



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DISEÑO METODOLÓGICO PARA EL DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE
CICLOS DE CONDUCCIÓN DE LA TRONCAL 1 DEL SISTEMA BRT DE
GUAYAQUIL MEDIANTE ANÁLISIS SEGMENTADO DE TRAYECTORIAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Automotriz

**AUTORES: JIMM HARRYS GONZÁLEZ PAREDES
GUILLERMO XAVIER GUAMÁN WONG**

TUTOR: ING. JOSÉ LUIS MALDONADO ORTEGA, MGTR.

Guayaquil – Ecuador

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Guillermo Xavier Guaman Wong, con documento de identificación N° 0931326458 y Jimm Harrys González Paredes con documento de identificación N° 0604522813, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 24 de febrero del año 2026

Atentamente,



Guillermo Xavier Guaman Wong

0931326458



Jimm Harrys González Paredes

0604522813

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Guillermo Xavier Guaman Wong con documento de identificación N° 0931326458 y Jimm Harrys González Paredes con documento de identificación N° 0604522813, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Diseño Metodológico Para El Desarrollo Y Evaluación De Ciclos De Conducción De La Troncal 1 Del Sistema BRT De Guayaquil Mediante Análisis Segmentado De Trayectorias” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 24 de febrero del año 2026

Atentamente,



Guillermo Xavier Guaman Wong

0931326458



Jimm Harrys González Paredes

0604522813

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Luis Maldonado Ortega con documento de identificación N° 1105738395, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO METODOLÓGICO PARA EL DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN DE LA TRONCAL 1 DEL SISTEMA BRT DE GUAYAQUIL MEDIANTE ANÁLISIS SEGMENTADO DE TRAYECTORIAS, realizado por Guillermo Xavier Guaman Wong con documento de identificación N° 0931326458 y por Jimm Harrys González Paredes con documento de identificación N° 0604522813, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 24 de febrero del año 2026

Atentamente,



José Luis Maldonado Ortega

1105738395

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, pilar fundamental en cada etapa de mi vida, a mis padres por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, por su apoyo incondicional y por ser la inspiración que me motivó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles; a mis hermanos por sus palabras de aliento y compañía que han sido un motor de fortaleza; y a toda mi familia por brindarme amor, comprensión y confianza, elementos que han hecho posible la culminación de este logro académico. Con todo mi cariño y gratitud, les dedico este trabajo.

Guillermo Guamán

Agradezco en primer lugar a Diosito, por guiarme en cada paso de este camino, darme la fortaleza necesaria y escucharme siempre que lo necesité, siendo mi refugio en los momentos más difíciles. A mi familia, y de manera especial a mis padres, quienes, con su amor incondicional, apoyo constante y sabios consejos, han sido mi mayor motivación y ejemplo para no rendirme ante los retos que se presentaron. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y a esforzarme por alcanzar mis metas. Extiendo también mi gratitud a mis amigos de la universidad, con quienes compartí no solo largas jornadas de estudio, sino también momentos de compañerismo y alegría que hicieron más llevadero este proceso. Ellos fueron un sostén fundamental en la construcción de esta etapa, aportando ánimo y colaboración cuando más lo necesité.

Jimm González

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento al Ing. Jose Maldonado, tutor de este trabajo de investigación, por su constante guía, compromiso y acompañamiento durante todo el proceso de elaboración. Su orientación académica, sus observaciones precisas y su disposición para resolver nuestras inquietudes fueron elementos determinantes que enriquecieron el desarrollo del estudio y nos permitieron avanzar con seguridad en cada etapa. Valoramos especialmente la paciencia con la que compartió sus conocimientos y la claridad de sus recomendaciones, que no solo contribuyeron a la culminación de este proyecto, sino que también fortalecieron nuestra formación profesional y personal. Reconocemos en su labor no solo el rol de tutor, sino también el de mentor, cuya influencia ha dejado una huella significativa en nuestro aprendizaje.

Guillermo Guamán & Jimm González

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen:	1
1. Introducción	2
2. Materiales y métodos	3
2.1 Materiales	3
2.1.1 Geo Tracker Pro	3
2.1.2 GPS portátil Garmin eTrex 32x.....	4
2.1.3 Verificación de consistencia entre dispositivos GPS	4
2.1.4 Herramientas de análisis de datos.....	5
2.1.5 GPS Visualizer	5
2.1.6 Métodos de análisis de ciclos de conducción	5
2.1.7 Método de Microviaje	6
2.2 Metodología.....	6
a. Proceso metodológico para la obtención de los ciclos de conducción.....	9
2.3 Validación estadística del ciclo representativo	11
3. Resultados obtenidos.....	11
4.1. Comparación entre recorridos reales y ciclo representativo	13
4.2. Ciclo de conducción representativo final	14
4.3. Segmentación dinámica del ciclo representativo.....	16
4. Discusión.....	18
5. Conclusiones	20
6. Bibliografías.....	30

Artículo académico

Diseño metodológico para el desarrollo y evaluación de ciclos de conducción de la troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil mediante análisis segmentado de trayectorias.

Guillermo Guaman Wong¹, Jimm Gonzales Paredes² y José Maldonado Ortega³

¹ Universidad Politécnica Salesiana; gguamanw@est.ups.edu.ec

² Universidad Politécnica Salesiana; jgonzalesp@est.ups.edu.ec

³ Universidad Politécnica Salesiana; jmaldonado@ups.edu.ec

Resumen:

Los Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (BRT) constituyen una alternativa clave para mejorar la movilidad urbana y optimizar la eficiencia del transporte público en ciudades de alta demanda. En este estudio se desarrolló y evaluó un ciclo de conducción representativo para la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil, mediante un análisis segmentado de trayectorias basado en datos reales de operación. La investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y observacional, aplicando un diseño factorial que consideró el sentido de la ruta, la franja horaria y el tipo de día. Se analizaron doce recorridos experimentales registrados mediante dispositivos GPS con una frecuencia mínima de muestreo de 1 Hz; a de estos datos se evaluaron variables dinámicas como velocidad media, velocidad máxima, tiempo de ralentí, aceleraciones y desaceleraciones empleando un proceso de segmentación, este análisis evidenció diferencias operativas significativas entre seis segmentos de la troncal, identificándose tramos con mayor estabilidad y otros con mayor severidad dinámica, asociados a congestión y alta frecuencia de paradas, teniendo como resultados que el ciclo obtenido tiene una duración total de 1800s, una velocidad media de 26.17 km/h y una velocidad máxima de 62.25 km/h, con un tiempo de detención de 18.78 % del recorrido total, reflejando condiciones típicas de operación urbana, se realizó una comparación con el ciclo normativo FTP-75, evidenciando que el ciclo representativo local muestra mayor variabilidad temporal y una distribución no uniforme de paradas, propias de la operación real del sistema BRT. En conclusión, aunque ambos ciclos presentan rangos de velocidad máxima y porcentajes de ralentí comparables, los resultados confirman que el FTP-75 no reproduce adecuadamente las condiciones reales de operación de la Troncal 1, por lo que, se logró que el ciclo de conducción desarrollado muestre de forma realista el comportamiento dinámico del sistema BRT de Guayaquil y constituye una herramienta técnica adecuada para la evaluación del desempeño operativo, energético y ambiental bajo condiciones locales reales.

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor:

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2026 por los autores. Presentado para su posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de Creative Commons Attribution license.

Palabras clave: Movilidad urbana, Microviajes, Consumo de combustible, Sistema BRT, Ciclo de Conducción.

Abstract: Bus Rapid Transit (BRT) systems constitute a key alternative for improving urban mobility and optimizing the efficiency of public transportation in high-demand cities. In this study, a representative driving cycle was developed and evaluated for Trunk Line 1 of the BRT system in Guayaquil through a segmented trajectory analysis based on real operational data. The research was conducted under a quantitative, descriptive, and observational approach, applying a factorial design that considered route direction, time period, and type of day across twelve experimental trips recorded using GPS devices with a minimum sampling frequency of 1 Hz. Dynamic variables such as average speed, maximum speed, idling time, accelerations, and decelerations were analyzed through a segmentation process. This analysis revealed significant operational differences among six segments of the trunk line, identifying sections with greater stability and others with higher dynamic severity, associated with congestion and a high frequency of stops.

The results showed that the obtained cycle has a total duration of 1800 s, an average speed of 28.22 km/h, and a maximum speed of 46.23 km/h, with a stopping time close to 20% of the total trip, reflecting typical urban operating conditions. A comparison was conducted with the regulatory FTP-75 cycle, demonstrating that the locally representative cycle exhibits greater temporal variability and a non-uniform distribution of stops, characteristic of the actual operation of the BRT system. In conclusion, although both cycles present comparable maximum speed ranges and idling percentages, the results confirm that the FTP-75 does not adequately reproduce the real operating conditions of Trunk Line 1. Therefore, the developed driving cycle realistically represents the dynamic behavior of the Guayaquil BRT system and constitutes an appropriate technical tool for evaluating operational, energy, and environmental performance under real local conditions

Keywords: Urban mobility, Microtrips, Fuel consumption, BRT system, conduction cycle

1. Introducción

El acelerado crecimiento urbano ha intensificado los problemas asociados a la movilidad en las ciudades, destacándose la congestión vehicular, el incremento de los tiempos de desplazamiento y el impacto ambiental del transporte motorizado [1]. Frente a este escenario, los sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (Bus Rapid Transit, BRT) se han consolidado como una alternativa eficiente y sostenible al transporte público convencional, al ofrecer mayores capacidades operativas, menores costos de implementación respecto a los sistemas ferroviarios y posibilidades de integración con otros modos de transporte [2]. No obstante, el desempeño de estos sistemas depende en gran medida de su operación real en contexto urbano, lo que exige evaluaciones técnicas que permitan comprender y optimizar su funcionamiento. [3]

Estudios internacionales y regionales han demostrado que la eficiencia operativa de los sistemas BRT está estrechamente vinculada a variables como la frecuencia de servicio, la capacidad de las unidades y, de manera particular, los ciclos de conducción, los cuales permiten caracterizar el comportamiento dinámico de los vehículos a lo largo del recorrido. Para ello, se han empleado metodologías basadas en la adquisición de datos mediante GPS y OBD, así como técnicas de segmentación de trayectorias y análisis avanzado de datos [4,5]. Sin embargo, persisten limitaciones metodológicas relacionadas con la representatividad de los ciclos obtenidos, la precisión de los datos y la escasa adaptación de los métodos generalizados a las condiciones específicas de cada ciudad, especialmente en América Latina, los principales desafíos en torno a la movilidad urbana están relacionados con la equidad, el cambio climático y la salud pública. En respuesta, se promueve una movilidad sostenible basada en el uso de transporte público moderno, vehículos eléctricos, ciclismo y caminatas, apoyados por una infraestructura adecuada. Soluciones como los Sistemas de Autobuses de Tránsito Rápido (BRT) buscan mejorar la movilidad en zonas urbanas densamente pobladas y reducir los efectos negativos del transporte tradicional [6,7].

En Ecuador, el sistema BRT de la ciudad de Guayaquil, conocido como Metrovía, ha contribuido a la descongestión del tráfico y a la reducción de los tiempos de viaje mediante el uso de carriles exclusivos y una operación centralizada [8] A pesar de su relevancia dentro de la movilidad urbana de la ciudad, los estudios existentes se han centrado principalmente en aspectos de demanda, impacto urbano y sostenibilidad, dejando de lado la caracterización técnica de los ciclos de conducción y el análisis detallado del comportamiento dinámico de las unidades, particularmente en la Troncal 1. La ausencia de una metodología integral y secuencial que abarque la adquisición de datos experimentales, la segmentación de trayectorias, el desarrollo de ciclos de conducción y su evaluación bajo criterios estandarizados limita la generación de indicadores técnicos confiables y dificulta la toma de decisiones orientadas a la mejora del servicio. Por otro lado, la movilidad urbana se refiere al conjunto de desplazamientos que realizan las personas y mercancías dentro de una ciudad, considerando los medios de transporte disponibles, la infraestructura existente y las condiciones sociales y ambientales. Una movilidad eficiente es fundamental

para el desarrollo económico y social, basándose en que facilita el acceso a servicios básicos como educación, salud y empleo [9]. Además, el transporte público cumple un rol importante al permitir el desplazamiento masivo de personas, minimizando la congestión vehicular y contribuyendo a una menor emisión de contaminantes.

El análisis del sistema BRT ha sido abordado desde una perspectiva técnico operativa orientada a evaluar su desempeño energético y dinámico bajo condiciones reales de circulación. Estudios aplicados al sistema BRT de Bogotá evidencian que el perfil velocidad/tiempo influye directamente en el consumo energético y en la eficiencia global del servicio [10]. En este contexto, la construcción de ciclos de conducción representativos constituye una herramienta metodológica clave para caracterizar el comportamiento vehicular en entornos urbanos, mediante la segmentación de micro-viajes y el análisis estadístico de parámetros cinemáticos que permiten conservar las condiciones reales de operación [11]. Asimismo, la validación de estos ciclos requiere la aplicación de indicadores estadísticos que garanticen la reproducción fiel de los patrones dinámicos y su impacto en variables energéticas y ambientales [12]. Investigaciones sobre representatividad basadas en potencia específica vehicular refuerzan la necesidad de asegurar consistencia técnica en la elaboración del ciclo [13]. De igual manera, evaluaciones del ciclo de operación en sistemas de transporte público urbano permiten identificar oportunidades de mejora en eficiencia y desempeño [14], mientras que los análisis de integración modal destacan la importancia de considerar variables operativas y estructurales para garantizar la sostenibilidad del sistema dentro de esquemas intermodales [15].

En este contexto, el presente estudio se propone determinar y evaluar los ciclos de conducción de los buses que operan en la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil, mediante un enfoque basado en el análisis segmentado de trayectorias a partir de datos GPS. Desde una perspectiva teórica, la investigación contribuye al campo de la ingeniería del transporte al proponer una metodología replicable para la evaluación de sistemas BRT en contextos urbanos similares. Desde un enfoque práctico, los resultados permitirán identificar oportunidades de mejora en la eficiencia operativa, tales como la reducción de los tiempos de viaje, el incremento de la puntualidad y la disminución de la variabilidad del servicio, proporcionando información técnica relevante para autoridades y operadores. De este modo, el estudio busca sentar bases metodológicas que fortalezcan la planificación, gestión y optimización del transporte público masivo en Guayaquil y en otras ciudades latinoamericanas con desafíos de movilidad similares.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para el desarrollo del análisis de los ciclos de conducción se emplearon herramientas orientadas a la adquisición, procesamiento y visualización de datos, con el objetivo de obtener información confiable sobre el comportamiento dinámico de los vehículos durante la operación real. La selección de estas herramientas se realizó considerando su capacidad para registrar variables cinemáticas, facilitar el tratamiento de series temporales y apoyar la construcción del ciclo representativo. A continuación, se describen las herramientas utilizadas:

2.1.1 Geo Tracker Pro

La aplicación Geo Tracker, permite registrar en tiempo real variables clave como: coordenadas geográficas (latitud y longitud), velocidad instantánea (km/h), aceleración (m/s^2), altitud, distancia recorrida y tiempo total del trayecto [16]

Esta aplicación permite configurar una frecuencia de muestreo de 1 Hz (una muestra por segundo) y ofrecen opciones de exportación de los datos en formatos CSV y GPX, lo cual facilita su integración con herramientas de análisis como Python, GPS Visualizer.

2.1.2 GPS portátil Garmin eTrex 32x

Este dispositivo GPS autónomo cuenta con tecnología de alta sensibilidad y sensores barométricos que ofrecen datos más precisos de altitud y velocidad, incluso en entornos urbanos con obstrucciones como se muestra en la Figura 1.



Figura 1: GPS portátil Garmin eTrex 32x. [17]

La Tabla 1 presenta las especificaciones técnicas del dispositivo GPS Garmin eTrex 32x, el cual se caracteriza por ser un equipo portátil de mano diseñado para aplicaciones de navegación en campo, ofreciendo una elevada precisión gracias a su compatibilidad con los sistemas satelitales GPS y GLONASS. Entre sus principales atributos tecnológicos se destaca su pantalla transreflectiva a color de 2.2 pulgadas con resolución de 240 x 320 píxeles, que permite una adecuada legibilidad incluso bajo exposición directa a la luz solar. Además, cuenta con una memoria interna de 8 GB expandible mediante tarjeta microSD, garantizando la capacidad de almacenamiento para mapas y registros de ruta.

Tabla 1. Especificaciones técnicas Garmin eTrex 32x.

Parámetro	Especificación Técnica
Marca / Modelo	Garmin eTrex 32x
Tipo	GPS portátil de mano (handheld)
Memoria interna	8 GB
Expansión de memoria	microSD
Sistemas satelitales	GPS y GLONASS
Sensores adicionales	Brújula de 3 ejes y altímetro barométrico
Autonomía	Hasta 25 horas con 2 pilas AA
Capacidad de referencia	Hasta 2000 puntos
Capacidad de rutas	Hasta 200 rutas
Registro de trayectorias	10 000 puntos / 200 tracks
Resistencia al agua	IPX7
Mapas incluidos	Mapas TopoActive

2.1.3 Verificación de consistencia entre dispositivos GPS

Con el fin de evaluar la consistencia de los registros obtenidos, se realizó una revisión comparativa entre el teléfono móvil y el GPS portátil Garmin eTrex 32x, considerando principalmente el comportamiento altimétrico a lo largo del recorrido. La comparación de los perfiles de altitud permitió identificar la correspondencia espacial entre ambas trayectorias y detectar posibles discrepancias asociadas a ruido de medición o pérdidas de señal.

De manera complementaria, se analizó el perfil velocidad–tiempo registrado por ambos dispositivos, verificando la coherencia en la evolución de la velocidad y la adecuada correspondencia entre eventos de aceleración, desaceleración y detención. Esta verificación cruzada evidenció coherencia general entre los registros de ambos dispositivos, lo que respalda la confiabilidad de los datos empleados en la construcción del ciclo de conducción bajo condiciones urbanas reales.

2.1.4 Herramientas de análisis de datos

a) *Procesamiento de datos en Microsoft Excel*

Es una de las herramientas empleadas para el análisis numérico de datos y la ejecución de simulaciones en estudios de movilidad. Sus funciones estadísticas y gráficas, permite el procesamiento de grandes volúmenes de información, la segmentación de las trayectorias en microviajes y la generación de representaciones gráficas que facilitan la interpretación del comportamiento dinámico del sistema analizado [18].

b) *Modelado y análisis del ciclo de conducción en MatLab*

MatLab se empleó como plataforma central para el tratamiento de las series temporales de velocidad y tiempo obtenidas a partir de los registros GPS del sistema BRT. En este entorno se llevó a cabo la limpieza de datos, el cálculo de parámetros cinemáticos y la segmentación de las trayectorias, además de la generación del ciclo de conducción representativo mediante la aplicación del método del medoide. Adicionalmente, se determinaron indicadores dinámicos como velocidad promedio, aceleraciones, desaceleraciones y tiempos de detención. La implementación de estos procedimientos en MATLAB permitió automatizar el flujo de análisis, garantizar la repetibilidad de los resultados y facilitar la comparación entre recorridos, constituyendo un soporte esencial para la evaluación objetiva del desempeño operativo del sistema de transporte estudiado. [19].

2.1.5 GPS Visualizer

GPS Visualizer es un software de código abierto que facilita la visualización geoespacial de trayectorias. Será utilizado para mapear las rutas de las Troncales 1, identificar puntos de detención y representar espacialmente los patrones de conducción. Su compatibilidad con archivos CSV y shapefiles permitirá una integración fluida con los datos recolectados [20].

2.1.6 Métodos de análisis de ciclos de conducción

El ciclo de conducción es una secuencia temporal de velocidades de vehículo representativo del patrón de operación real de un vehículo durante un recorrido. Este patrón permite identificar variaciones de aceleración, frenado, marcha constante y detenciones, reflejando el comportamiento dinámico del vehículo bajo condiciones reales de tránsito urbano [21]. En la Figura 2, se observa el recorrido de la Troncal 1, cuyo objetivo es caracterizar el comportamiento del vehículo a lo largo del trayecto y determinar los factores que influyen en su operación. Este tipo de estudio resulta esencial para estimar la eficiencia energética, el consumo de combustible, las emisiones y la calidad del servicio en el transporte público

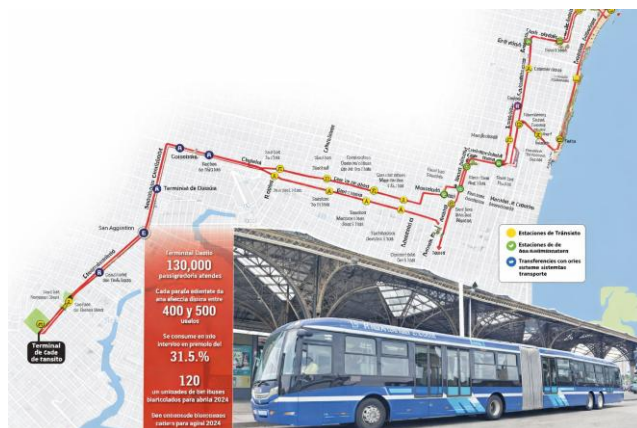


Figura 2. Recorridos de la metrovia. [22]

El recorrido puede descomponerse en segmentos o microviajes, lo que facilita la comparación entre corredores, la evaluación de variables operativas e infraestructura, y la obtención de información clave para la planificación y operación del sistema [23]. Asimismo, su estructura modular permite gestionar de manera eficiente grandes volúmenes de datos en entornos urbanos complejos. Cabe mencionar que existen distintos métodos para la elaboración de ciclos de conducción, cada uno con características y objetivos específicos:

2.1.7 Método de Microviaje

El método de microviaje constituye una técnica empleada para segmentar un recorrido vehicular continuo en unidades dinámicas más pequeñas y homogéneas, denominadas microviajes o micro-trips. En la Tabla 2 se presentan los parámetros para el proceso de segmentación, esta metodología se basa en la adquisición de datos cinemáticos mediante dispositivos GPS y sensores de alta frecuencia, que registran velocidad, posición y tiempo a lo largo del trayecto. A partir de esta información, se identifican los puntos de parada del vehículo cuando la velocidad permanece por debajo de un umbral definido durante un intervalo mínimo, delimitando así los segmentos individuales. Posteriormente, se extraen los microviajes comprendidos entre dos eventos consecutivos de detención, obteniendo fragmentos representativos del comportamiento dinámico del vehículo. Finalmente, se aplican criterios de filtrado y selección para eliminar segmentos atípicos o inconsistentes, garantizando que la muestra resultante represente adecuadamente las condiciones reales de operación. [24].

Tabla 2. Parámetros para la segmentación de ruta de la Troncal 1.

Parámetro	Especificación
Adquisición de datos cinemáticos	Los datos se obtienen mediante dispositivos GPS y sensores de alta frecuencia (≥ 1 Hz), que registran la velocidad, posición y tiempo en intervalos regulares durante el recorrido.
Identificación de puntos de parada	Se detectan los momentos donde la velocidad del vehículo permanece por debajo de un umbral establecido (10 km/h) durante un periodo mínimo (por ejemplo, 10 segundos), que marcan los límites de cada microviaje.
Extracción de microviajes	Los segmentos entre estos puntos de parada conforman cada microviaje, representando fragmentos dinámicos consistentes para su análisis individual.
Filtrado y selección	Se aplican criterios para eliminar microviajes con duración demasiado corta o datos inconsistentes, asegurando que la muestra represente adecuadamente las condiciones de operación.

2.2 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo y evaluación de los ciclos de conducción en la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil se estructura en tres fases principales como se muestra en la Figura 3, que abarcan desde la adquisición y tratamiento de datos hasta la evaluación final de los resultados. Cada fase responde a una lógica secuencial orientada a garantizar la consistencia técnica del proceso, desde la obtención de la información hasta la interpretación de los patrones de conducción.

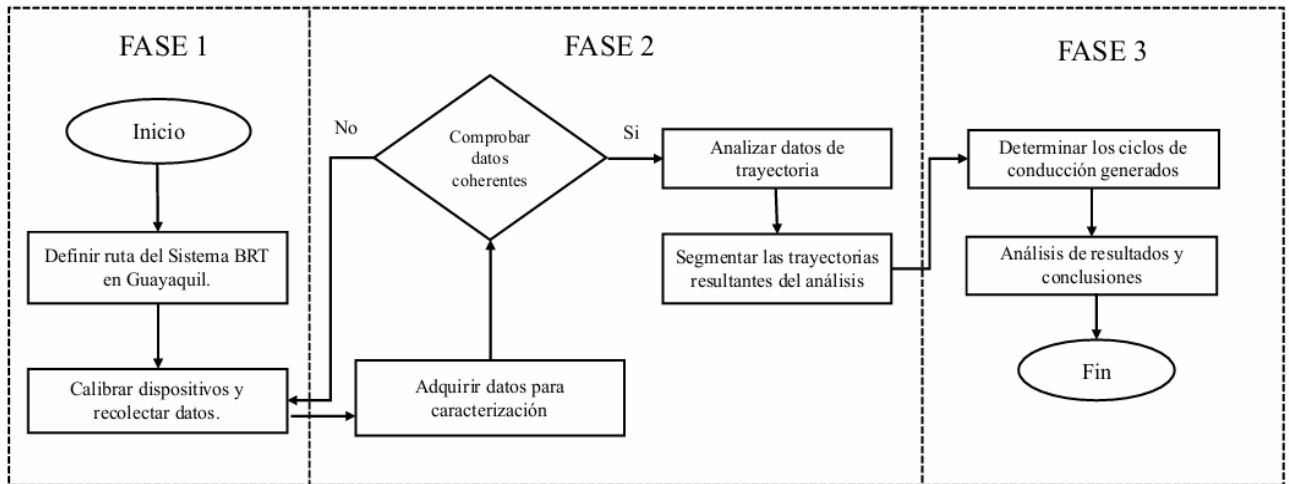


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico.

En la Fase 1, el proceso inicia con la definición y segmentación de la ruta del sistema BRT de Guayaquil, tomando como referencia la Troncal 1, siendo esta la más representativa por tener mayor trayectoria y con mayores usuarios en comparación con las demás Troncales. Esta etapa contempla la identificación de los puntos de inicio y fin de recorrido, el sentido de ruta (norte/sur o sur/norte), las paradas intermedias, los sectores de mayor congestión, tipo de día (laboral o fin de semana), horarios (hora punta o valle) y las condiciones operativas del corredor. La segmentación se definiría experimentalmente por valores operativos y pruebas estadísticas en una Tabla registrando los valores obtenidos de velocidad media y máxima, el porcentaje de ralentí, aceleraciones y desaceleraciones.

Inicialmente se identificarán porcentajes candidatos usando reglas basadas en detecciones, es decir que en velocidades menores a 10 km/h por periodo de 8 a 10 segundos, cambios persistentes de régimen como variación de velocidad mayores a 15 km/h en trayecto cortos e hitos de infraestructura (paradas e intersecciones). Para complementar la segmentación operativa, se aplicarán métodos de agrupamiento no supervisado (DBSCAN) y modelos ocultos de Markov (HMM), los cuales permiten identificar zonas homogéneas del recorrido y detectar cambios de estado en la operación del vehículo, respectivamente, se evaluará la homogeneidad interna de cada tramo (coeficiente de variación de velocidad y aceleración) y se comprobará la estabilidad de los cortes mediante bootstrap. Los tramos finales se seleccionarán cuando cumplan criterios con base en el comportamiento observado de las trayectorias y la coherencia operativa del corredor. Se permite dividir el trayecto total en secciones homogéneas que reflejen distintas condiciones de conducción, como zonas de aceleración, frenado o detención, lo que resulta fundamental para la posterior construcción de los ciclos de conducción representativos.

La segmentación del corredor BRT en seis tramos se realizó considerando un conjunto de condiciones operativas y geométricas que influyen directamente en el comportamiento dinámico del vehículo. Para ello, se tomaron en cuenta parámetros como:

- Caracterización funcional del corredor: análisis del tipo de vía y del rol operativo de cada sección dentro del sistema BRT, permitiendo contextualizar las diferencias en régimen de circulación y nivel de interacción urbana.
- Identificación de zonas homogéneas mediante agrupamiento espacial (DBSCAN): se consideró el uso del algoritmo DBSCAN como herramienta de apoyo para detectar regiones del recorrido con patrones similares de velocidad y aceleración, facilitando la delimitación preliminar de tramos con comportamiento dinámico consistente.
- Detección de cambios de estado operativo mediante Modelos Ocultos de Markov (HMM): se incorporó el enfoque HMM como marco conceptual para interpretar transiciones entre estados de conducción (fluido, transitorio, congestivo), contribuyendo a la comprensión del carácter dinámico del corredor y al soporte de la segmentación propuesta.

- Evaluación de estabilidad de los límites de segmentación mediante bootstrap: se consideró el remuestreo estadístico como criterio de robustez para verificar la consistencia de los puntos de corte entre segmentos frente a la variabilidad de las trayectorias registradas.
- Condiciones operativas e infraestructura del corredor: presencia y continuidad del carril exclusivo, límites normativos de velocidad, nivel de congestión, interferencias vehiculares y frecuencia de interacción con estaciones del sistema, factores que condicionan directamente la dinámica de aceleración, desaceleración y detención.

La selección de doce recorridos experimentales se fundamenta en criterios de representatividad estadística y estabilidad del perfil velocidad–tiempo. En estudios sobre la construcción de ciclos de conducción urbanos, se ha establecido que un número de muestras comprendido entre 10 y 20 recorridos reales permite capturar adecuadamente la variabilidad operacional del tráfico sin generar redundancias significativas en los parámetros característicos del ciclo [25]. Asimismo, investigaciones orientadas al desarrollo de ciclos representativos indican que, una vez superado un umbral mínimo cercano a diez trayectorias independientes, variables como la velocidad media, el porcentaje de tiempo en detención y los patrones de aceleración tienden a estabilizarse, mostrando variaciones marginales ante la incorporación de nuevos recorridos [26]. En este contexto, la utilización de doce muestras para la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil garantiza un equilibrio entre robustez estadística y viabilidad operativa, asegurando que el ciclo resultante represente de manera confiable las condiciones reales de circulación del corredor analizado.

El tercer segmento presentado en la Figura 4 abarca desde El Astillero hasta el Terminal Guasmo, caracterizado por un entorno mayoritariamente residencial, una demanda más distribuida y condiciones de operación más estables.

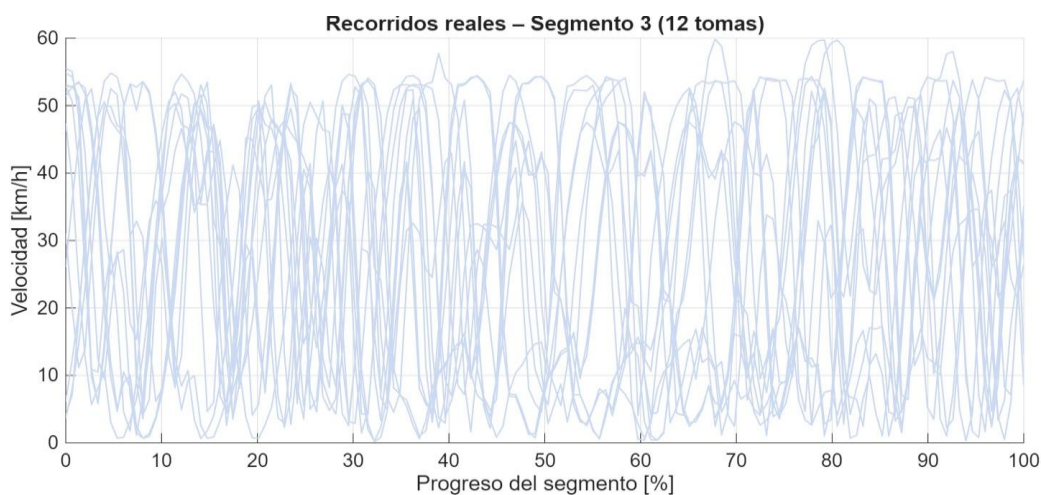


Figura 4. Recorridos reales de velocidad – Segmento 3

Para el sentido de regreso se aplicó una segmentación análoga a la empleada en el trayecto de ida, incorporando las particularidades operativas y del patrón de demanda propio de este sentido de circulación. El cuarto segmento, corresponde al tramo comprendido entre el Terminal Guasmo y el sector El Astillero. En la gráfica se observa una marcada variabilidad de velocidad a lo largo del 100 % del progreso del segmento, con múltiples transiciones abruptas entre valores cercanos a 0 km/h y picos que alcanzan aproximadamente 55–60 km/h. Este comportamiento evidencia una dinámica altamente transitoria, caracterizada por frecuentes eventos de detención completa seguidos de fases de aceleración pronunciada.

La elevada dispersión entre las 12 tomas registradas confirma la presencia de condiciones operativas no estacionarias, asociadas a interferencias semafóricas, interacción vehicular en intersecciones y variabilidad en los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros. Se aprecia además una alta concentración de velocidades bajas durante el tramo inicial del segmento, lo que es consistente con la elevada demanda en el punto de partida

del recorrido, donde el proceso de embarque genera mayores tiempos de permanencia en estación y arranques más sucesivos. A medida que el segmento avanza, persiste una oscilación significativa entre regímenes de circulación fluida y fases de desaceleración, lo que sugiere un entorno urbano con alternancia constante entre condiciones de flujo parcialmente libre y congestión intermitente. Desde el punto de vista dinámico, el perfil evidencia un régimen dominante de operación urbano transitorio, en el cual las aceleraciones y desaceleraciones frecuentes incrementan la severidad energética del tramo. Esta característica resulta relevante para análisis posteriores de consumo y emisiones, dado que la recurrencia de eventos de arranque-parada tiende a elevar la demanda instantánea de potencia y a reducir la eficiencia global del sistema en este segmento específico.

En la Figura 4, presenta una alta variabilidad de la velocidad, evidenciada por la alternancia constante entre picos elevados y caídas abruptas. Los incrementos de velocidad corresponden a breves tramos de avance entre intersecciones, mientras que las reducciones hasta valores cercanos a cero reflejan detenciones frecuentes asociadas a paradas del sistema BRT, semáforos y alta interacción urbana. Este patrón es característico de zonas centrales con elevada congestión y alta demanda de pasajeros, donde predominan velocidades medias-bajas y un régimen de conducción fragmentado.

La aplicación del método segmentado de trayectorias permitió identificar diferencias espaciales y operativas a lo largo del recorrido, proporcionando una base metodológica sólida para el análisis comparativo del desempeño de la Troncal 1 bajo distintas condiciones de operación. Las líneas delgadas en color azul claro representan los recorridos reales individuales, es decir, las mediciones de velocidad instantánea obtenidas directamente de cada una de las doce trayectorias analizadas. Estas curvas reflejan la variabilidad natural del sistema, influenciada por factores como el tráfico, las paradas, las maniobras de aceleración y desaceleración y las condiciones operativas del corredor.

a. Proceso metodológico para la obtención de los ciclos de conducción

A partir de los registros experimentales de cada una de las doce tomas realizadas en el segmento analizado, se extrajeron las series temporales de tiempo y velocidad instantánea $v(t)$. Como etapa previa al análisis, se aplicó un proceso de depuración de datos con el fin de eliminar valores no físicos que pudieran afectar la representatividad del ciclo de conducción. Para ello, se estableció la siguiente condición:

$$v(t) = 0 \quad \text{si} \quad v(t) < 0 \quad (1)$$

Esta operación garantiza que los valores negativos o no definidos de velocidad, originados por errores de medición o fallos en el registro, no influyan en los cálculos posteriores, asegurando la consistencia física de las trayectorias analizadas.

Con el propósito de evaluar la calidad metrológica de los datos de velocidad registrados, se realizó un análisis básico de incertidumbre asociado al sistema de medición GPS empleado en las pruebas experimentales. Como parte del control de calidad del dato, se aplicó un procedimiento de suavizado mediante filtro de media móvil con el fin de estimar la componente de ruido presente en la señal original, considerando la diferencia entre la señal original y la señal suavizada como una aproximación del ruido instrumental. A partir de esta señal residual se calculó la desviación estándar del ruido, permitiendo cuantificar la variabilidad asociada al proceso de medición; adicionalmente, se determinó la incertidumbre estándar tipo A basada en la dispersión estadística de las muestras, así como la incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95 % y la incertidumbre relativa expresada en porcentaje respecto a la velocidad media registrada. En conjunto, este procedimiento permitió caracterizar cuantitativamente el nivel de error instrumental presente en los datos experimentales y respaldar la confiabilidad de los análisis dinámicos posteriores.

Debido a que cada toma presenta una duración distinta, se realizó una normalización temporal con el objetivo de permitir la comparación punto a punto entre recorridos. Para

cada trayectoria, el tiempo fue transformado a una escala adimensional en el intervalo $[0,1]$ mediante la expresión [27]:

$$\tau_i = \frac{(t_i - t_{\{i,0\}})}{(t_{\{i,f\}} - t_{\{i,0\}})}, \quad \tau \in [0, 1] \quad (2)$$

Donde $t_{\{i,f\}}$ y $t_{\{i,0\}}$ representan el instante inicial y final de la toma i , respectivamente. Esta transformación permite expresar todas las trayectorias en función del progreso relativo del segmento, independientemente de su duración real, la cual establece un conjunto uniforme de instantes normalizados sobre los cuales se evaluarán todas las trayectorias [28].

$$\tau_q = \{0, \frac{1}{N}, \dots, 1\} \quad (3)$$

Una vez definida la malla común, las velocidades instantáneas de cada toma fueron interpoladas para obtener valores de velocidad en los mismos instantes normalizados. El propósito de esta formulación es establecer una base temporal común que permita comparar trayectorias con diferentes tiempos absolutos de recorrido. Al proyectar todas las mediciones sobre esta malla normalizada, se garantiza que cada punto τ_j represente una posición relativa equivalente dentro del ciclo, facilitando la interpolación de las velocidades instantáneas y su posterior análisis estadístico. En consecuencia, esta normalización temporal constituye un paso fundamental para la alineación punto a punto de las trayectorias, permitiendo la construcción de la matriz de velocidades V y el cálculo del ciclo de conducción promedio de manera consistente y matemáticamente coherente. Este proceso se expresa como [29]:

$$v_i(\tau_q) = \text{interp1}(\tau_i, v_i, \tau_q) \quad (4)$$

Donde $v_i(\tau_q)$ representa la velocidad interpolada de la toma i en los puntos de la malla común. La interpolación permite alinear temporalmente todas las trayectorias sin alterar su comportamiento dinámico global. La interpolación permite reconstruir la señal de velocidad en una malla temporal uniforme, aun cuando las trayectorias originales presenten diferencias en duración, frecuencia de muestreo o desfases temporales. Este procedimiento es fundamental para alinear todas las trayectorias sin modificar su comportamiento dinámico global, conservando las tendencias reales de aceleración y desaceleración del vehículo.

Gracias a esta ecuación, es posible comparar, promediar y analizar múltiples microviajes bajo una misma base temporal, lo que facilita la obtención de ciclos de conducción representativos y el análisis estadístico del desempeño dinámico del sistema BRT.

Las velocidades interpoladas fueron organizadas en una matriz V , definida como [30]:

$$V = \begin{bmatrix} v1(t1) & \dots & v1(tn) \\ v2(t1) & \dots & v2(tn) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v12(t1) & \dots & v12(tn) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde las velocidades interpoladas se organizaron en una matriz $V \in R^{12 \times n}$, donde cada fila i representa una trayectoria individual normalizada y cada columna j corresponde a un instante común de tiempo normalizado t_j . De esta forma, el elemento genérico v_{ij} describe la velocidad registrada en la trayectoria i en el instante t_j . Esta estructura matricial permite alinear temporalmente todas las trayectorias, garantizando comparabilidad punto a punto entre observaciones equivalentes del ciclo. La matriz V constituye así la base de datos consolidada para el procesamiento estadístico posterior, ya que facilita la aplicación de operaciones vectorizadas como el cálculo del promedio temporal, la desvia-

ción estándar, la varianza y otros indicadores de dispersión. En particular, el ciclo de conducción representativo se obtiene mediante el promedio por columnas de la matriz, es decir, calculando la media aritmética de los elementos v_{ij} para cada instante t_j . Este procedimiento genera un nuevo vector de velocidad promedio que sintetiza el comportamiento dinámico global del sistema, reduciendo la variabilidad intertrayectoria sin perder coherencia temporal.

El ciclo de conducción representativo se obtuvo mediante un promedio punto a punto de las doce trayectorias normalizadas. Para cada instante normalizado t_j , la velocidad promedio se calculó como [31]:

$$V(t_j) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} v_{ij} \quad (4)$$

El promedio punto a punto de las doce trayectorias normalizadas, conforme a la ecuación anterior, se aplicó con el propósito de construir un ciclo de conducción estadísticamente representativo del comportamiento operativo del sistema analizado. Este procedimiento consiste en calcular, para cada instante de tiempo normalizado t_j , el valor medio de velocidad a partir del conjunto de trayectorias V_{ij} , garantizando coherencia temporal entre observaciones equivalentes. La metodología permite atenuar la dispersión asociada a factores externos tales como variaciones en la demanda vehicular, diferencias en el estilo de conducción y fluctuaciones en los tiempos de recorrido, preservando simultáneamente las características dinámicas globales del movimiento, como los patrones de aceleración, desaceleración y detención. En consecuencia, el ciclo obtenido constituye una representación estable y consistente del perfil promedio de velocidad en función del tiempo normalizado, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo del desempeño operativo del corredor BRT.

2.3 Validación estadística del ciclo representativo

Con el fin de evaluar cuantitativamente la representatividad del ciclo de conducción obtenido respecto a las trayectorias reales registradas, se aplicó un conjunto de indicadores estadísticos orientados a medir la similitud dinámica, el nivel de dispersión y la consistencia temporal entre perfiles de velocidad. En este sentido, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) entre cada recorrido real y el ciclo promedio con el propósito de cuantificar la magnitud de las desviaciones punto a punto en la serie velocidad–tiempo, mientras que el error relativo porcentual medio permitió expresar dichas diferencias en términos porcentuales respecto al ciclo representativo. Adicionalmente, se determinó el coeficiente de correlación entre cada trayectoria y el ciclo promedio para analizar la concordancia en la forma del perfil velocidad–tiempo, y como criterio complementario se aplicó una prueba estadística de comparación de medias de velocidad entre los recorridos reales y el ciclo representativo, adoptando un nivel de significancia del 5 %, con el objetivo de verificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas. En conjunto, este procedimiento permitió validar estadísticamente la coherencia del ciclo desarrollado frente a los datos experimentales.

3. Resultados obtenidos

A continuación, se presentan los resultados del análisis de los recorridos reales segmentados del sistema BRT, obtenidos a partir de doce tomas por segmento, las cuales sirvieron como base para la construcción y evaluación de los indicadores mostrados en la Tabla 3. Los resultados permiten caracterizar el comportamiento dinámico del sistema en cada tramo analizado, considerando variables como velocidad media, tiempos de detención y patrones de aceleración y desaceleración. Asimismo, se evalúa la variabilidad operativa entre tomas con el fin de determinar la representatividad de los ciclos de conducción generados.

Tabla 3. Parámetros por cada segmento.

Segmento	Velocidad media (km/h)	Velocidad máx. (km/h)	% ralentí	Aceleraciones	Desaceleraciones	Interpretación operativa
1	Media–alta (30–33)	Alta (65–70)	Moderado (15–18 %)	Moderadas (0.35–0.40 m/s ²)	Moderadas (–0.40 m/s ²)	Carril compartido, operación relativamente fluida
2	Media (25–28)	Media–alta (55–60)	Alto (20–23 %)	Moderadas–altas (0.40–0.45 m/s ²)	Moderadas–altas (–0.45 m/s ²)	Carril exclusivo con detenciones frecuentes
3	Media (26–28)	Media–alta (58–60)	Alto (22–24 %)	Altas (0.45–0.46 m/s ²)	Altas (–0.55 m/s ²)	Tramo de transición con variabilidad operativa
4	Media (26–27)	Alta (60–62)	Alto (23–25 %)	Altas (0.44–0.45 m/s ²)	Altas (–0.53 m/s ²)	Inicio de recorrido con alta carga de pasajeros
5	Baja–media (24–26)	Media–alta (55–58)	Muy alto (25–27 %)	Moderadas (0.40–0.43 m/s ²)	Altas (–0.50 m/s ²)	Zona central, congestión y alta interferencia
6	Media–alta (32–33)	Alta (60–62)	Bajo (13–15 %)	Bajas–moderadas (0.32–0.35 m/s ²)	Bajas–moderadas (–0.35 m/s ²)	Tramo final más despejado y estable

La Tabla 3, resume los principales indicadores dinámicos obtenidos para cada uno de los seis segmentos analizados. Se observa que los segmentos con mayor velocidad media y máxima (Segmentos 1 y 6) presentan aceleraciones y desaceleraciones de menor magnitud, lo cual indica una operación más estable y continua, característica de tramos con menor interferencia y mayor fluidez vehicular. En contraste, los segmentos con mayor porcentaje de tiempo en ralentí (Segmentos 3, 4 y 5) exhiben aceleraciones y desaceleraciones más elevadas, reflejando un patrón de conducción tipo “arranque–frenado” asociado a alta congestión, mayor número de paradas y elevada interacción con el entorno urbano. Este comportamiento evidencia que las aceleraciones no dependen exclusivamente del nivel de velocidad alcanzado, sino de la frecuencia de interrupciones operativas, lo cual resulta consistente con la dinámica observada en los perfiles de velocidad de cada segmento.

Las trayectorias de velocidad fueron representadas en función del progreso normalizado de cada segmento, lo que permite comparar el comportamiento dinámico del vehículo a lo largo del recorrido. Este análisis segmentado facilita la identificación de patrones de operación, variabilidad entre tomas y diferencias en las condiciones de fluidez, detención y estabilidad operacional entre los distintos tramos evaluados.

En la Figura 5, el segmento 1 presenta velocidades relativamente elevadas y sostenidas a lo largo del recorrido, con una menor presencia de caídas abruptas en comparación con los demás segmentos. Las desaceleraciones identificadas son puntuales y no dominan el comportamiento global. En contraste con los segmentos posteriores, este tramo evidencia las condiciones de operación más favorables en términos de fluidez. Las líneas continuas en color azul intenso corresponden a los ciclos representativos, construidos a partir del conjunto de recorridos reales mediante un proceso de agregación estadística. Estas curvas sintetizan el comportamiento típico del vehículo dentro del segmento, conservando las principales tendencias dinámicas sin reproducir las fluctuaciones extremas de cada recorrido individual. Las líneas discontinuas en color naranja identificadas como P10 y P90

representan los percentiles 10 y 90 de la distribución de velocidades. Estos límites definen la banda de dispersión dentro de la cual se concentra la mayor parte del comportamiento operativo, permitiendo evaluar la variabilidad del sistema y detectar eventos extremos de baja y alta velocidad.

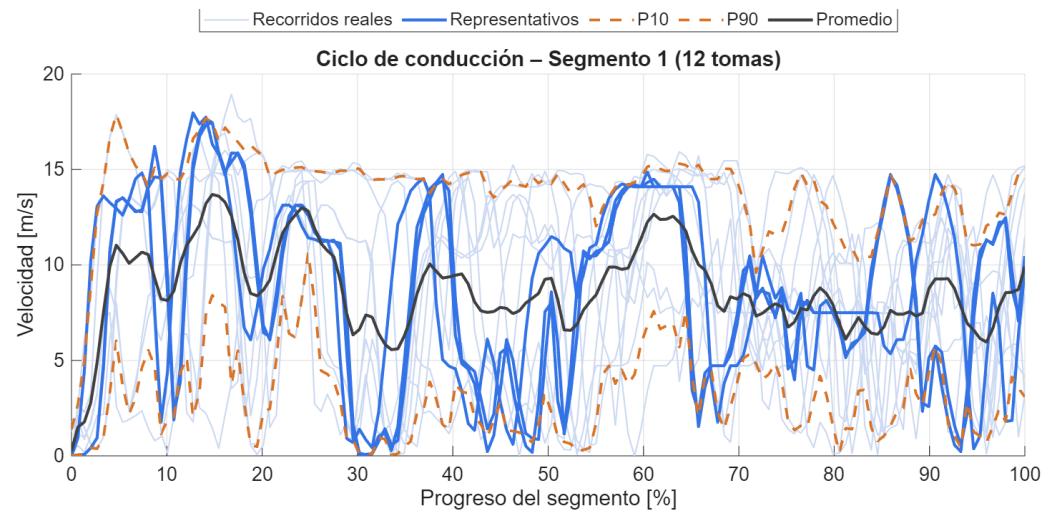


Figura 5. Ciclo de conducción representativo del Segmento 1 del corredor BRT

Debido a que las tomas presentan distintas duraciones temporales, las series de velocidad fueron normalizadas en el tiempo y posteriormente interpoladas sobre una malla común adimensional, lo que permitió la comparación punto a punto entre recorridos dentro de cada segmento. A partir del conjunto de trayectorias interpoladas se calcularon perfiles estadísticos, incluyendo el promedio y los percentiles P10 y P90, con el fin de caracterizar la variabilidad del comportamiento dinámico.

El ciclo de conducción representativo de cada segmento se obtuvo mediante un criterio de medoide, seleccionando aquellas trayectorias reales cuya distancia cuadrática respecto al perfil promedio resultó mínima. Este procedimiento permitió identificar, dentro del conjunto de recorridos medidos, el perfil más representativo desde el punto de vista estadístico y dinámico. A diferencia de los métodos basados en promediación directa, el enfoque del medoide garantiza que el ciclo representativo corresponda a un recorrido real registrado en campo y no a un perfil sintético, preservando así las características dinámicas propias de cada segmento del sistema BRT. La Figura correspondiente ilustra el resultado para uno de los tramos analizados; de manera complementaria, las gráficas equivalentes de los cinco segmentos restantes se presentan en la sección de Apéndices, donde se detallan los perfiles individuales y su respectiva comparación con las trayectorias reales y el promedio estadístico.

4.1. Comparación entre recorridos reales y ciclo representativo

A diferencia del uso del promedio punto a punto de las velocidades, el método del medoide selecciona una trayectoria real existente cuya distancia global respecto al resto de las trayectorias es mínima. Esta característica evita la generación de perfiles artificiales de velocidad y garantiza que el ciclo representativo conserve eventos reales de conducción, tales como paradas completas, aceleraciones, desaceleraciones y variaciones abruptas propias de la operación del sistema BRT. Se observa que el ciclo representativo se mantiene dentro de la envolvente definida por los datos reales, reproduciendo de forma adecuada los rangos de velocidad y la secuencia temporal de aceleraciones y desaceleraciones propias de la operación urbana del sistema BRT. La dispersión observada entre los recorridos individuales está asociada a la variabilidad operacional del tráfico urbano, influenciada por

factores como la congestión, la semaforización, las paradas operativas, la interacción con otros vehículos y las condiciones de demanda a lo largo del recorrido.

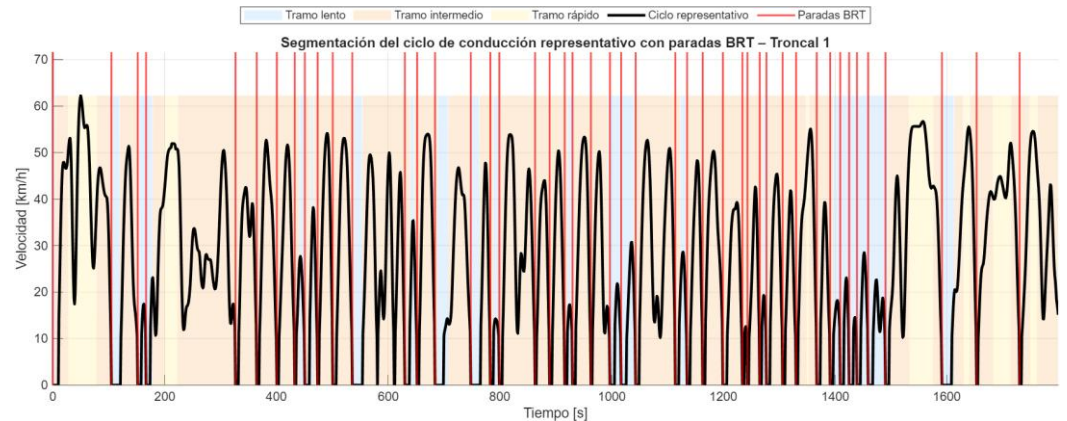


Figura 6. Ciclo de conducción representativo del BRT con paradas identificadas

Esta dispersión se manifiesta principalmente en diferencias en la duración de las paradas, en la intensidad de las aceleraciones y en la velocidad alcanzada entre eventos consecutivos. En la Figura 6, las líneas verticales rojas representan las 47 paradas operativas realizadas a lo largo del recorrido del sistema BRT. Cada línea marca un instante específico en el tiempo donde la velocidad del vehículo cae a cero, evidenciando interrupciones completas del movimiento. La alta densidad de estas líneas, especialmente en ciertos tramos del ciclo, refleja la frecuencia y regularidad de las detenciones, característica propia de un corredor urbano con servicio estructurado. Estas paradas influyen directamente en la forma del perfil de velocidad, incrementan el idle time y condicionan la dinámica de aceleración y desaceleración del ciclo, reforzando su representatividad del comportamiento real de la Metrovía. No obstante, el ciclo representativo logra sintetizar este comportamiento al conservar explícitamente eventos de parada, arranques frecuentes y picos de velocidad, evitando el suavizado excesivo característico de un promedio temporal simple. El hecho de que el ciclo representativo permanezca dentro de la dispersión de los datos reales durante la mayor parte del tiempo indica que este perfil captura de manera adecuada la dinámica del sistema.

4.2. Ciclo de conducción representativo final

La Figura 7 muestra el ciclo de conducción representativo final obtenido a partir de las doce tomas reales analizadas. El perfil velocidad–tiempo conserva de manera explícita la naturaleza altamente transitoria del tráfico urbano, caracterizada por frecuentes aceleraciones y desaceleraciones, así como múltiples eventos de parada y arranque. Se observan velocidades aproximadas de 57–63 km/h, combinadas con intervalos recurrentes de baja velocidad y detenciones completas, lo que evidencia condiciones de circulación dominadas por congestión, semaforización y variabilidad del flujo vehicular. A diferencia de ciclos estandarizados suavizados, el ciclo representativo mantiene irregularidades propias de la conducción real, reflejando de forma más fiel la dinámica operativa del entorno urbano estudiado. Esta estructura confirma que el ciclo resultante es adecuado para la evaluación de desempeño energético y emisiones bajo condiciones locales reales, al reproducir tanto la intensidad de las aceleraciones, con una aceleración media positiva del orden de 0.13 m/s^2 , como la frecuencia de los periodos de inactividad observados en los recorridos originales. Adicionalmente, la distribución temporal de los picos de velocidad y de los eventos de detención no presenta una periodicidad uniforme, lo que refuerza su carácter no idealizado y su correspondencia con condiciones reales de operación. La amplitud de las oscilaciones de velocidad pone de manifiesto una demanda variable de potencia a lo largo del ciclo, aspecto clave en la estimación precisa del consumo energético. En conjunto, el comportamiento dinámico observado respalda la robustez del procedimiento metodológico aplicado y la validez del ciclo como herramienta representativa para simulaciones y análisis comparativos posteriores.

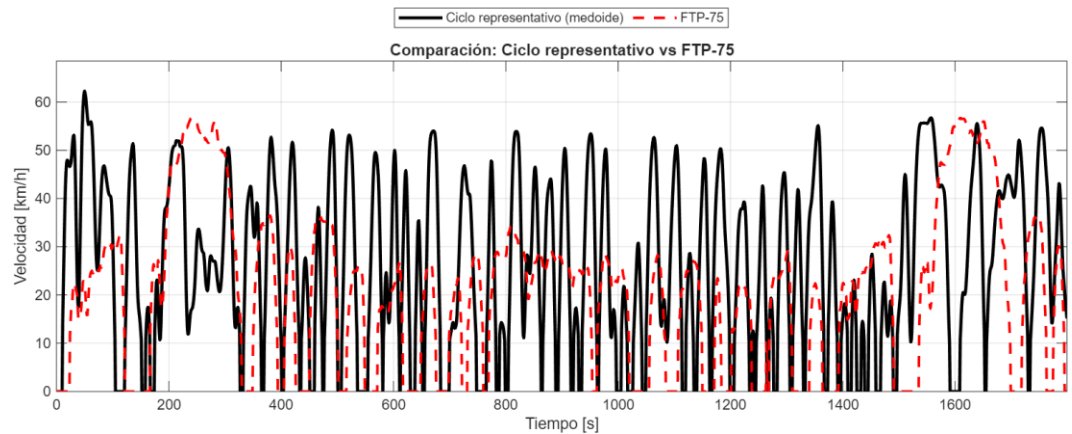


Figura 7. Comparación del ciclo representativo vs FTP-75

Al comparar el ciclo de conducción representativo mostrado en la Figura 7 con el ciclo estandarizado FTP-75, se evidencian diferencias estructurales relevantes asociadas al contexto real de operación de un sistema BRT urbano que circula en un corredor con paradas operativas fijas, intersecciones semaforizadas, tramos con congestión variable y alta interacción con otros vehículos del tráfico general. Mientras el ciclo normativo presenta una secuencia predefinida de fases con patrones de velocidad suavizados y repetitivos, el ciclo representativo local exhibe una mayor variabilidad temporal, con aceleraciones más abruptas, desaceleraciones frecuentes y una distribución no periódica de las detenciones vinculadas a estaciones, control semafórico y fluctuaciones en la demanda de pasajeros. Esta diferencia se refleja en una mayor irregularidad del perfil velocidad-tiempo, característica de entornos urbanos con congestión recurrente, prioridad semafórica variable y comportamiento heterogéneo del tráfico circundante. Asimismo, el ciclo desarrollado mantiene eventos de velocidad máxima similares en magnitud al estándar de referencia, aunque con transiciones más cortas y menos uniformes, condicionadas por la longitud limitada de los tramos entre paradas y por interrupciones operativas frecuentes, lo que incrementa la severidad dinámica del patrón obtenido.

En este sentido, el ciclo representativo local no busca replicar la estructura del FTP-75, sino capturar de manera más realista las condiciones de conducción observadas en campo durante la operación diaria del sistema BRT, constituyéndose como una alternativa más adecuada para la evaluación del desempeño vehicular y energético en el entorno urbano analizado. El protocolo internacional se emplea únicamente como herramienta de contraste metodológico, con el propósito de validar el nivel de representatividad y realismo del ciclo desarrollado frente a un modelo ampliamente utilizado en estudios de desempeño y emisiones vehiculares. De esta manera, dicho ciclo estandarizado funciona como marco comparativo y no como patrón de ajuste, permitiendo verificar que parámetros globales como la velocidad media, la proporción de tiempo detenido y el régimen de aceleraciones se sitúan dentro de rangos técnicamente coherentes. Esta comparación fortalece la confiabilidad del ciclo propuesto, ya que demuestra que, aunque responde a una realidad operativa específica, mantiene consistencia con criterios internacionales de caracterización dinámica. Asimismo, el uso de un estándar reconocido facilita la comparación futura con otros estudios y contribuye a la trazabilidad técnica de los resultados obtenidos.

Parámetro dinámico	Ciclo representativo (Troncal 1 – Guayaquil)	FTP-75	Interpretación técnica
Velocidad media [km/h]	30 – 35	20 – 25	El ciclo representativo presenta mayor velocidad media debido a tramos con operación más fluida entre paradas
Velocidad máxima [km/h]	60 – 62	55 – 57	Ambos ciclos alcanzan velocidades similares; el ciclo local presenta picos ligeramente mayores
Tiempo en ralentí [%]	20 – 30	18 – 22	Alta proporción de paradas en ambos casos, característica típica de conducción urbana
Aceleración media positiva [m/s ²]	0.8 – 1.1	0.6 – 0.9	El ciclo local presenta aceleraciones más intensas asociadas a reinicios frecuentes de marcha
Desaceleración media [m/s ²]	-0.9 a -1.3	-0.7 a -1.0	Mayor severidad de desaceleraciones en el ciclo real, reflejando tráfico e interferencias operativas
Comportamiento dinámico	Urbano real, altamente variable	Urbano normativo, estructurado	El FTP-75 reproduce patrones generales, pero suaviza la dinámica real observada

Tabla 4. Parámetros comparativos.

Si bien el ciclo FTP-75 presenta una estructura normativa y controlada, la comparación gráfica evidencia que el ciclo representativo obtenido a partir de datos reales exhibe mayores velocidades medias y una dinámica más agresiva, asociada a condiciones reales de operación del sistema BRT. No obstante, ambos ciclos comparten rangos de velocidad máxima y porcentajes de ralentí comparables, lo que valida el uso del FTP-75 como referencia normativa.

4.3. Segmentación dinámica del ciclo representativo

La Figura 8 presenta el ciclo de conducción dinámico representativo en distintas fases de operación urbana, diseñado para evaluar el comportamiento dinámico de un vehículo bajo condiciones reales de circulación. Como se ha mencionado, la línea negra corresponde al ciclo de conducción representativo, el cual evidencia las variaciones de velocidad que se producen durante un trayecto típico, incluyendo aceleraciones, desaceleraciones y detenciones completas.

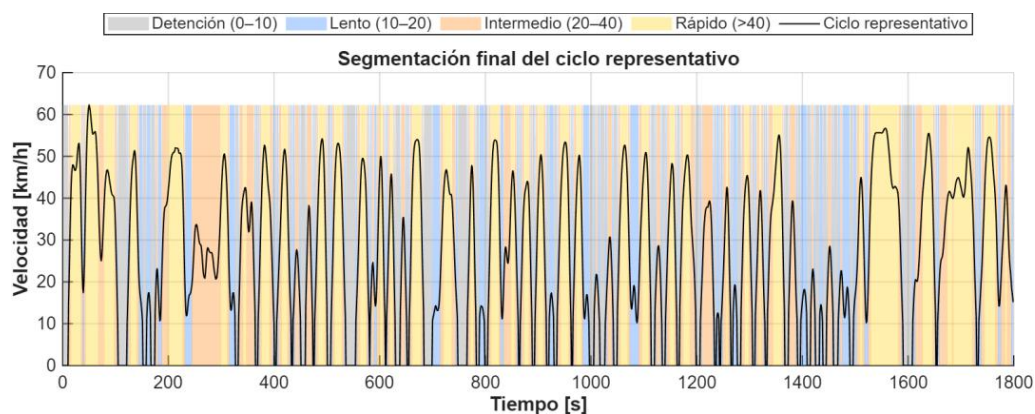


Figura 8. Segmentación del ciclo de conducción representativo en fases de operación urbana

El fondo del gráfico está dividido en tres colores que permiten identificar los distintos segmentos de conducción: azul para el tramo lento, naranja para el tramo intermedio y amarillo para el tramo rápido. Esta segmentación facilita el análisis de cómo se distribuye el tiempo de conducción en diferentes condiciones de velocidad y aceleración como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Tiempo y porcentaje por tramo.

Parámetro	Tiempo [s]	Porcentaje [%]
Detención ($0 \leq v \leq 10$ km/h)	338	18.78 %
Tramo lento ($10 < v \leq 20$ km/h)	389	21.61 %
Tramo intermedio ($20 < v \leq 40$ km/h)	546	30.33 %
Tramo rápido ($v > 40$ km/h)	527	29.28 %
Total	1800	100 %

En la Tabla 5 se presenta la distribución temporal del ciclo de conducción según los rangos de velocidad definidos. Posee un tiempo de detención ($0 \leq v \leq 10$ km/h) que corresponde al 18.78%, el tramo lento ($10 \leq 20$ km/h) concentra 389 segundos, equivalentes al 21.61 % del tiempo total del ciclo, lo que evidencia una presencia relevante de condiciones de muy baja velocidad dentro del entorno urbano analizado. Este comportamiento es característico de escenarios con alta interacción vial, donde predominan fases de circulación restringida y cambios frecuentes en el régimen de velocidad. Este resultado indica que el vehículo transita rápidamente por este rango de velocidad, sin mantenerse de forma prolongada en él, lo que sugiere transiciones directas entre estados de detención y velocidades medias. Por su parte, el tramo medio ($20 \leq v < 40$ km/h) con una duración de 546 segundos, correspondiente al 30.33 % del ciclo. Este predominio confirma que la mayor parte de la conducción se desarrolla bajo condiciones de velocidad moderada, típicas de vías urbanas principales y avenidas, donde el flujo vehicular es relativamente continuo, aunque condicionado por el entorno. Este comportamiento es consistente con la velocidad promedio registrada y refuerza la representatividad del ciclo respecto a la dinámica real de circulación urbana. Finalmente, el tramo rápido ($v \geq 40$ km/h) ocupa 527 segundos, equivalentes al 29.28 % del tiempo total. Aunque presente, su participación es menor en comparación con los tramos de menor velocidad, lo que evidencia que las condiciones de circulación a alta velocidad son menos frecuentes dentro del contexto urbano evaluado. En conjunto, la alternancia entre los distintos rangos de velocidad refleja una dinámica de aceleración y desaceleración típica del tráfico urbano, validando el ciclo de conducción como una herramienta adecuada para simulaciones, calibración de modelos y el análisis de estrategias de movilidad sostenible.

Tabla 6. Parámetros estadísticos del ciclo de conducción.

Parámetro	Valor
Duración	1800 s
Velocidad media	26.17 km/h
Velocidad máxima	62.26 km/h
% Idle (Tiempo en ralentí)	18.78 %
a^+ media	0.80 m/s ²
a^- media	-0.89 m/s

En la Tabla 6 se presentan El ciclo de conducción representativo presenta una duración total de 1800 s, correspondiente al perfil temporal normalizado del recorrido completo. La velocidad media obtenida fue de 26.17 km/h, valor característico de operación urbana con presencia significativa de interferencias operativas. La velocidad máxima alcanzó 62.26 km/h, lo cual evidencia la existencia de tramos de circulación relativamente

fluida dentro del recorrido. El porcentaje de tiempo en condición ralentí fue de 18.78 %, indicando que aproximadamente una cuarta parte del ciclo corresponde a detenciones o velocidades inferiores al umbral establecido (≤ 10 km/h). Este comportamiento es consistente con la naturaleza del sistema BRT, donde existen paradas obligatorias, control semafórico y variabilidad asociada a la demanda de pasajeros. Desde el punto de vista dinámico, la aceleración media positiva fue de 0.80 m/s², mientras que la aceleración media negativa alcanzó -0.89 m/s². La mayor magnitud en las desaceleraciones sugiere reducciones de velocidad más abruptas en comparación con los incrementos de velocidad, comportamiento típico en entornos urbanos con alta interacción vehicular y frecuentes detenciones.

En conjunto, los parámetros estadísticos obtenidos son coherentes con la forma del perfil de velocidad observado en la gráfica del ciclo representativo, validando la consistencia entre los resultados numéricos y la representación visual del comportamiento dinámico del sistema. La simetría entre estos valores indica un comportamiento dinámico equilibrado, con transiciones frecuentes entre aceleración y frenado. Este patrón es típico de la conducción urbana, donde el conductor debe adaptarse constantemente a las condiciones del tráfico, realizando maniobras de arranque y detención en cortos intervalos de tiempo. La presencia de aceleraciones suaves y constantes sugiere una conducción eficiente, sin cambios bruscos de velocidad, lo cual es favorable desde el punto de vista del consumo energético y la comodidad del pasajero. Además, estos valores permiten validar la segmentación del gráfico, ya que los tramos lentos presentan aceleraciones menores, mientras que los tramos rápidos muestran aceleraciones más pronunciadas.

De manera complementaria, se efectuó un análisis cuantitativo global del ciclo representativo con el propósito de caracterizar su comportamiento respecto al conjunto de trayectorias experimentales. Se calcularon indicadores de error relativos a los parámetros globales de velocidad, obteniéndose valores del 3.24 % para la velocidad media y del 5.53 % para la velocidad máxima. Asimismo, el análisis de incertidumbre de la señal de velocidad permitió estimar una desviación estándar del ruido de 1.815 km/h y una incertidumbre relativa del 6.52 %, asociadas al proceso de adquisición GPS en condiciones urbanas. Adicionalmente, la prueba aplicada a la velocidad media mostró una concordancia entre el ciclo representativo y las muestras originales dentro del nivel de significancia adoptado. Estos resultados proporcionan una caracterización cuantitativa del ajuste entre el ciclo obtenido y las trayectorias experimentales consideradas en el estudio.

4. Discusión

El ciclo de conducción representativo desarrollado evidencia que la operación de la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil está condicionada por factores urbanos locales, los cuales influyen de manera directa en la variabilidad temporal para la velocidad, las aceleraciones y los tiempos de detención, esta característica confirma que el uso de datos experimentales reales resulta fundamental para capturar la dinámica efectiva del sistema, evitando simplificaciones que podrían distorsionar el análisis del desempeño vehicular.

A diferencia de los enfoques basados en promedios aritméticos frecuentemente utilizados en estudios clásicos el método del medoide selecciona un recorrido real perteneciente al conjunto de datos, evitando la generación de perfiles suavizados que tienden a atenuar eventos críticos como detenciones completas, arranques sucesivos y variaciones abruptas de velocidad. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios donde el uso del medoide ha demostrado mayor capacidad para conservar la naturaleza transitoria del tráfico urbano frente a técnicas de promediación o interpolación estadística. La dispersión observada entre los recorridos reales evidencia el carácter no estacionario del sistema de tráfico urbano, fenómeno ampliamente documentado en investigaciones sobre ciclos de conducción en entornos congestionados. En este contexto, el medoide actúa como un estimador robusto de centralidad, integrando la variabilidad existente sin eliminarla artificialmente. Estudios comparativos entre métodos de clustering (k-means, k-medoids y análisis jerárquico) han señalado que el medoide presenta mayor estabilidad ante valores atípicos y trayectorias extremas, lo cual resulta especialmente relevante en corredores BRT donde las condiciones operativas varían debido a la semaforización, interferencias vehiculares y tiempos de parada en estaciones.

La velocidad media obtenida (26.17 km/h) se sitúa dentro del rango reportado en ciclos urbanos representativos de sistemas de transporte masivo con carriles exclusivos, aunque ligeramente influenciada por episodios de congestión y detenciones operativas. Esta dualidad entre tramos de circulación relativamente fluida y periodos prolongados de baja velocidad coincide con hallazgos en estudios de caracterización energética, donde se evidencia que los ciclos derivados mediante métodos representativos reales tienden a reflejar mejor la interacción entre infraestructura dedicada y condiciones reales de operación. Asimismo, el comportamiento prácticamente simétrico de las aceleraciones medias positiva y negativa confirma una alternancia constante entre fases de aceleración y desaceleración, patrón típico del tráfico urbano real. Investigaciones sobre consumo energético y emisiones han demostrado que esta dinámica transitoria incrementa la demanda instantánea de potencia y reduce la eficiencia global del sistema, especialmente en vehículos de transporte masivo sometidos a ciclos de arranque-parada frecuentes. En este sentido, el ciclo obtenido mediante el método del medoide no solo representa un comportamiento promedio estadísticamente coherente, sino que conserva los atributos dinámicos que determinan el desempeño energético y ambiental del sistema.

El porcentaje de tiempo detenido cercano al 20 % del ciclo total sugiere que la operación en la troncal analizada está fuertemente condicionada por eventos de parada y arranque, lo que tiene implicaciones directas sobre el consumo energético y las emisiones. Este valor se sitúa dentro del rango reportado para condiciones urbanas reales: por ejemplo, análisis de operaciones en condiciones urbanas del proyecto WLTP muestran porcentajes de tiempo en reposo cercanos al 26 % en entornos urbanos, mientras que ciclos urbanos de referencia como FTP-75 y JC08 reportan fracciones significativas de operación en detención asociadas a su naturaleza stop-and-go (patrón de conducción caracterizado por detenciones frecuentes seguidas de aceleraciones de recuperación), lo que confirma que proporciones de tiempo detenido en torno al 20–30 % son plausibles en corredores con paradas frecuentes y control semafórico. En contraste, ciclos con menor severidad transitoria, como NEDC, tienden a presentar menores proporciones de detención debido a perfiles de velocidad más suavizados y menor variabilidad dinámica. Asimismo, análisis de operación en sistemas de transporte público urbano evidencian variaciones considerables en la fracción temporal de detención asociadas a factores operativos como densidad de estaciones, diseño de paradas y prioridades semafóricas. En conjunto, estas comparaciones refuerzan la argumentación de que los ciclos normativos típicos subestiman la severidad de los perfiles reales de detención en BRT urbanos y justifican la adopción de ciclos locales representativos para evaluaciones energéticas y de emisiones.

El FTP-75 constituye una referencia normativa ampliamente aceptada para la evaluación de consumo y emisiones en condiciones urbanas, ya que fue diseñado para reproducir patrones reales de conducción con fases de arranque, detención y aceleración representativas del tráfico ciudadano. En este contexto, aunque el ciclo local presenta una mayor irregularidad temporal y una distribución no uniforme de paradas propias de la operación real del sistema BRT en Guayaquil, los valores promedio obtenidos, particularmente en velocidad media y dinámica de aceleraciones, se aproximan a los rangos característicos del FTP-75. Esta convergencia respalda la validez metodológica del ciclo propuesto, evidenciando que los datos obtenidos no solo representan fielmente la realidad local, sino que además se encuentran alineados con estándares internacionalmente demostrados.

Desde una perspectiva operativa, el análisis segmentado revela que la troncal no presenta un comportamiento homogéneo a lo largo del recorrido. Los segmentos con menor velocidad media y mayor proporción de tiempo detenido se asocian a zonas de mayor interferencia operativa, como áreas de alta demanda y mayor frecuencia semafórica. Esta variabilidad interna no contradice la coherencia global con el FTP-75; por el contrario, refuerza su pertinencia, ya que el propio ciclo normativo incorpora fases diferenciadas (cold start, transient y hot stabilized) que reflejan distintos regímenes dinámicos. En este sentido, el ciclo local reproduce cualidades estructurales comparables alternancia entre circulación fluida y condiciones transitorias pero adaptadas a la realidad específica del corredor analizado. Las diferencias observadas en las aceleraciones medias entre segmentos confirman la existencia de regímenes dinámicos diferenciados, con tramos de mayor severidad asociados a arranques frecuentes y cambios bruscos de velocidad, y otros de

comportamiento más estable. Esta heterogeneidad es consistente con la filosofía del FTP-75, que integra múltiples fases para representar distintos estados operativos del vehículo. Por tanto, mientras el ciclo normativo garantiza un marco estandarizado de comparación bajo condiciones urbanas representativas, el ciclo local aporta una caracterización más detallada y contextualizada del desempeño real del sistema BRT.

Desde una perspectiva cuantitativa, la representatividad del ciclo desarrollado fue evaluada mediante indicadores estadísticos de similitud entre el perfil seleccionado y las trayectorias experimentales, incluyendo métricas de error, correlación y análisis de dispersión de la señal de velocidad, enfoque consistente con metodologías de construcción de ciclos de conducción basadas en datos reales. Los resultados evidenciaron desviaciones reducidas y una concordancia estructural positiva entre perfiles velocidad–tiempo, mientras que el análisis básico de incertidumbre asociado a la medición GPS confirmó que el nivel de ruido instrumental se mantiene dentro de rangos esperados para adquisiciones cinemáticas urbanas, reforzando la confiabilidad del procedimiento adoptado.

Finalmente, la segmentación dinámica en regímenes de arranque urbano, urbano transitorio y urbano fluido confirma que el comportamiento predominante corresponde a condiciones urbanas transitorias, coherentes tanto con la distribución interna del ciclo como con los patrones descritos en normativas internacionales. La integración del análisis global con el análisis segmentado fortalece la robustez del enfoque metodológico adoptado, ya que permite validar los resultados frente a un estándar reconocido como el FTP-75 y, simultáneamente, capturar las particularidades operativas locales. De esta manera, se garantiza que los datos obtenidos sean técnicamente consistentes, comparables a nivel normativo y representativos de las condiciones reales de operación.

5. Conclusiones

El desarrollo del ciclo de conducción representativo para la Troncal 1 del sistema BRT de Guayaquil permitió caracterizar cuantitativamente su comportamiento dinámico en condiciones reales de operación. A partir de doce trayectorias experimentales se obtuvo un perfil velocidad–tiempo de 1800 s, consistente con ciclos urbanos de evaluación vehicular. La velocidad media de 26.17 km/h confirma el carácter urbano del corredor, mientras que la velocidad máxima de 62.26 km/h evidencia la presencia de tramos de circulación fluida. La coexistencia de congestión y flujo continuo refleja un entorno operativo transitorio, garantizando fidelidad y representatividad estadística.

La segmentación de trayectorias permitió estructurar el proceso de obtención del ciclo representativo a partir de microviajes homogéneos y comparables. La aplicación del método del medoide permitió seleccionar un perfil real estadísticamente central dentro del conjunto de trayectorias, preservando eventos de detención, aceleración y variabilidad temporal propios del entorno urbano y evitando la generación de ciclos artificialmente suavizados. De esta manera, la integración de la segmentación de microviajes, la normalización temporal y el criterio de selección representativa permitió caracterizar objetivamente la dinámica operacional del corredor y consolidar un ciclo de conducción robusto para evaluaciones técnicas posteriores.

El análisis de indicadores dinámicos validó la coherencia del ciclo frente a los recorridos originales. El tiempo en detención es 18.78 % cuantifica el efecto de paradas e intersecciones, mientras que las aceleraciones y desaceleraciones con 0.80 m/s^2 y -0.89 m/s^2 evidencian exigencias propias del transporte urbano. La mayor concentración temporal en el régimen intermedio confirma una operación bajo tráfico variable y no estacionario, diferenciando estados de conducción lenta, transitoria y fluida.

La comparación con los recorridos reales demostró que el ciclo permanece dentro de la envolvente de dispersión de las trayectorias registradas, confirmando la robustez del proceso de segmentación y selección representativa. La identificación de tres regímenes operativos —lento, transitorio e intermedio–rápido— evidencia la heterogeneidad del entorno vial y la concentración temporal en condiciones dinámicas variables, integrando de manera consistente la complejidad operativa real del sistema.

El contraste con el ciclo estandarizado FTP-75 evidenció diferencias estructurales en la distribución temporal de velocidades y en la severidad dinámica del patrón local, ya que, aunque ambos presentan velocidades máximas comparables, el ciclo desarrollado muestra mayor irregularidad y detenciones no periódicas asociadas a la interacción vehicular y la regulación semafórica del corredor, lo que respalda la pertinencia del uso de ciclos locales para evaluaciones energéticas y ambientales. En este contexto, la validación cuantitativa del ciclo confirmó su adecuada representatividad, registrándose un error relativo del 3.24 % en velocidad media y del 5.53 % en velocidad máxima, valores dentro de márgenes aceptables para estudios de caracterización dinámica urbana.

Apéndice A. Construcción y normalización de la matriz de velocidades

```

1  archivo_excel = 'SEGMENTACION DE LA
2  RUTA corre.xlsx'?
3  numero_tomas = 12;
4  duracion_ciclo = 1800; % duraci3n
5  estandarizada [s]
6  velocidades_interpoladas = [];
7  for k = 1:numero_tomas
8  nombre_hoja = sprintf('TOMA&dF',k) +
9  datos =
10 readtable(archivo_excel,
11 'Sheet',nombre_hoja, 'ReadVariableNames',
12 false);
13 datos = datos(:,1:8);
14 datos.Properties.VariableNames = ...
15 {'Tiempo_s', 'Latitud', 'Longitud',
16 'Altitud_m',...
17 'Velocidad_kmh',
18 'Velocidad_ms','Distancia_m',
19 'Aceleracion_ms2'};
20 tiempo_s = datos.Tiempo_s;
21 velocidad_kmh = datos.Velocidad_kmh;
22 Breen ene
23 % LIMPIEZA DE DATOS
24 Be
25 velocidad_kmh(velocidad_kmh < 0 |
26 isnan(velocidad_kmh)) = 07
27 % NORMALIZACION TEMPORAL
28 ee
29 tiempo_normalizado = (tiempo_s -
30 tiempo_s(1)) / ...
31 (tiempo_s(end) - tiempo_s(1))s
32 tiempo_objetivo =
33 linspace(0,1,duracion_ciclo);
34 ee
35 % INTERPOLACION
36 velocidad_interp =
37 interp(tiempo_normalizado,...
38 velocidad_kmh,...
39 tiempo_objetivo,...
40 "linear", 'extrap');
41 velocidades_interpoladas = ...
42 [velocidades_interpoladas; velocidad_interp];
43 end
44 archivo_excel = 'SEGMENTACION DE LA
45 RUTA corre.xlsx';
46 numero_tomas = 12;
47 duracion_ciclo = 1800; % duraci3n final [s]
48 umbral_detencion = 10; % km/h (criterio de
49 detenci3n)
50 % Matriz donde se almacenar3n las
51 velocidades interpoladas
52 vel
53 for k = 1:numero_tomas
54 hoja = sprintf('TOMASGF',k);
55 datos = readtable(archivo_excel, 'Sheet',hoja,
56 'ReadVariableNames', false);
57 datos = datos(:,1:8);
58 datos.Properties.VariableNames = ...
59 {'Tiempo_s','Lat','Lon', 'Alt', 'Vel_kmh',
60 'Vel_ms', 'Dist_m', 'Acc_ms2'};
61 t = datos.Tiempo_s;
62 v = datos.Vel_kmh;
63 % --- DEPURACION (v(t)=0 si v<0 0 NaN)
64 viv <0 | isnan(v)) = 0;
65 % Distancia cuadratica total entre trayectorias
66 distancias = zeros(numero_tomas,1);
67 for i = 1:numero_tomas
68 distancias(i) = sum(sum((V - V(i,:)).*2))/7
69 end
70 [~, idx_medioide] = min(distancias);
71 v_rep = V(idx_medioide, :)+
72 % Suavizado leve para eliminar ruido
73 instrumental
74 v_rep = movmean(v_rep, 7);
75 fprintf('% Medoide seleccionado (TOMA
76 %d)\n', idx_medioide);
77 Y Medoide seleccionado (TOMA 5)
78 tiempo_det_s = sum(mask_det);
79 porcentaje_det = 100 * tiempo_det_s /
80 duracion_ciclo;
81 $ --- Aceleraciones
82 a_kmh_s = [0 diff(v_rep)];
83 a_ms2 = a_kmh_s / 3.6;
84 a_pos_media = mean(a_ms2(a_ms2 > 0));
85 a_neg_media = mean(a_ms2(a_ms2 < 0));
86 & --- Estadisticos principales
87 vel_media = mean(v_rep);
88 vel_max = max(v_rep);
89 tabla_ciclo = table( ...
90 duracion_ciclo, ...
91 vel_media, ...
92 vel_max, ...
93 porcentaje_det, ...
94 a_pos_media, ...
95 a_neg_media, ...
96 'VariableNames', ( ...
97 "Duracion_s", ...
98 "Velocidad_media_kmh", ...
99 *Velocidad_maxima_kmh', ...
100 'Porcentaje_detencion_pct', ...
101 'aceleracion_media_positiva_ms2', ...
102 'Aceleracion_media_negativa_ms2'});
103 disp('=== CICLO REPRESENTATIVO
104 (MEDOIDE) ===');
105 disp(tabla_ciclo);
106 === CICLO REPRESENTATIVO
107 (MEDOIDE) ===
108 Duracion_s Velocidad media_kmh ---
109 Velocidad_maxima_kmh
110 Porcentaje_detencion_pct
111 Aceleracion_media_positiva_ms2
112 Aceleracion_media_negativa_ms2
113 1800 26.172 62.255
114 18.778 0.80438
115 -0.88761
116 figure('Color', 'w', 'Position', (100 120 1200
117 420));
118 hold on; grid on;
119 % Recorridos originales
120 for i = 1:numero_tomas

```

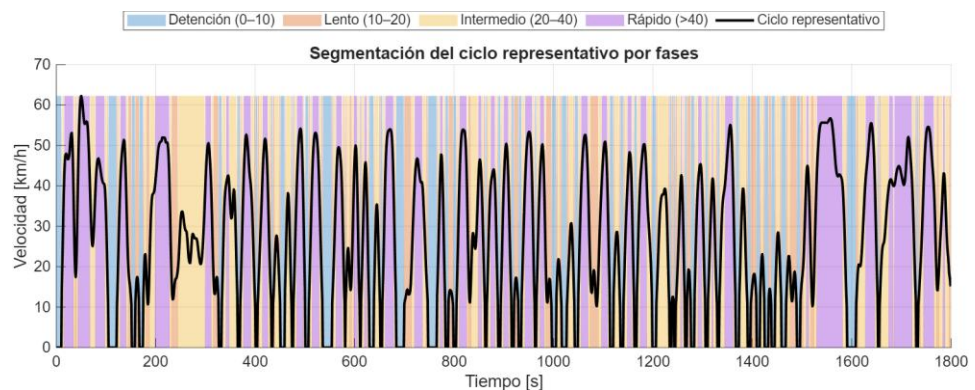


Figura A1. Gráfica segmentada y correcta

```

121 plot(t_final, V(i,:), 'Color', [0.85 0.85 0.85],
122 'LineWidth',0.8);
123 end
124 % Ciclo representativo
125 plot(t_final, v_rep, 'Color', (0.2 0.2 0.2),
126 'LineWidth',2)+
127 xlabel("Tiempo [s]");
128 ylabel("Velocidad [km/h]");
129 title('Ciclo de conducción representativo
130 (medoide)');
131 legend({'Recorridos reales', 'Ciclo
132 representativo'}, ...
133 "Location", 'northoutside', 'Orientation',
134 "horizontal");
135 n lta a conden aprasanttv (ade)
136 "
137 Ea
138 |ALM
139 erpo 8}
140 load ciclo_representativo.mat % Debe
141 contener v_rep
142 velocidad = v_rep; % km/h
143 N = length(velocidad);
144 dt = 1;
145 % Generar eje de tiempo automáticamente
146 correcto
147 tiempo = 0:N-1;
148 fase_detencion = velocidad <= 10;
149 fase_lento = velocidad > 10 & velocidad <=
150 20;
151 fase_intermedio = velocidad > 20 &
152 velocidad <= 40;
153 fase_rapido = velocidad > 40;
154 PORCENTAJES ==
155 porc_detencion = 100 * tiempo_detencion /
156 N;
157 porc_lento = 100 * tiempo_lento / N;
158 porc_intermedio = 100 *
159 tiempo_intermedio / N;
160 porc_rapido = 100 * tiempo_rapido / N;
161 tabla_fases = table( ...
162 tiempo_detencion, porc_detencion, ...
163 tiempo_lento, porc_lento, ...
164 tiempo_intermedio, porc_intermedio, ...
165 tiempo_rapido, porc_rapido, ...
166 'variableNames', ( ...
167 'Tiempo_detencion_s',
168 'Porcentaje_detencion_pct', ...
169 'Tiempo_lento_s', 'Porcentaje_lento_pct',
170 ...
171 'Tiempo_intermedio_s', 'Porcentaje_inter
172 medio_pct', ...
173 'Tiempo_rapido_s',
174 'Porcentaje_rapido_pct')+
175 disp('== SEGMENTACION FINAL
176 POR FASES ==')
177 disp(tabla_fases)
178 == SEGMENTACION FINAL POR
179 FASES ==
180 Tiempo_detencion_s
181 Porcentaje_detencion_pct
182 Tiempo_lento_s
183 Porcentaje_lento_pct
184 Tiempo_intermedio_s
185 Porcentaje_intermedio_pct
186 Tiempo_rapido_s Porcentaje_rapido_pct
187 338 18.778
188 389 21.611 546
189 30.333 527 29.278
190 figure('Color','w','Position',[100 100
191 1200 420])+
192 hold on; grid on;
193 vel_max = max(velocidad);
194 % Convertir lógicos a double para evitar
195 errores
196 area(tiempo, double(fase_detencion)
197 *vel_max,
198 'FaceAlpha',0.35, 'EdgeColor', 'none') +
199 area(tiempo, double(fase_lento)
200 *vel_max,
201 'FaceAlpha',0.35, 'EdgeColor', 'none');
202 area(tiempo, double(fase_intermedio)
203 *vel_max,
204 'FaceAlpha',0.35, 'EdgeColor', 'none');
205 area(tiempo, double(fase_rapido)
206 *vel_max,
207 'FaceAlpha',0.35, 'EdgeColor', 'none');
208 plot(tiempo, velocidad, 'k',
209 'LineWidth',2)
210 xlabel("Tiempo [s]");
211 ylabel("Velocidad [km/h]");
212 title('Segmentación del ciclo
213 representativo por fases');
214 legend({'Detención (0-10)', 'Lento (10-
215 20)', ...
216 'Intermedio (20-40)', 'Rápido (>40)', ...
217 'Ciclo representativo'}, ...
218 'Location', 'northoutside', 'Orientation',
219 "horizontal");
220 set(gca, 'FontSize',12);
221 load('ciclo_representativo.mat');
222 % Debe contener: v_rep
223 N = length(v_rep);
224 t = 0:N-1;
225 fprintf('V Ciclo representativo cargado
226 correctamente\n');
227 VY Ciclo representativo cargado
228 correctamente

```

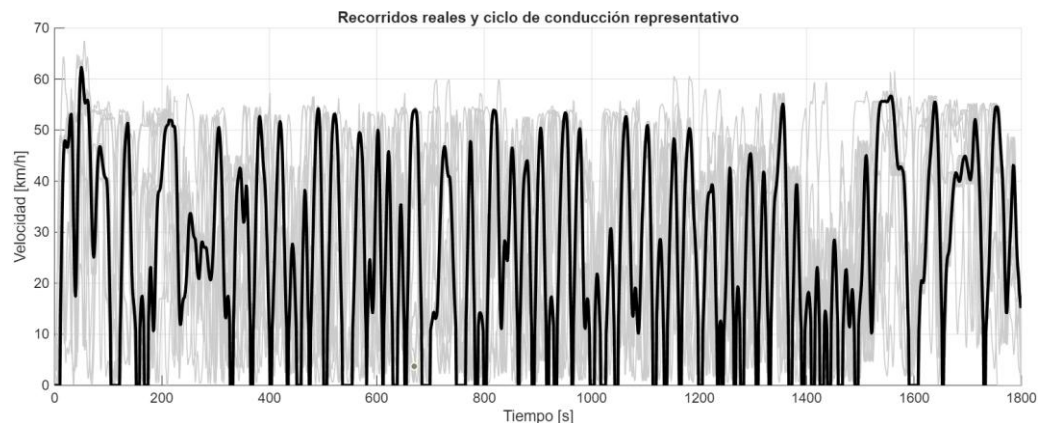


Figura A 2. Ciclo de conducción representativo

Apéndice B. Comparación del ciclo representativo vs. FTP-75.

```

1  archivo_ftp = "CICLO DE
2  CONDÜCCION FTP=75.xlsx"7
3  opts = detect Importoptions(archivo_ftp);
4  opts = setvartype(opts, 'char');
5  Tftp = readtable(archivo_ftp, opts);
6  t_ftp = str2double(Tftp(:,1))¢
7  v_str = strrep(Tftp{:,2}, '%', '.')F
8  v_ftp = str2double(v_str);
9  idx = ~isnan(t_ftp) & ~isnan(v_ftp);
10 t_ftp = t_ftp(idx);
11 v_ftp = v_ftp(idx);
12 % Interpolar FTP al mismo eje temporal
13 v_ftp_i = interp(t_ftp, v_ftp, t, 'linear',
14 0);
15 8 --- Representativo
16 idle_rep = v_rep <= 10;
17 a_rep = [0 diff(v_rep)]/3.6;
18 Vmedia_rep = mean(v_rep);
19 vmax_rep = max(v_rep);
20 Idle_rep = 100*sum(idle_rep) /Ni
21 Acc_pos_rep = mean(a_rep(a_rep>0));
22 Acc_neg_rep = mean(a_rep(a_rep<0));
23 & --- FIP+75
24 idle_ftp = v_ftp_i <= 10;
25 a_ftp = (0 diff(v_ftp_i)]/3.6;
26 Vmedia_ftp = mean(v_ftp_i);
27 vmax_ftp = max(v_ftp_i);
28 Idle_ftp = 100*sum(idle_ftp) /N;
29 Acc_pos_ftp = mean(a_ftp(a_ftp>0));
30 Acc_neg_ftp = mean(a_ftp(a_ftp<0));
31 Tabla_comparacion = table( ...
32 Vmedia_rep, Vmax_rep, Idle_rep,
33 Acc_pos_rep, Acc_neg_rep, ...
34 Vmedia_ftp, Vmax_ftp, Idle_ftp,
35 Acc_pos_ftp, Acc_neg_ftp);
36 disp('== COMPARACION CICLO
37 REPRESENTATIVO vs FTP=75 ==');
38 disp(Tabla_comparacion);
39 == COMPARACION CICLO
40 REPRESENTATIVO vs FIP-75 ==
41 Vmedia_rep Vmax_rep Idle_rep
42 Acc_pos_rep — Acc_neg_rep
43 Vmedia_ftp Vmax_ftp Idle_ftp
44 Acc_pos_ftp Acc_neg_ftp
45 26.172 62.255 18.778 0.80438 -0.88761
46 21.186 56.7 28.778 0.31328 -0.35717
47 ANNA
48 load ciclo_representativo.mat % contiene
49 v_rep
50 t = 0:length(v_rep)-1;
51 N = length(v_rep) +
52 dt = 1; % 1 segundo
53 fase_detencion = v_rep <= 10;
54 fase_lento = v_rep > 10 & v_rep <= 20;
55 fase_intermedio = v_rep > 20 & v_rep
56 <= 40;
57 fase_rapido = v_rep > 40;
58 tiempo_detencion = sum(fase_detencion)
59 * dt;
60 tiempo_lento = sum(fase_lento) * dt
61 tiempo_intermedio =
62 sum(fase_intermedio) * dt;
63 tiempo_rapido = sum(fase_rapido) * dt
64 porc_detencion = 100 *
65 tiempo_detencion / N;
66 porc_lento = 100 * tiempo_lento /Ni
67 porc_intermedio = 100 * tiempo
68 intermedio / N;
69 porc_rapido = 100 * tiempo_rapido / Ni
70 tabla_fases = table( ...
71 tiempo_detencion, porc_detencion, ...
72 tiempo_lento, porc_lento, ...
73 tiempo_intermedio, porc_intermedio, ...
74 tiempo_rapido, porc_rapido, ...
75 'variableNames', ( ...
76 'Tiempo_detencion_s',
77 'Porcentaje_detencion_pct', ...
78 'Tiempo_lento_s', 'Porcentaje_lento_pct',
79 ...
80 'Tiempo_intermedio_s', 'Porcentaje_inter
81 medio_pct', ...
82 'Tiempo_rapido_s', 'Porcentaje rapido
83 _pct');
84 disp('== SEGMENTACION FINAL
85 POR FASES (0-10,10-20,20-40,>40)
86 ==')
87 disp(tabla_fases)
88 == SEGMENTACION FINAL POR
89 FASES (0-10,10-20,20-40,>40) ==
90 Tiempo detencion_s Porcentaje
91 detencion pet — Tiempo_lento_s
92 Porcentaje_lento_pet |
93 Tiempo_intermedio_s
94 Porcentaje_intermedio_pct
95 Tiempo_rapido_s Porcentaje_rapido_pct
96 338 18.778
97 389 21.611 546
98 30.333 527 29.278
99 area(t, fase_detencion*vmax,
100 'FaceColor',[0.6 0.6
101 0.6], 'FaceAlpha',0.4, "EdgeColor",
102 "none") +

```

```

103 area(t, fase_lento*vmax, "PaceColor",
104 [0.3 0.6
105 1),'FaceAlpha',0.4,'EdgeColor', 'none');
106 area(t, fase_intermediotvmax,
107 'FaceColor', [1 0.6
108 0.2], 'Facealpha',0.4, 'EdgeColor',
109 'none') +
110 area(t, fase_rapido*vmax, 'paceColor', [1
111 0.85
112 0.2], 'FaceAlpha',0.4,'EdgeColor', 'none');
113 plot(t, v_rep, 'k', 'LineWidth',2);
114 xlabel('Tiempo [s]');
115 ylabel('Velocidad [km/h]');
116 title(*Segmentación final del ciclo
117 representativo');
118 legend({'Detención (0-10)', 'Lento (10-
119 20)', ...
120 'Intermedio (20-40)', 'Rapido (>40)', 1.
121 'Ciclo representativo'h, ...
122 "Location", 'northoutside', 'Orientation',
123 'horizontal');
124 7 Spaenas aicacaneec
125 MATT ACTIARPARNA POAT REO
126 ABN AAI
127 SA NAAM re A Aaa Vet Ant
128 aM TAM yl I | mall
129 3 | ee eli | Wah wi
130 al LMAT| ATTA TTP AT atl Wo
131 3 NWA Wu TP Wa Wy Wy
132 | TMU APAT| i WT Wy
133 ° MATT Th
134 JT TECET TTA ETAT LP
135 Tere
136 load ciclo_representativo.mat % contiene
137 v_rep
138 archivo = 'SEGMENTACION DE LA
139 RUTA corre.xlsx'y
140 hoja = 'TOMASF'; § usamos la toma que
141 fue el medoide
142 T = readtable (archivo, 'Sheet',hoja,
143 'ReadVariableNames', false);
144 T= T(s,1:8)7
145 T.Properties.VariableNames = ...
146 {'TIEMPO', 'LAT', "LON", "ALT",
147 "VEL", 'VMS', 'DIST', 'ACEL'};
148 dist_real = T.DIST;
149 vel_real = T.VEL;
150 tramos = [ ...
151 103071570; 933; 1880; 415.7; 473; 472;
152 749; 3837479; 6267621; ...
153 5645564; 533; 397; 500;533;539;439;
154 48176187791; ...
155 663.287 618;
156 481;439;539;553;500;397;533;602; ...
157 542;578;516; 467; 395; 306; 725; 264;
158 3517473; ...
159 493;1650; 96671210];
160 dist_paradas = cumsum(tramos) ;
161 num_paradas = length (dist_paradas);
162 indices_paradas = zeros (num
163 _paradas,1);
164 for i = 1:num_paradas
165 [~, idx] = min(abs(dist_real -
166 dist_paradas(i)));
167 indices_paradas(i) = idx;
168 end
169 figure('Color','w', "Position", [100 100
170 1200 420])
171 hold on; grid on;
172 plot (dist_real/1000, vel_real,'k',
173 'Linewidth',1.5);
174 for i = 1:num_paradas
175 xline(dist_real (indices
176 _paradas(i))/1000, ...
177 tet, "LineWidth', 1.2);
178 end
179 xlabel ("Distancia acumulada [km]");
180 ylabel ("Velocidad [km/h]")+
181 title('Ciclo representativo con 47 paradas
182 BRT fijas');
183 legend({'Ciclo representativo','Paradas
184 BRT'}, ...
185 "Location", 'northoutside', 'Orientation',
186 "horizontal");
187 'ium

```

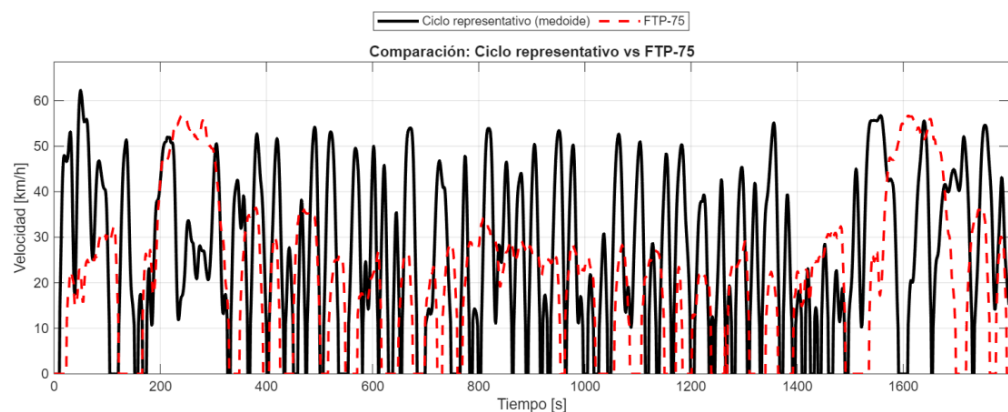


Figura B 1. Gráfica comparativa Ciclo Representativo vs FTP75

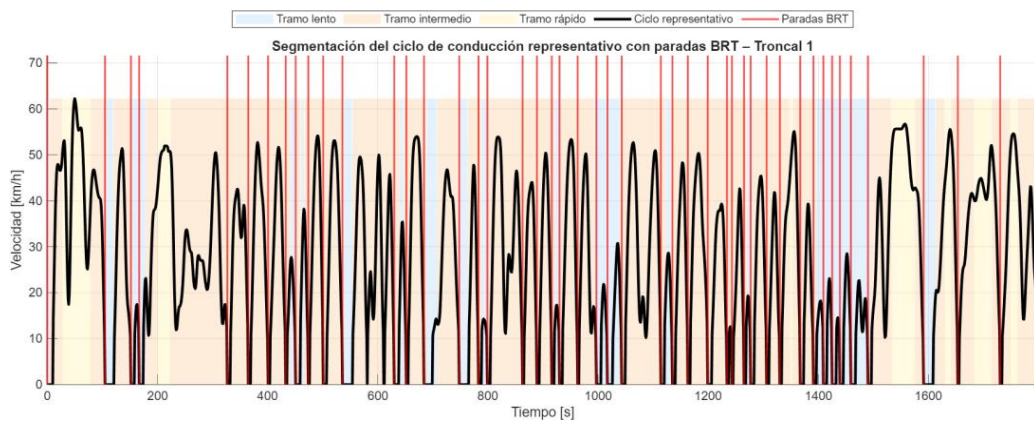


Figura B 2. Graficar ciclo con paradas marcadas.

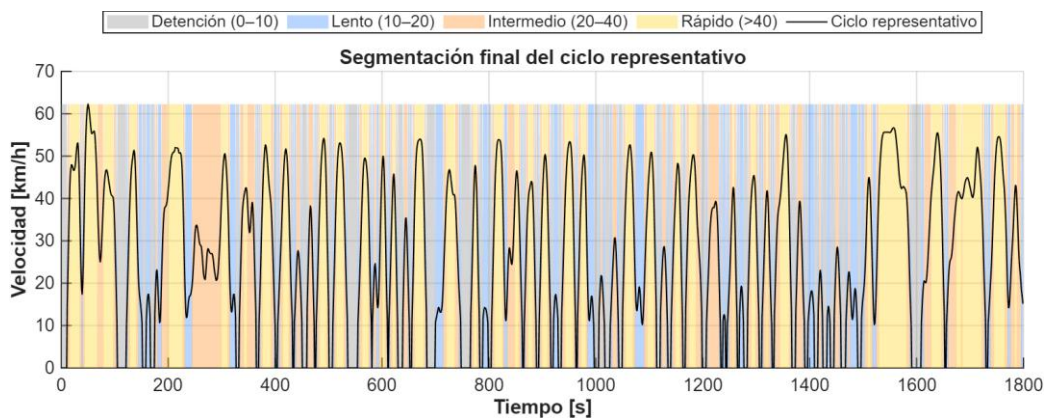


Figura B 3. Obtención de gráfica

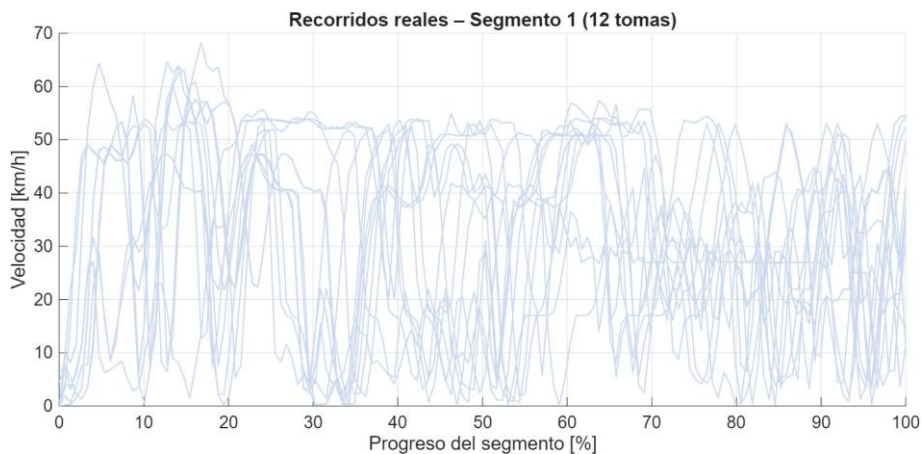


Figura C 1. Recorridos reales de velocidad - Segmento 1

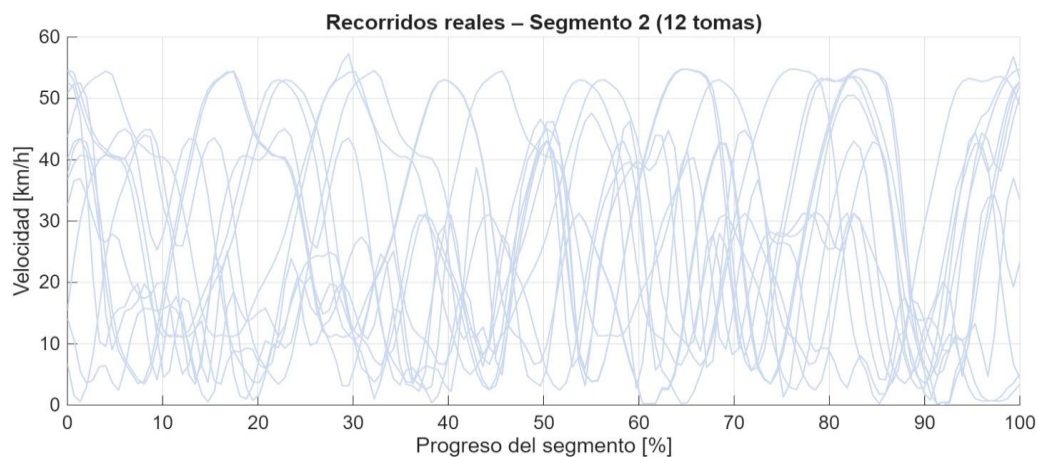


Figura C 2. Recorridos reales de velocidad – Segmento 2

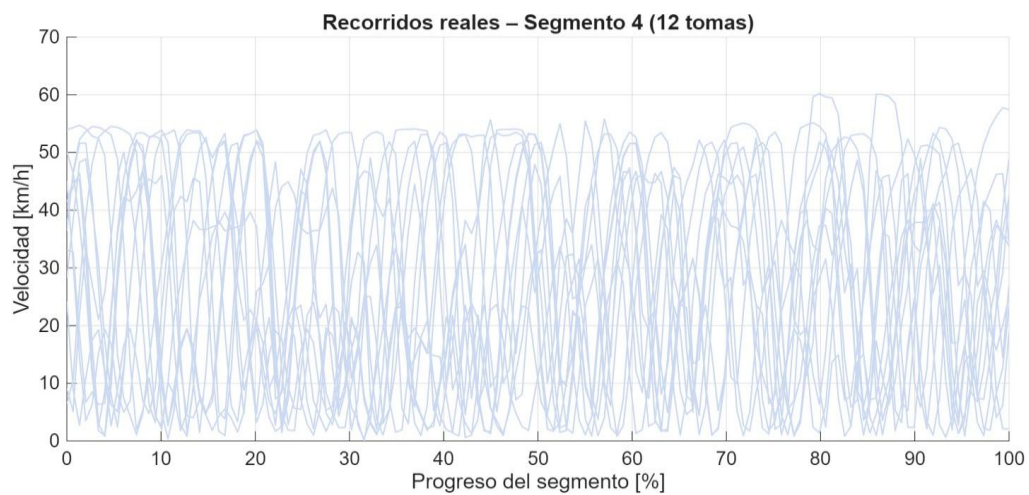


Figura C 3. Recorridos reales de velocidad – Segmento 4

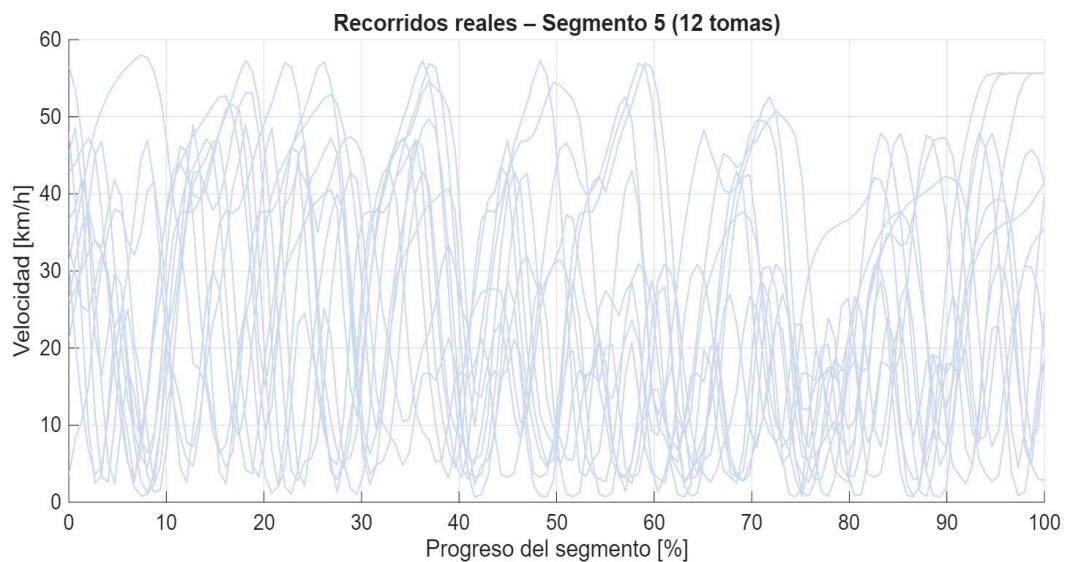


Figura C 4. Recorridos reales de velocidad – Segmento 5

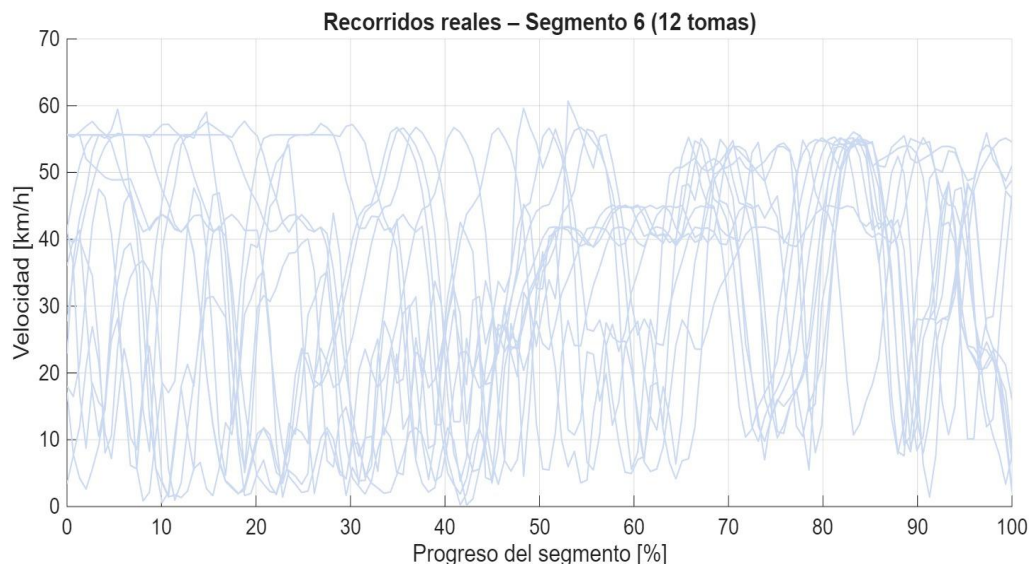


Figura C 5. Recorridos reales de velocidad – Segmento 6

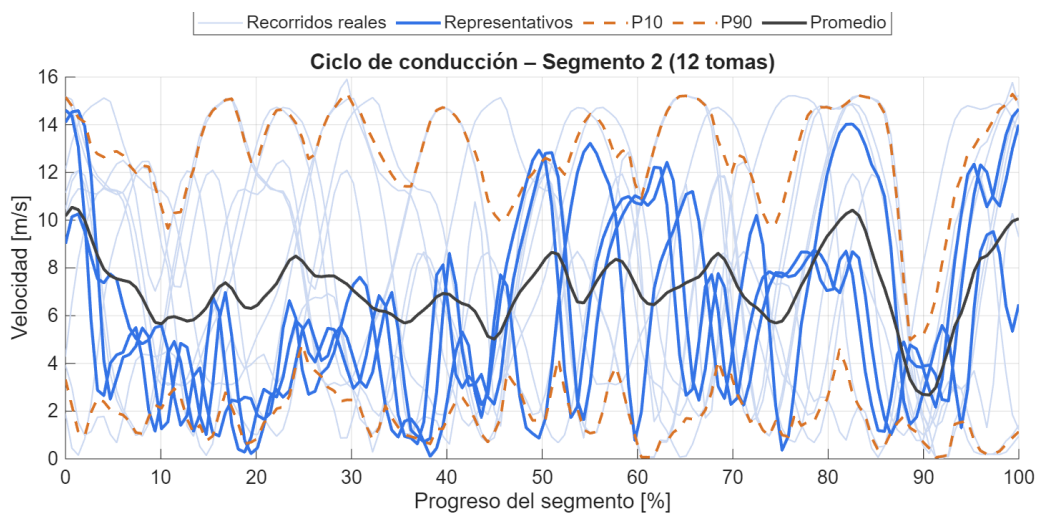


Figura D 1. Ciclo de conducción representativo del Segmento 2 del corredor BRT.

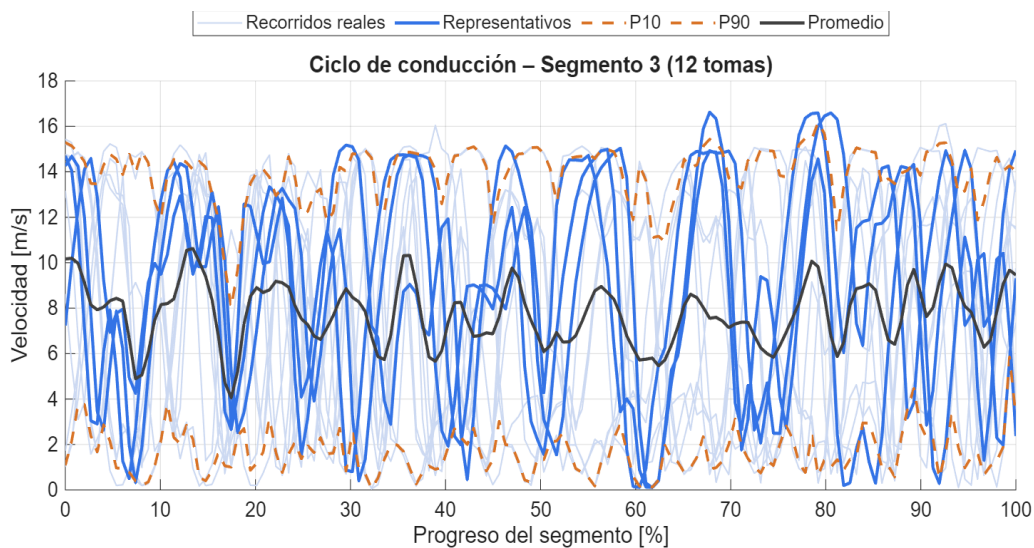


Figura D 2. Ciclo de conducción representativo del Segmento 3 del corredor BRT.

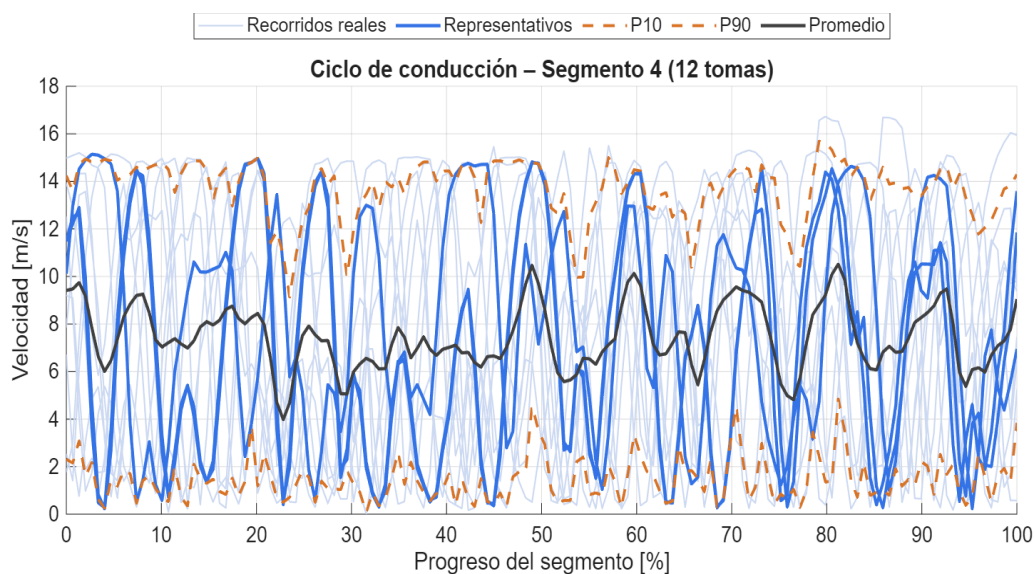


Figura D 3. Ciclo de conducción representativo del Segmento 4 del corredor BRT

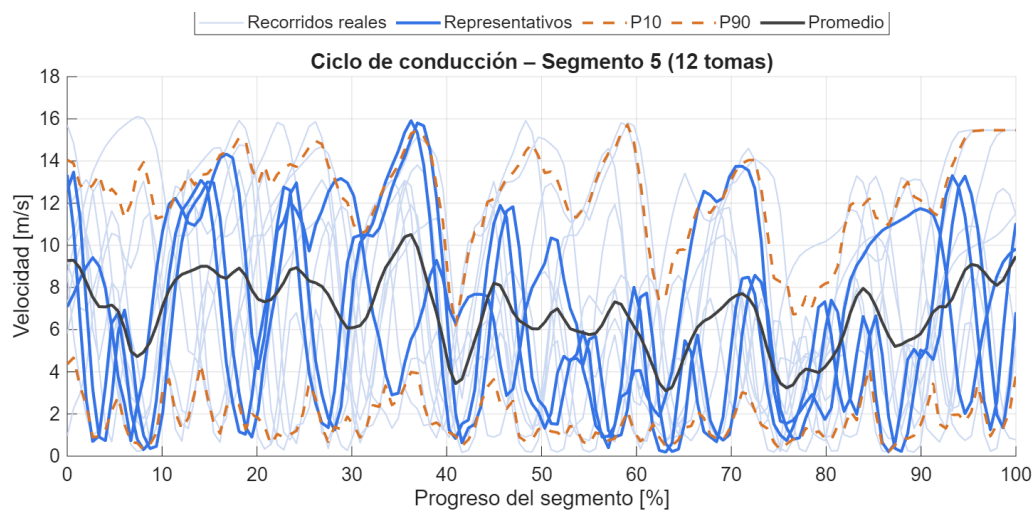


Figura D 4. Ciclo de conducción representativo del Segmento 5 del corredor BRT.

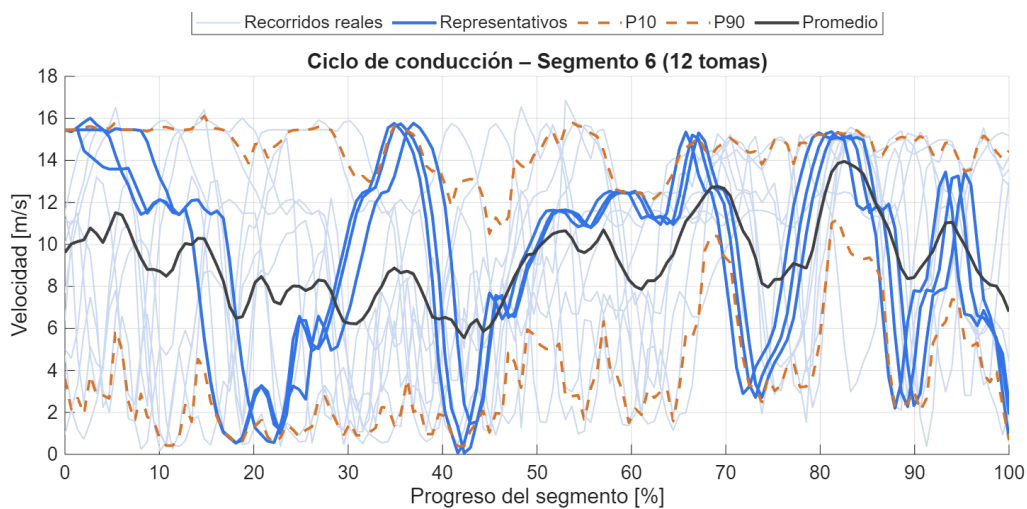


Figura D 5. Ciclo de conducción representativo del Segmento 6 del corredor BRT

6. Bibliografías

1. Ceder AB. Urban mobility and public transport: future perspectives and review. *Int J Urban Sci.* 2020;25(4):455–479. <https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>
2. Olivares J, Hernández C, Jiménez L. Movilidad urbana sostenible. *Rev Nóesis.* 2022;31(62):108–130. <https://doi.org/10.20983/noesis.2022.2.7>
3. Hidalgo D, Carrigan A. Modernizing public transport: Lessons learned from major bus improvements in Latin America and Asia. *Transp Res Rec.* 2010;2193:8–18. <https://doi.org/10.3141/2193-01>
4. López-Chila R, Abad-Reyna H, Morocho-Cajas J, Fierro-Jiménez P. Development of representative urban driving cycles for congested traffic conditions in Guayaquil using real-time OBD-II data and weighted statistical methods. *Vehicles.* 2025;7(3):95.
5. Rodríguez K et al. Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación. *Tecnura.* 2023;27(76):31–53. <https://doi.org/10.14483/22487638.17741>
6. Andrew L, Kitali A, Sando T, Musagasa J. Operational evaluation of the bus rapid transit system: Case study of Dar es Salaam city. *J Public Transp.* 2022;24:100020. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2022.100020>
7. Arellano X, Naranjo Y. La Metrovía como sistema BRT: el caso de la ciudad de Guayaquil. In: *Proc II Congreso Int Ciudad Territ Virtual*; Barcelona, España; 2018. p. 129–142. <https://doi.org/10.5821/ctv.8237>
8. Burgos Gavilán A. Efecto socioeconómico del sistema BRT (Bus de Tránsito Rápido) en Guayaquil en el período 2008–2013. Bachelor thesis, Universidad de Guayaquil, Ecuador; 2014.
9. Tong H, Ng K. Development of bus driving cycles using a cost-effective data collection approach. *Sustain Cities Soc.* 2021;69:102854. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102854>
10. Pérez J et al. Assessment of energy consumption of the BRT system in Bogotá. *Clean Energy.* 2024;8(3):34–47. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae022>
11. Guo J et al. Vehicle driving cycle construction method of urban roads. *J Traffic Transp Eng.* 2020;20(6):197–209. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.06.017>
12. Quirama L et al. Driving cycles that reproduce driving patterns. *Transp Res Part D Transp Environ.* 2020;82:102294. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102294>
13. Montúfar P, Vásconez D, Tello F. Análisis de representatividad de ciclos de conducción construidos a partir de potencia específica vehicular. *Polo Conoc.* 2021;6(7):979–1002. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i7.2902>
14. Reyes G, García E, Osorio N. Evaluación del ciclo de operación en el transporte público de la ciudad de Quito. *Polo Conoc.* 2024;9(3):4031–4055. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i3.6894>
15. Chilán L, Ordeñana O, Herrera A. Análisis de factibilidad de la integración de Aerovía y Metrovía mediante rutas alimentadoras. Unpublished manuscript; 2022.
16. Ramos X, Naranjo Y. Impact of the Metrovía system in the center of Guayaquil. *Rev Espacios.* 2017;38(57).
17. Setrini G, Cristaldo J, Cáceres A. La captura de las políticas de planificación del transporte urbano. *Rev Estud Paraguayos.* 2022;40:33–68. <https://doi.org/10.47133/respy2500202>
18. Microsoft. Microsoft 365 — Excel. Microsoft Corporation; 2026. Available from: <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel> (accessed Feb 4, 2026).
19. MathWorks. MATLAB. MathWorks Inc.; 2026. Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed Feb 4, 2026).
20. GPS Visualizer. Convert Input Data. GPSVisualizer.com; 2026. Available from: https://www.gpsvisualizer.com/convert_input (accessed Feb 4, 2026).
21. Dingil A, Rupi F, Esztergár D. Una revisión integradora de los factores socio-técnicos que influyen en la toma de decisiones de viaje y el rendimiento del transporte urbano. *Sustainability.* 2021;13(18):10158. <https://doi.org/10.3390/su131810158>
22. Almachi J, Saguay J, Anrango E, Cando E, Reina S. Clustering-based urban driving cycle generation: A data-driven approach for traffic analysis and sustainable mobility applications in Ecuador. *Sustainability.* 2025;17(8):3353. <https://doi.org/10.3390/su17083353>
23. El Universo. La troncal 4 de la Metrovía registra un avance del 85%, operará en el primer trimestre del 2021. Guayaquil, Ecuador; 2020. Available from: <https://www.eluniverso.com> (accessed 2026).
24. Son T et al. Algorithmic urban planning for smart and sustainable development. *Sustain Cities Soc.* 2023;94:104562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562>
25. Ericsson E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transp Res Part D Transp Environ.* 2001;6(5):325–345. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7)

26. Transportation Research Board. *Procedures for Developing Driving Cycles for Use in Transportation Analysis*. Transportation Research Circular E-C113. Washington, DC, USA: National Academies Press; 2013.
27. Han J, Kamber M, Pei J. *Data Mining: Concepts and Techniques*. 3rd ed. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann; 2012.
28. Lall R. *Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Climate and Hydrology*. Cham, Switzerland: Springer; 2020.
29. Lepot F, Aubin J-B, Clemens FHLR. Interpolation in time series: An introductory overview of existing methods, their performance criteria and uncertainty assessment. *Water*. 2017;9(10):796.
30. Agarwal A, Amjad MJ, Shah D, Shen D. Model agnostic time series analysis via matrix estimation. *arXiv preprint arXiv:1802.09064*; 2018.
31. Bishop CM. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, NY, USA: Springer; 2006.