin impactador 22 kg con el impactador en su lugar
Requerimiento de bombeo	20 m ³ /h @ 40 mbars
Temperatura de muestra	10-35 °C 10-180 °C con alta temperatura
Humedad de muestra	0-90 % de humedad relativa sin condensación
Frecuencia de muestreo	10 Hz
Alimentación del equipo	100-250 V, 50-60 Hz, 200W
Requerimientos de computador	MS-Windows 7™, MS-Windows 8™
Tipo de conexión al computador	RS-232 o Ethernet
6 entradas analógicas	0-5 V
3 salidas analógicas	0-10 V

En la tabla A.5. se presentan las dimensiones de cada impactador del equipo Dekati-ELPI

Tabla A.5. Dimensiones de cada impactador del Dekati-ELPI

Imp. Núm.	D50% [μm]	Di [μm]	Número mín. [1/cm³]	Número máx. [1/cm³]	Masa mín. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Masa máx. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
15	10					
14	5,3	7,3	0,1	1,7E+04	11	3400
13	3,6	4,4	0,1	3,0E+04	4	1300
12	2,5	3,0	0,16	5,2E+04	2,3	730
11	1,6	2,0	0,3	9,7E+04	1,3	400
10	0,94	1,2	0,6	2,0E+05	0,6	195
9	0,60	0,75	1,2	3,9E+05	0,3	85
8	0,38	0,48	2	6,8E+05	0,12	38
7	0,25	0,31	4	1,2E+06	0,06	17
6	0,15	0,19	6	2,0E+06	0,03	7,7
5	0,094	0,12	12	3,7E+06	0,01	3,2
4	0,054	0,071	21	7,0E+06	0,004	1,3

3	0,030	0,040	42	1,4E+07	0,0015	0,47
2	0,016	0,022	90	3,0E+07	0,0005	0,16
1	0,006	0,010	240	7,9E+07	0,0002	0,03

Las características técnicas de interés en el desarrollo de este trabajo de investigación, del equipo HORIBA se presentan en la tabla A.6.

Tabla A.6. Especificaciones técnicas del HORIBA OBS-ONE-GS12

Dimensiones del equipo	H330 x W350 x D470 mm
Peso aproximado	33 kg
Rango de medición del flujo de escape	0-0.2 a 0-65 m ³ /min
Rango de medición de temperatura de escape	0 a 800 °C
Frecuencia de muestreo	10 Hz
Alimentación del equipo	20-28 VDC, 0.45KW

Flujos máxicos de gases de escape para pruebas en ruta

El flujo máxico de los gases de escape se calculó según lo descrito en el Capítulo 2.

En la figura A.4 se presenta el flujo máxico de gases de escape con una frecuencia de 10 datos por segundo, de la motocicleta de 150 cc para una de las pruebas en ruta.

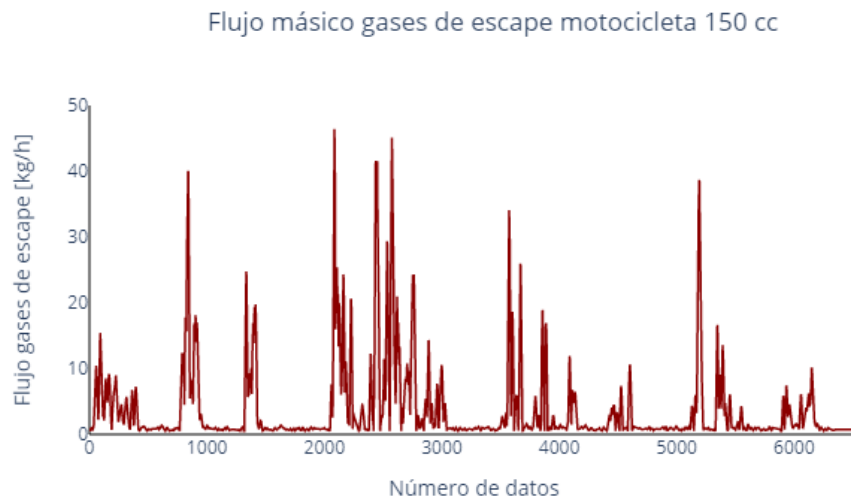


Figura A.4. Flujo máxico de gases de escape motocicleta 150 cc

En la figura A.5 se presenta el flujo máxico de gases de escape con una frecuencia de 10 datos por segundo, de la motocicleta de 125 cc para una de las pruebas en ruta.

Flujo másico gases de escape motocicleta 125 cc

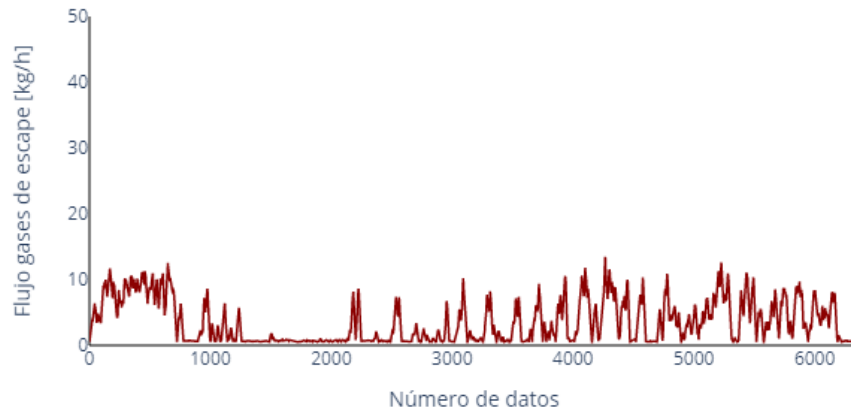


Figura A.5. Flujo másico de gases de escape motocicleta 125 cc

Flujos volumétricos de gases de escape para pruebas en ruta y laboratorio

El flujo volumétrico de los gases de escape para las pruebas en ruta, se calculó según lo descrito en el Capítulo 2.

En la figura A.6 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de 10 datos por segundo, de la motocicleta de 150 cc para una de las pruebas en ruta.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 150 cc

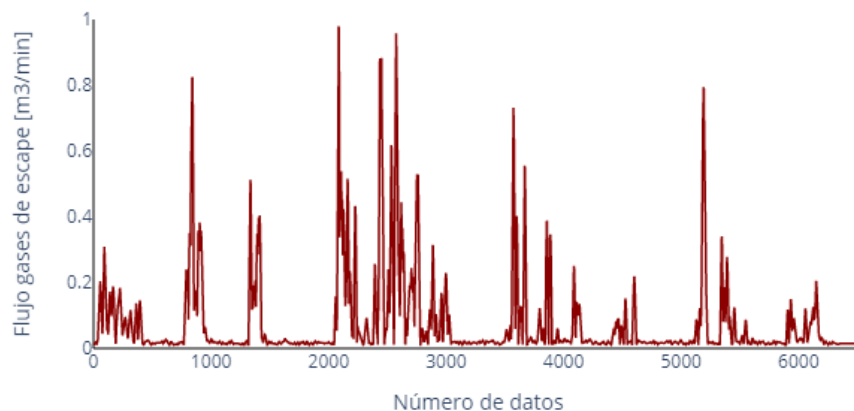


Figura A.6. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 150 cc

En la figura A.7 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de 10 datos por segundo, de la motocicleta de 125 cc para una de las pruebas en ruta.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 125 cc

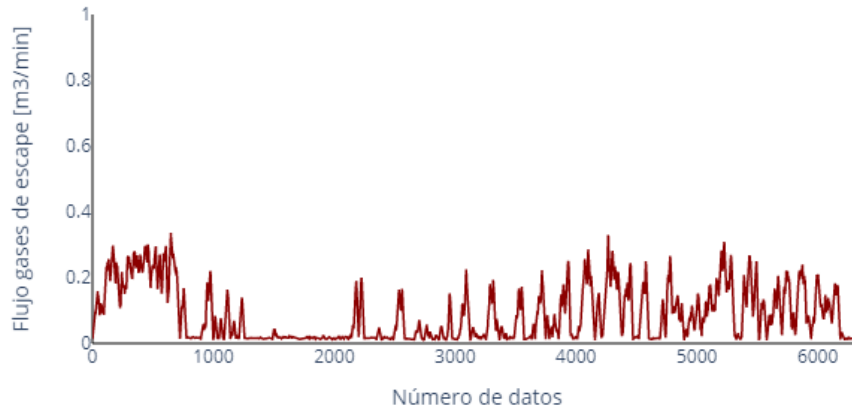


Figura A.7. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 150 cc

El flujo volumétrico de los gases de escape de las pruebas en laboratorio, se mide directamente con el equipo Horiba OBS ONE.

En la figura A.8 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de un dato por segundo, de la motocicleta de 125 cc para una de las pruebas en laboratorio.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 125 cc

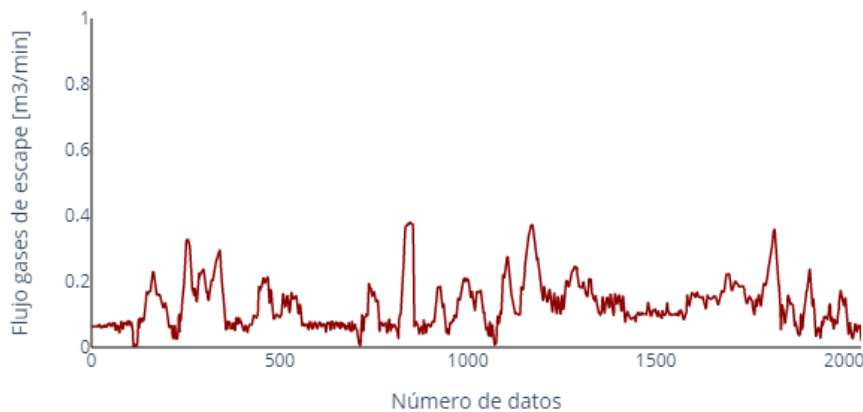


Figura A.8. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 125 cc

En la figura A.9 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de un dato por segundo, de la motocicleta de 160 cc para una de las pruebas en laboratorio.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 160 cc

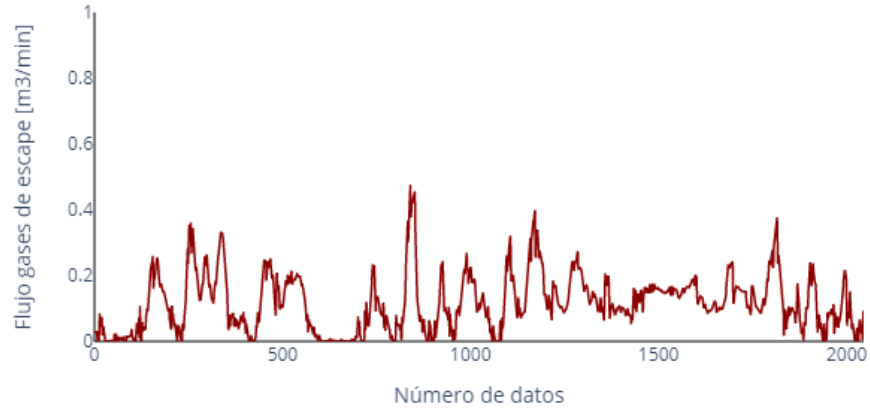


Figura A.9. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 160 cc

En la figura A.10 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de un dato por segundo, de la motocicleta de 150 cc para una de las pruebas en laboratorio.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 150 cc

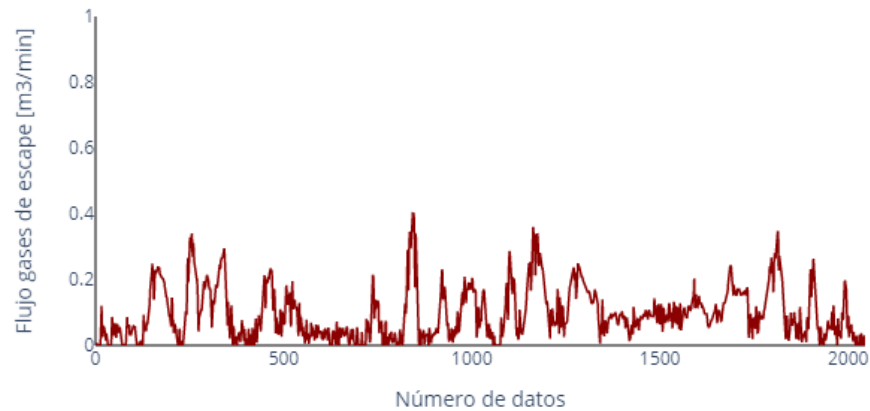


Figura A.10. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 150 cc

En la figura A.11 se presenta el flujo másico de gases de escape con una frecuencia de un dato por segundo, de la motocicleta de 110 cc para una de las pruebas en laboratorio.

Flujo volumétrico gases de escape motocicleta 110 cc

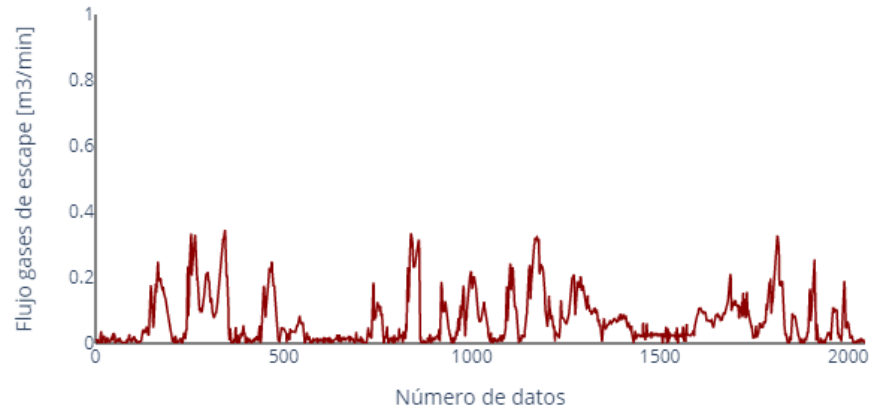


Figura A.11. Flujo volumétrico de gases de escape motocicleta 110 cc