ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVOS EN BUCARAMANGA, SANTANDER

CARLOS MARIO DE LEÓN JIMÉNEZ NEIRA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA

2019

ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVOS EN BUCARAMANGA, SANTANDER

Carlos Mario De León Jiménez Neira

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍA

Director

Leonardo Esteban Pacheco Sandoval PhD.

Ingeniero Mecánico

Co-Directora

Jessica Gissella Maradey Lázaro MSc.

Ingeniera Mecánica

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA

2019

Nota de aceptación:

Los miembros del comité, por la presente, certifican que han leído la tesis presentada por Carlos Mario de León Jiménez Neira (estudiante) y que es totalmente adecuado en alcance y calidad como requisito para el título como Ingeniero en Energía.

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bucaramanga, Santander, 9 de agosto de 2019

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por todas oportunidades que me ha dado, por guiarme, protegerme y ayudarme en cada momento y pasos de mi vida. Gracias a él, es que en este momento alcanzo unas de las metas importantes en mi vida.

Gracias a mi madre Gladys Neira Tarazona por apoyarme y estar ahí incondicionalmente, por enseñarme a nunca desfallecer y tener la frente en alto sin importar las circunstancias adversas. También quiero agradecerle a mi abuela Esther Tarazona por haber dedicado gran parte de su vida en guiarme durante mi formación personal. A ellas muchas gracias por enseñarme a esforzarme para cumplir mis metas y lograr mi proyecto de vida.

Gracias a toda mi familia, especialmente a mis tías Elizabeth Neira Tarazona y Luz Stella Neira Tarazona, ya que gracias a su amor y sabiduría he podido tomar buenas decisiones en mi vida. Y a todos mis tíos, primos por su apoyo, cariño y palabras de ánimo.

A mi amiga y codirectora MSc. Jessica Gissella Maradey Lázaro por haber confiado en mí para la elaboración de este proyecto, por haber dedicado parte de su tiempo y tener la paciencia suficiente durante la ejecución de este, por su acompañamiento y consejo tanto en lo profesional como personal, logrando así formar un gran equipo de trabajo.

A mi director el Doctor Leonardo Esteban Pacheco Sandoval, por haber puesto su entera confianza en mí desempeño, para sacar adelante este trabajo y defenderlo hasta las últimas consecuencias, a él muchísimas gracias.

Al doctor José Ignacio Huertas Cardozo por su colaboración, apoyo y guía durante mi estancia en el Grupo de Investigación de Energía y Cambio Climático del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), así como también, a los MSc. Antonio Eduardo Mogro y Luis Felipe Quirama por su gran contribución en el desarrollo de este proyecto.

Y, por último, a una persona muy especial que me ha acompañado durante mi formación profesional, la señorita Karen Julieth Santos Rojas, gracias por confiar en mí, por su amor, sus palabras de aliento y mi motivación para salir a delante y luchar por mis sueños.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

RESUMEN 10
NOMENCLATURA 12
INTRODUCCIÓN 14
1 MARCO REFERENCIAL 16
1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA Y EL SECTOR TRANSPORTE 16
1.2 PRUEBAS DE HOMOLOGACIÓN 20
1.2.1 Diferencias entre el consumo de combustible real y el reportado por los fabricantes 22
1.3 CICLOS DE CONDUCCIÓN 25
1.3.1 Metodologías para la construcción de DC 29
1.4 ESTRATEGIAS DE CONDUCCIÓN EFICIENTE 34
1.4.1 Antes de iniciar el recorrido 35
1.4.2 Inicio de la marcha 37
1.4.3 Durante la marcha 37
1.4.4 Otras circunstancias del tráfico 39
2 OBJETIVOS 41
3 METODOLOGÍA 42
3.1 REGIÓN DE ESTUDIO 42
3.1.1 Localización y área 42
3.1.2 Población 43
3.1.3 Movilidad 44
3.1.4 Vehículos 47
3.2 INSTRUMENTACIÓN 48
3.3 TOMA DE DATOS 49
3.4 ANÁLISIS DE DATOS 51
3.4.1 Ciclo de conducción representativo 57
3.4.2 Estrategias de conducción eficiente 60
4 DESARROLLO 61
4.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES 61

4.2 DESCRIPCIÓN EL PATRÓN DE MANEJO 62
4.2.1 Ciclo de conducción representativo de Bucaramanga 65
4.2.2 Consumo de combustible 68
4.3 ESTRATEGIAS DE CONDUCCIÓN EFICIENTE 69
5 CONCLUSIONES 73
6 RECOMENDACIONES 74
BIBLIOGRAFÍA 75
ANEXOS 82
ANEXO A 82
ANEXO B 100

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Parámetros que representan los ciclos estándares desarrollados en el mundo. 28
Tabla 2. Métodos y parámetros característicos utilizados por los diferentes ciclos de conducción desarrollados en el mundo 30
Tabla 3. Cambios de marcha para aceleraciones en lugares de poca altitud (< 1.215 m)..... 38
Tabla 4. Saltos de marcha para diferentes velocidades de diseño de vías 38
Tabla 5. Área y altura sobre el nivel del mar del Área Metropolitana de Bucaramanga 43
Tabla 6. Jerarquización y caracterustucas de la malla vial de Bucaramanga..... 47
Tabla 7. Especificaciones técnicas del escáner ELM327..... 49
Tabla 8. Cálculo de los parámetros característicos en cada viaje 53
Tabla 9. Parámetros característicos (CPs) y variables de consumo de combustible para la validación del método (MTFBM) en la construcción de ciclos de conducción (DC) 59
Tabla 10. Parámetros característicos (CPs) que describen los patrones de manejo seguidos por los conductores, mientras el consumo de combustible del vehículo era monitoreado. 63
Tabla 11. CPs que describen los patrones de conducción y el consumo específico de combustible descrito en la ciudad. Las diferencias relativas promedio (en porcentaje) observadas entre los CPs después de 1000 iteraciones. 67
Tabla 12. Estrategias organizacionales y operacionales 70
Tabla 13. Tiempo de duración de la operación en ralentí de diferentes ciclos de conducción 71
Tabla 14. Materialización del ahorro potencial para los vehículos monitoreados 72

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Estructura de análisis establecida para el proyecto..... 16
Figura 2. Gases de efecto invernadero (GEI) antropogénico global..... 17
Figura 3. Distribución de Consumo de Energía Final - Colombia 2015..... 18
Figura 4. Consumo de energía en transporte de carretera por segmento (2015)..... 19
Figura 5. Infraestructura utilizada para la medición de emisiones másicas de contaminantes y consumo de combustible en vehículos livianos 21
Figura 6. Programas de reducción de emisiones vehiculares y consumo de combustible... 21
Figura 7. Diferencias relativas de los valores informados por los fabricantes con respecto al consumo de combustible o las emisiones reales de CO2 en función del año-modelo del vehículo 24
Figura 8. Factores que influyen en la diferencia entre el consumo de combustible y las emisiones reales respecto a los valores reportados por el fabricante 25
Figura 9. Clasificación de los ciclos de conducción 26
Figura 10. Ciclos de conducción estándares utilizados en el mundo: a) NEDC, b) WLTC, c) FTP-75 y d) JP 10-15 28
Figura 11. Procesos para generar ciclos de conducción representativos utilizando a) MT, b) MCMC, c) TBM y d) FBM..... 33
Figura 12. Pérdidas de energía desde el combustible hasta las ruedas 35
Figura 13. Efecto de las configuraciones de baca sobre el aumento del consumo de combustible (a 120 km/h)..... 37
Figura 14. Consumo de combustible para diferente cilindrada según la marcha a 60 km/h.39
Figura 15. Ubicación geográfica de Bucaramanga dentro de Colombia 43
Figura 16. Población urbana de Bucaramanga frente al AMB (1985-2030) 44
Figura 17. Evolución de los viajes motorizados (2005-2025) 45
Figura 18. Vehículo monitoreado 47

Figura 19. Verificación de la medición de consumo de combustibles con el sistema OBD versus el consumo con un tanque calibrado 48
Figura 20. Funcionamiento del puerto de diagnóstico a bordo (OBD) 49
Figura 21. Características de los viajes monitoreados 51
Figura 22. Algoritmo del método Micro-trips Fuel Based Method 52
Figura 23. Clusterización de los Micro-trips a partir del análisis de conglomerados en software Minitab 18 56
Figura 24. Valores de ARD e intervalos de confianza para algunos CPs con diferente número de iteraciones. CPs relacionados con: a) velocidad y b) modos de operación, cuando se aplica el método MTFBM 59
Figura 25. Ilustración de los perfiles de a) velocidad en función del tiempo, b) consumo de combustible. c) revoluciones del motor y d) velocidad, en función de la distancia, obtenido de un viaje aleatorio en la región de estudio. 62
Figura 26. Descripción del patrón de manejo seguido por los conductores de los vehículos monitoreados, expresado como el porcentaje de tiempo que el vehículo fue conducido en un conjunto de rangos a) velocidad, b) aceleración y c) velocidad y aceleración de los vehículos 64
Figura 27. Diferencia relativa (RDi) de los parámetros características (CPs) más comúnmente usados para describir los ciclos de conducción (DC) como una función del número de viajes muestreados para: a) velocidades, b) aceleración, c) modos de operación y d) dinámicas y consumo de combustible especifico 66
Figura 28. Ciclo de conducción para la ciudad de Bucaramanga a partir de la tecnología vehicular muestreada 66
Figura 29. Diagrama de caja y bigotes de las diferencias relativas (RDi) de los CPs que describen los DCs obtenidos por el método propuesto (MTFBM) después de 1000 iteraciones 68
Figura 30. Resultados de consumo de combustibles instantáneo y su distribución de frecuencia para a) Total de los viajes monitoreados, b) Ciclo de conducción de Bucaramanga y el consumo específico de combustible de c) Total de viajes monitoreados, d) Ciclo de conducción de Bucaramanga. 69

RESUMEN

En la actualidad existe un gran interés en reducir el consumo de combustible y por ende las emisiones vehiculares. Como parte de las estrategias adoptadas por diferentes países, es el establecimiento de límites de emisiones cada vez más estrictos. Por lo que los fabricantes de vehículos deben realizar pruebas de homologación que certifiquen las nuevas tecnologías que entraran al mercado. Pero las grandes diferencias entre los valores reportados en las pruebas de homologación (FC_{TA}) y bajo condiciones reales de operación (FC_{real}) de los vehículos pueden llegar a ser superiores al 60%. Dentro de los factores que tienen mayor incidencia en esta discrepancia, es el uso de ciclos de conducción (DCs) que no representan el patrón de conducción de local de las diferentes regiones del mundo.

En este trabajo se planteó monitorear el consumo de combustible y los patrones de manejo de una tecnología vehicular en condiciones reales de operación en Bucaramanga, Santander. Para esto, se realizaron mediciones en condiciones reales de operación de 2 vehículos de una entidad pública, utilizados para monitorear las vías de la ciudad en busca de infractores. Se reportaron los patrones de manejo en función de los parámetros características (CPs) y el consumo específico de combustible (SFC) de 0,220 ± 0,0828 L/km para las diferentes condiciones que se presentan en la región de estudio.

En busca de la reducción de las diferencias presentadas entre los valores FC_{TA} y FC_{real}, se propuso un método para construir DCs locales, al combinar las dos corrientes metodológicas (Estocástica y Determinística) utilizadas en el mundo. Se obtuvo que el método Micro-trips Fuel Based Method (MTFBM) logra representar considerablemente el patrón de conducción y el consumo de combustible de la región analizada. Tomando en cuenta que, para evaluar la representatividad del ciclo obtenido, se utilizan un grupo de parámetros característicos que definen el patrón de manejo y describe un ciclo de conducción, se obtuvo que el método propuesto exhibió un 82,5% de los CPs con diferencias relativas por debajo del 20% con respecto a los patrones de manejo de los viajes monitoreados. Además, se estimó la incorporación de estrategias de conducción eficiente que permitan obtener una reducción del 26,46% para los vehículos analizados.

En conclusión, es muy importante reducir las diferencias presentadas, debido al impacto que tienen a nivel gubernamental, ambiental y económico.

Palabras clave: Ciclo de conducción, Consumo de combustible, OBD, Vehículos livianos

ABSTRACT

At present, there is a great interest in reducing fuel consumption and therefore vehicle emissions. As part of the strategies adopted by different countries, it is the establishment of increasingly strict emission limits. Therefore, vehicle manufacturers must carry out homologation tests that certify the new technologies that will enter the market. But the big differences between the values reported in the homologation tests (FC_{TA}) and under real operating conditions (FC_{real}) of the vehicles can be over 60%. Among the factors that have a greater incidence in this discrepancy, is the use of driving cycles (DCs) that do not represent the local driving pattern of the different regions of the world.

In this work, it was proposed to monitor the fuel consumption and management patterns of a vehicle technology in real operating conditions in Bucaramanga, Santander. For this, measurements were made in real operating conditions of two vehicles of a public entity, used to monitor the city roads for violators. The management patterns were reported based on the characteristic parameters (CPs) and the specific fuel consumption (SFC) of 0.220 ± 0.0828 L/km for the different conditions that occur in the study region.

In search of the reduction of the differences presented between the FCTA and FCreal values, a method was proposed to build local DCs, by combining the two methodological currents (Stochastic and Deterministic) used in the world. It was obtained that the Micro-Trips Fuel Based Method (MTFBM) method considerably represents the driving pattern and the fuel consumption of the analyzed region. Taking into account that, to evaluate the representativeness of the obtained cycle, a group of characteristic parameters that define the driving pattern and describe a driving cycle are used, it was obtained that the proposed method exhibited 82.5% of the CPs with differences relative below 20% with respect to the management patterns of the monitored trips. In addition, the incorporation of efficient driving strategies that allow a reduction of 26.46% for the vehicles analyzed was estimated.

In conclusion, it is very important to reduce the differences presented, due to the impact they have at the governmental, environmental and economic level.

Keywords: Driving cycle, Fuel consumption, OBD, Light vehicles

NOMENCLATURA

Siglas	Nombre en inglés	Nombre en español	Unidad
AMB	Bucaramanga Metropolitan Area	Área Metropolitana de Bucaramanga	-
ARD_i	Average relative difference	Diferencia relativa promedio	-
CDC	Candidate driving cycle	Ciclo de conducción candidato	-
CH_4	Methane	Metano	-
CO_2	Carbon dioxide	Dióxido de carbono	-
CP's	Characteristic parameters	Parámetros característicos	-
CP_i^*	Characteristic parameters of the driving cycle	Parámetros característicos del ciclo de conducción	-
$\overline{CP_i}$	Characteristic parameters of the global sample	Parámetros característicos de la muestra global	-
DANE	National Administrative Department of Statistics	Departamento Administrativo Nacional de Estadística	-
DC's	Driving cycles	Ciclos de conducción	-
ECU	Engine Control Unit	Unidad de control del motor	-
EEA	European Environment Agency	Agencia Europea de Ambiente	-
FBM	Fuel Based Method	Método basado en combustible	-
FC_{real}	Fuel consumption in the real world	Consumo de combustible en el mundo real	-
FC_{TA}	Fuel consumption reported under laboratory conditions	Consumo de combustible reportado bajo condiciones de laboratorio	-
FTP-75	Federal Test Procedure 75	Procedimiento de prueba federal 75	-
GEI	Greenhouse gases	Gases de efecto invernadero	-
ICCT	International Council on Clean Transportation	Consejo Internacional de Transporte Limpio	-
IQR	Interquartile range	Rango intercuartíl	-
JP 10-15	Japanese 10-15 Mode	Modo japonés 10-15	-

KI	Kinetic Intensity	Intensidad cinética	m^{-1}
MCMC	Markov Chains Monte Carlo	Cadenas de Markov Monte Carlo	-
m.s.n.m		Metros sobre el nivel del mar	m
MT	Micro-trips	Micro segmentos	-
MTFBM	Micro-trip fuel-based method	Método basado en micro viajes y consumo de combustible	-
NEDC	New European Driving Cycle	Nuevo ciclo de conducción europeo	-
N_2O	Nitrogen oxides	Óxido nitroso	-
OBD	On Board Diagnostics	Diagnostico a bordo	-
PEMS	Portable Emissions Measurement Systems	Sistemas portátiles de medición de emisiones	-
PKE	Positive kinetic energy	Energía cinética positiva	m/s^2
PPM	Parts per million	Partes por millón	-
PVs	Performance Values	Valores de rendimiento	-
RD_i	Relative difference	Diferencia relativa	-
RDC	Representative Driving Cycle	Ciclos de conducción representativos	-
RPM	Revolutions per minute	Revoluciones por minuto	
SAFD	Speed-Acceleration Frequency Distribution	Distribución de frecuencia de aceleración-velocidad	-
SFC	Specific Fuel Consumption	Consumo especifico de combustible	L/km
TC	Collective transport	Transporte colectivo	-
TI	Individual transport	Transporte individual	-
TBM	Trip Based Method	Método basado en viaje	-
VSP	Vehicle specific power	Potencia específica del vehículo	kW/t
WHO	World Health Organization	Organización mundial de la salud	-
WLTC	Worldwide Light-duty Test Cycle	Ciclo de prueba mundial de trabajo liviano	-

INTRODUCCIÓN

El incremento del calentamiento global y sus efectos nocivos (a causa de la generación excesiva de gases de efecto invernadero) han estimulado la concientización de los diferentes sectores económicos, en especial el sector transporte, ya que contribuye con el 24,8% (~8 Gt) de emisiones de CO2 por combustión de combustibles en el mundo, después del sector de generación de electricidad y calor [1]. Este comportamiento tiene un impacto negativo en el 97% de las ciudades en países de bajos y medios ingresos con más de 100.000 habitantes en donde no se cumplan con los criterios mínimos establecidos de contaminantes en la atmosfera, según la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization – WHO) [2].

La movilidad y el transporte son necesidades humanas esenciales asociadas con el crecimiento demográfico y el progreso de economías emergentes, que, sumado a su fuerte dependencia del petróleo, representa un mayor desafío; por esas razones se ha promovido la búsqueda de fuentes de energía alternativa (por ejemplo, biocombustibles y gasolinas de mayor octanaje), así como, el desarrollo de automóviles más eficientes con un bajo consumo de combustible y nivel de emisiones [3]. De acuerdo con estos dos últimos parámetros se han establecido los procesos de homologación vehicular, mediante los cuales los fabricantes evalúan sus productos al someterlos a pruebas estandarizadas para reportar y verificar la cantidad de emisiones y rendimiento de combustible [4]. Sin embargo, existen múltiples factores que inciden en la representación de las condiciones del mundo real, en donde el perfil sintetizado de las condiciones de manejo (DCs), llega a provocar más del 60% de las discrepancias identificadas.

La inversión en nuevos combustibles y tecnologías vehiculares suele ser elevada y a largo plazo, a pesar de no conseguir una mejora representativa, ya que, se estima que las mejoras potenciales en la reducción de consumo de combustible de motores y vehículos tienen efectos limitados de 4 – 10% y de 2 – 8%, respectivamente [5]. Sin embargo, para lograr cuantificar efectivamente los beneficios obtenidos, se debe solucionar primero los problemas asociados con la representación de las condiciones reales de operación que perciben los usuarios respecto a los valores reportados por lo fabricantes en pruebas normalizadas. Además, se debe considerar un factor importante que puede pasar desapercibido y permite mejorar el rendimiento del combustible del vehículo hasta un 45%, al mismo tiempo que es relativamente económica e inmediata, y es la conducción eficiente [6]. Este tipo de conducción ha sido adoptado e investigada en todo el mundo en la última década y se basa en la toma de decisiones por parte del conductor que van desde la selección de un vehículo hasta las decisiones posteriores a su compra, sin embargo, aún se necesitan grandes esfuerzos para lograr convertir la conducción eficiente en una práctica de conducción real con efectos duraderos [7].

En este contexto, el objeto de este proyecto es analizar el potencial de reducción el consumo de combustible y las emisiones de CO2 mediante el análisis de un ciclo de conducción representativo de las condiciones reales de manejo. Para el desarrollo de este estudio fue necesario: i) seleccionar una región de estudio (Bucaramanga, Santander), en donde se monitorearon dos vehículos pertenecientes a una entidad pública, los cuales tienen como objetivo movilizarse por toda la ciudad, permitiendo recopilar información bajo condiciones reales de manejo, ii) obtener la información necesaria mediante instrumentos de adquisición de datos de los parámetros de conducción de los vehículos, iii) realizar análisis delos datos adquiridos, para identificar el patrón de conducción de los vehículos y establecer criterios de valuación del ciclo de conducción obtenido, iv) para finalmente analizar el potencial de reducción del consumo de combustible.

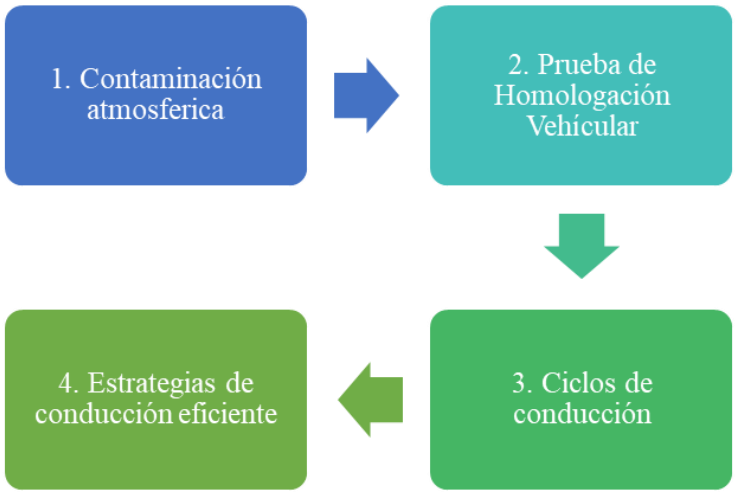
Este trabajo es presentado en 4 capítulos. En el capítulo 1 se revisan y plantean los aspectos importantes dentro del marco referencial como: panorama global, definiciones, tipos y metodologías para el desarrollo y construcción de ciclos de conducción, así como la contextualización de la conducción eficiente. En el capítulo 2 se presentan los objetivos planteados en la propuesta de investigación. En el capítulo 3, se presenta el procedimiento utilizado para la obtención del ciclo de conducción para los vehículos monitoreados, mediante la revisión del estado del arte realizado en el Capítulo 1 y en base a las respectivas fuentes bibliográficas se establecieron una serie de pasos para la ejecución del proyecto. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de la ejecución de la metodología descrita en el capítulo 3, para determinar el ciclo de conducción, así como el establecimiento del consumo de combustible y el ahorro potencial de la estrategia planteada.

De acuerdo con esto, este proyecto tiene como fin, contribuir al mejoramiento de la representatividad de los ciclos de conducción obtenidos bajo condiciones reales de manejo, para que a partir de esto se pueda obtener una caracterización mecánica y energética sintetizada de los vehículos.

1 MARCO REFERENCIAL

La revisión del marco referencial que se presenta a continuación se desarrolló en base a la estructura de la *Figura 1*.

Figura 1. Estructura de análisis establecida para el proyecto



Fuente. Elaboración propia

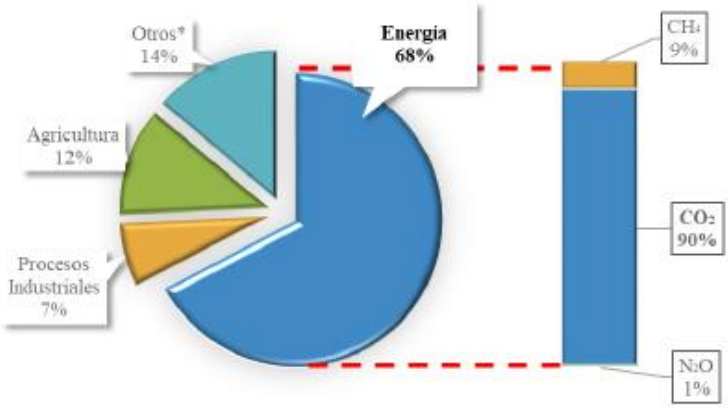
1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA Y EL SECTOR TRANSPORTE

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization – WHO), la contaminación del aire afecta a todas las regiones del mundo. Sin embargo, en la última actualización de la base de datos realizada se encontró que el 97% de las ciudades en países de bajos y medianos ingresos con más de 100.000 habitantes no cumplen con los criterios mínimos establecidos [2].

Según estudios realizados a nivel mundial, con el paso de los años, la concentración de diferentes contaminantes como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) ha aumentado considerablemente en la atmosfera en comparación con el nivel de la era preindustrial en aproximadamente 280 partes por millón (ppm) [8]. El incremento de estos contaminantes corrobora la influencia directa que tienen los humanos en el calentamiento global y por ende en la contaminación atmosférica. En base a esto, de los diferentes sectores económicos que producen gases de efecto invernadero, el sector de la energía, representa por creces la mayor fuente de emisión, en la cual se incorporan actividades de quema de combustibles fósiles y de biomasa en hornos, calderas, motores o cualquier otro aparato diseñado para producir calor o trabajo mecánico requeridos en

diferentes procesos industriales como la generación de energía, manufactura y construcción, además del transporte. En comparación con los sectores de la agricultura y procesos industriales no relacionados con energía, que contribuyen con menos del 20%, como podemos ver en la *Figura 2*. En donde el principal componente emitido por el sector energético es el CO_2 resultante de la oxidación en los combustibles durante la combustión; esto promovido por el aumento de la demanda de energía, provocada por el crecimiento y desarrollo económico mundial.

Figura 2. Gases de efecto invernadero (GEI) antropogénico global



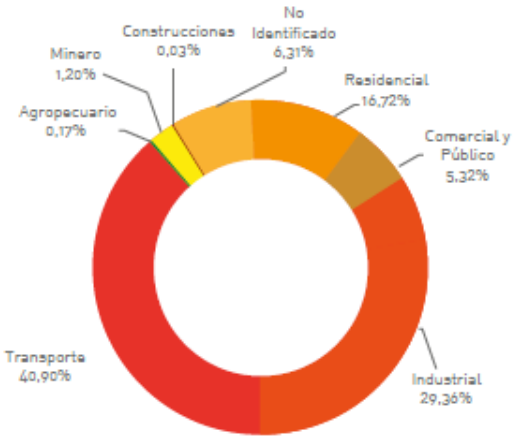
Fuente. Adaptada de la referencia [8]

El Acuerdo de París en 2015, extendió las obligaciones de mitigación a todos los países desarrollados como en vía de desarrollo con el fin de exigir acción internacional para reducir las emisiones de GEI [9]. Dentro de los sectores de la energía, el transporte es un importante contribuyente a las emisiones de GEI, siendo responsable de alrededor de una cuarta parte (~8 Gt) de las emisiones de CO_2 por combustión de combustibles en el mundo [1]. Esto quiere decir que el transporte y la movilidad son necesidades humanas esenciales, que se traducen en una mayor demanda de recursos energéticos y un alto impacto ambiental debido a su fuerte dependencia del petróleo [4, 10]. Por lo tanto, el proceso para lograr separar estos vínculos directos, será lento y difícil, además de implicar la participación de diferentes agentes como la industria, el gobierno y los consumidores, para tomar medidas que permitan cambiar la demanda del transporte a modos más eficientes, además, jugar un papel importante en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para el cumplimiento de las metas propuestas para el año 2050 [10].

En el contexto colombiano, según el Ministerio de Minas y Energía [11], las condiciones geográfica y demográfica del país han impuesto un requerimiento substancial al transporte, convirtiéndolo en el sector de mayor consumo de energía (498.909 TJ - 40,9%) y por lo tanto el de mayor aporte a las emisiones de CO2 y otros contaminantes, seguido por el sector industrial y residencial, como se muestra en la Figura 3. Este sector está integrado por 5 divisiones: aéreo, marítimo, fluvial, ferroviario y carretera, siendo este último el de mayor

gasto energético (434.459 TJ – 88%), de ahí que sea el mayor generador de emisiones de CO_2 (32.6%) [12]. Actualmente, solo existen normativas que controlan los límites permisibles de emisiones (Resolución 910 de 2008), pero no monitorean ni controlan la eficiencia energética en los vehículos, por lo tanto, la conducción por carretera es un área clave para trabajar en la atenuación del cambio climático.

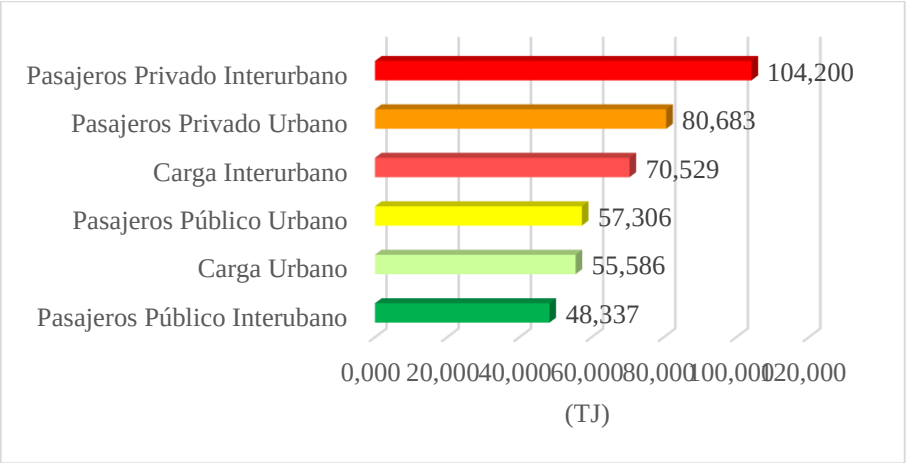
Figura 3. Distribución de Consumo de Energía Final - Colombia 2015



Fuente. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022 [11]

Dentro del sector transporte, la movilización privada de pasajeros en Colombia ha tomado mucha importancia, ya que ha superado la demanda de energía de los vehículos de carga y transporte público, como se muestra en la *Figura 4*. Este hecho demuestra la necesidad de una acción más sólida en la adopción conjunta de políticas de economía de combustible e incentivos fiscales que conlleven a mejoras efectivas en el ahorro de combustible [13], ya que son cruciales a medida que los precios del combustible bajan, aumenta la necesidad de movilizarse y la tendencia de los conductores se desplaza hacia vehiculas más grandes [14]. Por lo tanto, es necesario abordar con urgencia esta problemática energética, ambiental y económica, que pretende triplicarse en los próximos 30 años[15].

Figura 4. Consumo de energía en transporte de carretera por segmento (2015)



Fuente. Adaptado de la referencia [11]

Cuando se piensa en consumo de combustible, se está hablando de emisiones de CO2, es decir, existe una relación directa, mientras más consumo de combustible tenga el vehículo más contamina. En términos más complejos, hace referencia al contenido de carbono en el combustible, el cual por conservación de masa antes y después del momento de su combustión, debe generar la misma cantidad de carbono, por lo cual, priorizar las mejoras en el rendimiento del combustible sobre otras características del vehículo (tamaño, peso, etc.) ha generado que se establezcan objetivos e indicadores que permitan medir y evaluar la efectividad de las acciones implementadas [13]. En este contexto, la intensidad energética del transporte de pasajeros hace referencia a la cantidad de energía utilizada para trasladar una persona un kilómetro de distancia. Este nivel de intensidad varía según el país que se analice, así como también del medio utilizado (aire, agua, tierra), los tipos de vehículos (automóviles, buses, aviones, etc.) y la ocupación promedio (pasajeros por vehículo), siendo este último un factor crucial debido a la disminución en múltiples países ya que las personas conducen cada vez más solos con el paso del tiempo [16], ocasionando un aumento en la demanda de energía del 8% entre los años 2000-2016 [14].

Por lo tanto, a nivel mundial, las mejoras desarrolladas en la eficiencia de los vehículos después de la introducción de políticas y estándares de emisión de CO_2, destacan su efectividad en la mitigación del cambio climático, ya que contribuyen a la reducción de emisiones del transporte por carretera, reduciendo así proporcionalmente el consumo de combustible, que a su vez se traduce en reducción de costos para los usuarios [3]. No obstante, a pesar del progreso aparente en la eficiencia de los vehículos, solo es hasta que las cifras oficiales representen las condiciones del mundo real que se pueden materializar realmente estos beneficios, pero lograr definir la conducción en el mundo real de forma técnica es muy difícil de alcanzar, debido al inmenso espectro de estilos y condiciones de conducción.

1.2 PRUEBAS DE HOMOLOGACIÓN

El análisis y comparación de la economía de combustible y emisiones de los diferentes vehículos en el mundo de forma objetiva y consistente, requiere de un enfoque metódico. Es por esto por lo que, la evaluación oficial de estas variables se realiza en un laboratorio de "Homologación" bajo condiciones controladas, en donde se someten diferentes ciclos de conducción y se miden varios parámetros que permiten establecer estándares de economía de combustible, etiquetas energéticas y programas de incentivos [17, 18]. Además, es una forma eficaz de obtener información relevante del desempeño del vehículo, lo que hace que el consumidor tenga herramientas de decisión en el proceso de compra de un vehículo [18, 19]. El procedimiento estándar de laboratorio se representa en la *Figura 5*. y consta de los siguientes pasos [18]:

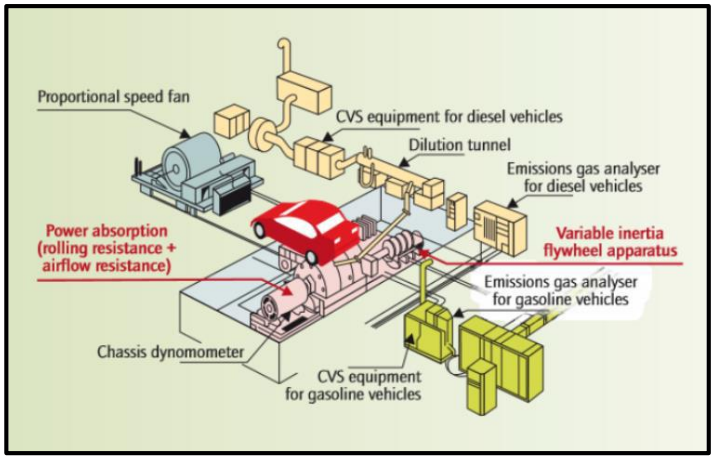
(i) Las ruedas motrices del vehículo se ponen en un dinamómetro de rodillos para simular las condiciones de conducción. La energía necesaria para mover el banco de rodillos se ajusta para tener en cuenta la resistencia al viento y el peso del vehículo.

(ii) Un conductor capacitado o un mecanismo programado conduce el vehículo a través de cambios de marcha que representen los patrones de conducción en un viaje de una ciudad, región o carretera (Ciclo de conducción).

(iii) Cada ciclo de conducción precisa la velocidad que debe llevar el vehículo en cada instante de la prueba de homologación.

(iv) Para los vehículos a base de combustibles fósiles (gasolina, diésel, etc.), se acopla una manguera a la salida del tubo de escape para captar los gases emitidos durante toda la prueba. La cantidad de carbono presente en la muestra permite evaluar la cantidad de combustible utilizado. Sin embargo, este proceso no es recomendado para vehículos a base de combustibles no fósiles (eléctricos, celdas de combustible, etc.).

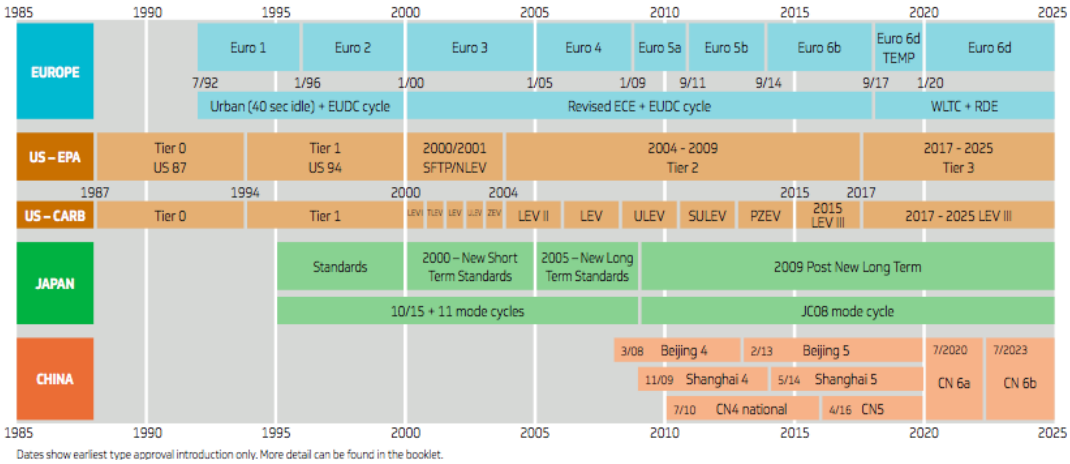
Figura 5. Infraestructura utilizada para la medición de emisiones másicas de contaminantes y consumo de combustible en vehículos livianos



Fuente. Technology Roadmap – Fuel Economy of Road Vehicles

La combinación de medidas y políticas (*Figura 6*) han permitido que en los últimos 25 años se haya logrado reducir las emisiones de muchos de los contaminantes que produce el transporte por carretera, sin embargo, estas reducciones no han sido significativas como se estimaron, ya que los aumentos en la demanda de pasajeros y carga, así como el bajo rendimiento de ciertos estándares de vehículos han sido mayor al que se planeó originalmente. Además, el procedimiento con el que se evaluaron no permite obtener una representación completa de las condiciones reales de conducción de una región, debido a una serie de factores que afectan la economía de combustible (condiciones de tráfico, ambientales, superficie de la carretera, etc.)

Figura 6. Programas de reducción de emisiones vehiculares y consumo de combustible



Fuente. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016

Un claro ejemplo de las limitaciones en la prueba de homologación son los ciclos de conducción a los que el vehículo es sometido, como es el caso del NEDC (New European Driving Cycle), en donde se sigue un perfil de velocidad y carga del motor constante como se puede ver en la *Figura 10.a*, donde se evidencia la subestimación las condiciones de manejo del mundo real. Este problema ha llevado al desarrollo de nuevos ciclos de conducción que se acerquen cada vez más a las condiciones reales de operación, así como a la incorporación de nuevos sistemas de medición (Portable Emissions Measurement Systems – PEMS) que permitan obtener información directamente de los vehículos en su operación normal y no bajo condiciones controladas para obtener una mejor caracterización de las emisiones bajo condiciones de condiciones reales.

A continuación, se presentan en detalle los factores que aumentan la discrepancia entre los valores del consumo de combustible reportados por los fabricantes y las condiciones del mundo real.

1.2.1 Diferencias entre el consumo de combustible real y el reportado por los fabricantes

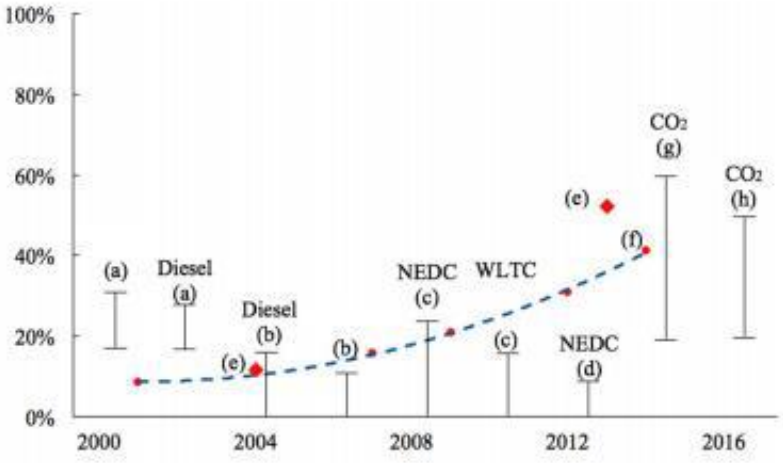
Una de las estrategias implementadas por las autoridades ambientales para disminuir las emisiones en el sector transporte es impulsar a los fabricantes de vehículos a mejorar la tecnología de sus vehículos al imponer nuevos y más restrictivos límites de emisión. Es por esto por lo que los fabricantes deben realizar pruebas de homologación bajo condiciones controladas de operación, sin embargo, los investigadores han descubierto que las emisiones reales de los vehículos en uso son diferentes a los valores reportados por los fabricantes. Según leyes de las grandes naciones (Europa, Norte América, China), antes de ser vendidos, los vehículos deben ser probados para verificar que cumplen con los estándares ambientales, climáticos y de seguridad requerido; como no es practico probar cada vehículo en producción, se selecciona uno considerado como el más representativo (tipo), y si se cumple con los estándares o normas, se emite la certificación respectiva (aprobación de tipo). Por lo tanto, esto a ocasionada que los fabricantes aprovechen al máximo cualquier redundancia en los procedimientos de las pruebas, además de otros factores.

De acuerdo con un estudio realizado por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (International Council on Clean Transportation – ICCT) a partir de una muestra de 1.1 millones de vehículos provenientes de 8 países y fuentes europeas (revistas, asociaciones automovilísticas, servicios en línea, tarjetas de combustible, entre otras), se estableció que la divergencia entre el consumo de combustible en el mundo real (FC_{real}) y el reportado bajo condiciones de laboratorio (FC_{TA}) sufrió un aumento considerable, pasando de alrededor del 9% en 2001 al 42% en 2016 [3]. Este incremento ha sido reportado por diferentes autores. En donde se analizaron datos de consumo de consumo de combustible de 200.000 vehículos registrados en Travelcard (Países Bajos) y sé encontró que la brecha entre el FC_{real} y FC_{TA} sufrió un incremento, pasando del 10% en 2004 al 50% en 2013 [20]. Por otra parte, la

Agencia Europea de Ambiente (EEA, por sus siglas en ingles), ratifico que la discrepancia entre el consumo de combustible bajo condiciones reales de operación y el reportado en condiciones de laboratorio se encuentra entre un 17-31% para vehículos a gasolina y un 17-28% para vehículos diésel [9]. Se ha analizado el consumo de combustible de 924 vehículos, distribuidos en 611 a gasolina y 313 diésel [21], los análisis indicaron un aumento en la discrepancia entre los valores reales y los reportados en las pruebas de homologación en un 11% para los vehículos de gasolina y un 16% en los vehículos diésel [21].

Los vehículos híbridos por su parte también son responsables de la creciente brecha, ya que los valores reportados se basan en una gran cantidad de conducción eléctrica, que no se representa en la práctica, ocasionando que la variación entre estos dos valores se encuentre por encima del 100% [20]. En una muestra de 16 vehículos con diferentes tecnologías de propulsión (motores de encendido por chispa y compresión e híbridos completo y paralelo) bajo condiciones dinámicas de operación fueron analizados, los resultados arrojaron que el consumo de combustible obtenido a partir de los datos en carretera, son un 23,9% y un 16,3% más grandes que los valores reportados por los ciclos de conducción NEDC y WLTP clase 3, respectivamente [22]. En un trabajo similar, se analizaron 60 vehículos con diferentes combustibles, distribuidos de la siguiente forma: 47 gasolina, 16 diésel y 3 de gas licuado del petróleo, se utilizó un medidor de emisiones portátil (PEMS) para analizar las rutas en 3 ciudades chinas (Guangzhou, Beijín y Macao) [23]. Los resultados de este trabajo indican que el consumo de combustible en carretera es un 10% más alto para todos los vehículos en comparación con el valor obtenido con el ciclo normalizado NEDC. Por otra parte, el estudio el comportamiento de 52 vehículos de diferentes marcas (Peugeot, Citroën, Renault, Nissan, entre otras) bajo condiciones reales de operación frente a pruebas de homologación. Se encontró que, durante las pruebas realizadas, el 75% de los vehículos analizados tienen un consumo de combustible entre 20-50% más alto que el declarado por los fabricantes [24]. La *Figura 7* representa los resultados de estas investigaciones.

Figura 7. Diferencias relativas de los valores informados por los fabricantes con respecto al consumo de combustible o las emisiones reales de CO2 en función del año-modelo del vehículo



Fuente. Adaptado a partir de la referencia [25]

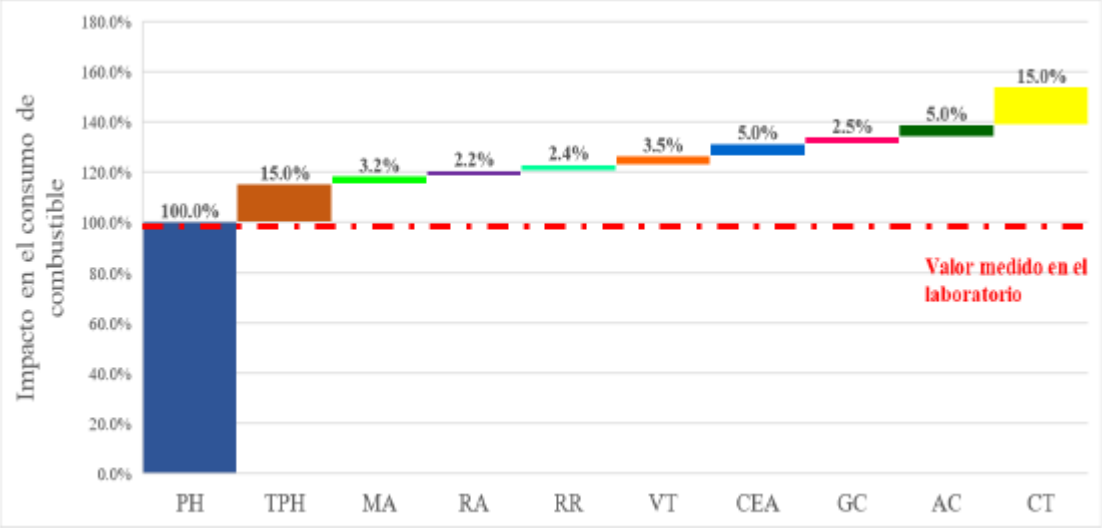
En este orden de ideas, se puede observar una gran variedad de discrepancias entre los valores reportados en las pruebas de homologación y los obtenidos bajo condiciones reales de operación, algunos motivos de estas diferencias son, la baja dinámica de los ciclos de conducción utilizados en las pruebas, el efecto de la congestión, el uso de sistemas auxiliares, patrones de cambio de marcha, entre otros. En la referencia [26], se identificó que la explotación de las tolerancias en las pruebas bajo condiciones de laboratorio, son el principal motor del aumento en las discrepancias, y que estas varían según el segmento, fabricante y tipo de transmisión; por otra parte, en la referencia [27] se hizo un análisis para identificar las falencias en las regulaciones a partir de una revisión literaria e información suministrada por autoridades de asistencia técnica y laboratorios de homologación, en donde se determinó que la divergencia se debe principalmente a la incorporación de tecnologías de reducción de CO_2, una mayor utilización de flexibilidades en las pruebas y cambios en las características y tendencias del mercado vehicular. En la referencia [28] se estableció que los procedimientos utilizados para evaluar las emisiones y rendimiento energético de los vehículos no es representativos de la operación real, sin embargo, esto se debe a que hay factores del uso diario que no pueden ser incorporados ni definidos fácilmente dentro de las pruebas, como por ejemplo las condiciones ambientales, el tráfico y el comportamiento del conductor.

Debido a la naturaleza multicausal encontrada en los estudios presentados, diferentes investigadores decidieron agrupar estas causas en factores clave: i) flexibilidades en la determinación de los coeficientes de carga empleados en la caracterización de las fuerzas resistivas que debe vencer el vehículo, ii) optimizaciones en pruebas de dinamómetro de chasis que ocasionaron un déficit en la representación de las condiciones de manejo del

mundo, iii) desarrollos tecnológicos que tienen un impacto contradictorio en las pruebas de certificación en comparación con las condiciones normales de operación y iv) uso de sistemas auxiliares que consumen energía y que no son considerados durante la realización de las pruebas [3, 27, 29]. En la *Figura 8* se presentan los impactos que pueden llegar a tener estos factores en el aumento de la brecha.

En conclusión, para reducir la brecha y garantizar que las diferencias se encuentren dentro de un margen razonable, se deben centrar los esfuerzos en la mitigación de los factores latentes que la ocasionan, en especial aquellos que tienen un impacto superior al 10%, además, dado el avance en el desarrollo tecnológico, se debe disponer de un enfoque más dinámico que incluya datos del mundo real, ya sea para fines ambientales, políticos o informativos [28].

Figura 8. Factores que influyen en la diferencia entre el consumo de combustible y las emisiones reales respecto a los valores reportados por el fabricante



*PH: Pruebas de homologación, TPH: Tolerancias en la prueba de homologación, MA: Masa adicional, RA: Restricciones aerodinámicas, RR: Resistencia a la rodadura, VT: Variación de la temperatura, CEA: Consumo eléctrico adicional, GC: Gradiente de la carretera, AC: Acondicionamiento de aire, CT: Condiciones de tráfico.

Fuente. Elaboración propia adaptado de [28]

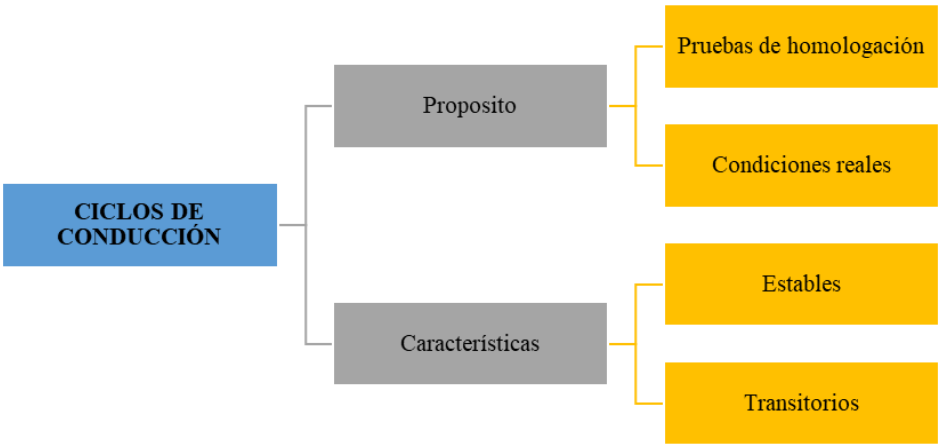
1.3 CICLOS DE CONDUCCIÓN

Los ciclos de conducción (Driving Cycle – DC), son series de velocidad en función del tiempo de un vehículo que representa los patrones de manejo de una región. Se utilizan principalmente para determinar el consumo de combustible y la emisión másica de contaminantes de las diferentes tecnologías vehiculares, para procesos comparativos y de

certificación [30-32], además, tienen la característica de representar las cargas impuestas por la carretera a los vehículos, lo que hace que sean una herramienta efectiva para evaluar el impacto ambiental del tráfico [33] en cualquier región del mundo; también sirven para establecer configuraciones del tren motriz y estrategias de control del motor para reducir el consumo de combustible [34]. Sin embargo, gran parte de los DC desarrollados en el mundo, no representan el patrón de conducción real de ninguna región conocida, ya que como vimos en la sección anterior existen múltiples factores que ocasionan que la representación de las condiciones del mundo real sea muy difícil. Por lo tanto, se generan grandes diferencias ya sea para el consumo de combustible como para las emisiones de contaminantes medidos (alrededor del 60%), cuando se sigue cualquiera de los ciclos de conducción de homologación y los valores de las mismas variables observados del uso normal del vehículo en una región de interés determinada [9].

Existes dos formas de clasificar los ciclos de conducción, de acuerdo a su propósito [35] y a la característica del perfil de velocidad [36], como se puede ver en la *Figura 9*.

Figura 9. Clasificación de los ciclos de conducción



Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con su propósito se pueden agrupar en:

- Los ciclos legislativos (Pruebas de homologación). Son de carácter gubernamental, por lo cual controlan las emisiones de contaminantes que provienen de los motores de combustión interna, a partir de los resultados de las pruebas bajo condiciones de laboratorio.

- Los ciclos no legislativos (Condiciones reales). Son aplicado para el análisis del consumo de combustible y las emisiones contaminantes del motor, bajo condiciones reales de operación.

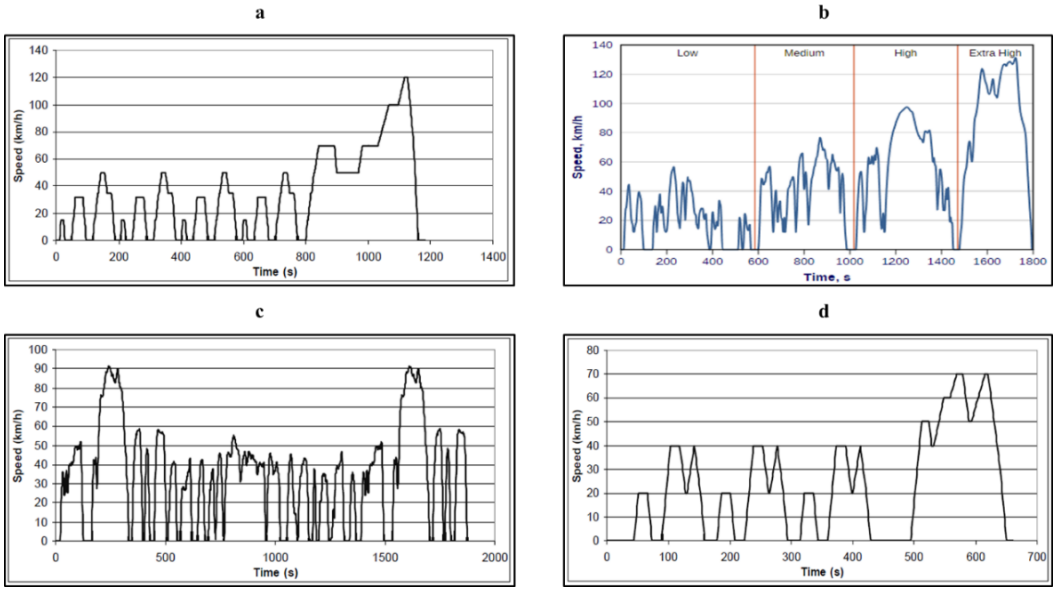
Por otra parte, de acuerdo con las características del perfil de velocidad en función del tiempo, se tienen:

- Modales (Estables). Son aquellos con periodos de tiempo prolongados en donde la velocidad es constante. Este tipo de ciclos tienen la característica de tener secuencias poligonales, es decir geometrías planas compuestas de segmentos rectos consecutivos, como el ciclo europeo NEDC (*Figura 10.a*) o el ciclo japonés (*Figura 10.d*).

- Transitorios. Son aquellos que muestran perfiles más complejos en donde la velocidad puede variar cada segundo; como el ciclo FTP-75 (*Figura 10.c*) o el WLTC (*Figura 10.b*).

En este orden de ideas, para mejorar el rendimiento energético y reducir las emisiones de los vehículos en el mundo, usualmente se realiza mediante ciclos de conducción estándar como el NEDC (New European Driving Cycle), el WLTC (Worldwide Light-duty Test Cycle), el FTP-75 (Federal Test Procedure 75) y el J10-15 [28, 30]. Los perfiles de velocidad de estos ciclos se presentan en la *Figura 10.a-d*, y sus parámetros respectivos en la *Tabla 1*. Sin embargo, este tipo de ciclos son incapaces de caracterizar los cambios de velocidad, ni tampoco están diseñados para coincidir con los modos de operación (ralentí, aceleración, desaceleración y crucero), así como las velocidades máxima y promedio, que describen las condiciones de manejo reales en diferentes ciudades o regiones [29]. Esto quiere decir, que no son capaces de representar los patrones de manejo, justificando una acción urgente por diseñar ciclos locales en base a parámetros objetivos que reflejen el desempeño e impacto vehicular.

Figura 10. Ciclos de conducción estándares utilizados en el mundo: a) NEDC, b) WLTC, c) FTP-75 y d) JP 10-15



Fuente. Elaboración propia adaptado de [30, 37]

Tabla 1. Parámetros que representan los ciclos estándares desarrollados en el mundo.

Parámetros		Símbolo	Unidades	NEDC	WLTC	FTP-75	JP 10-15
Velocidad	Velocidad promedio	Ave S	m/s	11,733		8,114	8,536
	Velocidad máxima	Max S	m/s	33,358		25,303	19,469
	D. E. velocidad	SD S	m/s	8,031		6,531	5,467
Aceleración	Aceleración promedio	Ave a+	m/s^2	0,528	0,335	0,420	0,370
	Desaceleración promedio	Ave a-	m/s^2	-0,719		-0,457	-0,389
	D. E. aceleración	SD a+	m/s^2	0,243		0,423	0,285
Modos de operación	Porcentaje en ralentí	% idl	%	20,340	18,900	12,86	26,060
	Porcentaje acelerando	% a+	%	23,560	39,667	36,450	38,450
	Porcentaje desacelerando	% a-	%	17,290	37,867	30,630	26,210
	Porcentaje en crucero	% cru	%	38,810	3,567	20,060	18,180
Dinámicas	Número de aceleraciones por kilometro	Accel/km	km^{-1}	2,814		3,430	3,121
	Raíz media cuadrática	RMS	m/s^2	0,139		0,190	0,162

Fuente. Elaboración propia en base a las referencias [25, 30]

El aspecto más importante relacionado con los DC reales es la representatividad de las condiciones locales. La mayoría de los autores buscan una representación sintetizada de los patrones de conducción locales [33, 38, 39]. Sin embargo, no hay una definición clara de los patrones de manejo. De acuerdo con las investigaciones enfocadas en resolver esta incógnita, se ha llegado a la conclusión de que la forma más fácil y objetiva de representar los patrones de conducción, es a través de parámetros característicos (Characteristic parameters – CPs), también llamados valores de rendimiento (Performance Values – PVs). Son variables basadas en el tiempo y velocidad del vehículo tales como velocidad promedio, porcentaje de tiempo en ralentí, aclaración positiva promedio, energía cinética positiva, etc., que describen el patrón de conducción de una región [38]. Los parámetros característicos más utilizados se presentan en la *Tabla 2*. No obstante, aún no está claro que conjunto de CPs describen completamente un patrón de conducción o su equivalencia en un DC, sin embargo, para cuestiones de este estudio, en la sección 3.4 se especifican los CPs utilizados. A continuación, se presentan las metodologías utilizadas para la generación de los ciclos.

1.3.1 Metodologías para la construcción de DC

Idealmente un ciclo de conducción debe tener las siguientes características: i) debe ser practico (no demasiado largo o demasiado complicado para su implementación en condiciones de laboratorio), ii) debe ser repetible y reproducible y iii) debe proporcionar resultados representativos del comportamiento del vehículo en condiciones reales de operación. De acuerdo con esto, existen dos corrientes metodológicas para obtener DCs. La primera metodología se denomina estocástica y se caracteriza por realizar la construcción de ciclos a partir de la discretización de la velocidad, para posteriormente crear ciclos candidatos a partir de su distribución de probabilidad. Por otro lado, la metodología determinística, tiene la característica de enfocarse en seleccionar el viaje con los CPs más semejantes a los del patrón de conducción. A continuación, se presentan los métodos más utilizados en cada metodología y los procesos que se requieren para utilizar cada uno de estos, como se muestra en la *Figura 11.a-d.*

1.3.1.1 Metodología estocástica

Como se mencionó anteriormente, los métodos pertenecientes a la corriente estocástica tienen la particularidad de que los ciclos de conducción obtenidos son construidos a partir del empalme cuasi-aleatorio de segmentos de viajes o de estados de operación. Los métodos más utilizados son:

Tabla 2. Métodos y parámetros característicos utilizados por los diferentes ciclos de conducción desarrollados en el mundo

	Velocidad promedio	**Vel. Promedio en movimiento**	**Acel. promedio**	**Desaceleración promedio**	**Longitud media de micro-viajes**	**Número de aceleraciones/cambios de desaceleración**	**Número promedio de paradas**	**% Ralentí**	**% Creeping**	**% Acelerando**	**% Crucero**	**% Desacelerando**	**RMS de la velocidad**	**RMS dela aceleración**	**Energía cinética positiva (PKE)**	**Tasa de cambio de aceleración**	**Distribución de vel. y acel.**	**Potencia específica del vehículo**	**Velocidad máxima**	**Velocidad mínima**	**Método de construcción**
FTP 72, FTP 75	√						√												√		MT
LA92, Unified Cycle																	√				MT
LA01	√							√	√	√	√	√					√		√	√	MCMC
Ciclo HHDDT	√							√	√	√	√	√							√		MT
Ciclo Arterial								√		√	√	√					√	√			MCMC
Ciclo Edinburgh																	√				MT
IEC	√	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√									TB
Ciclo ARTEMIS	√	√	√	√			√	√									√		√		MT
Ciclo TRL	√		√		√														√	√	MT
Ciclo de Sydney	√							√						√			√				MT
Ciclo de Melbourne Peak	√							√					√	√	√		√				MT
Ciclo CUEDC	√							√		√									√		MT
Ciclo de Perth	√						√	√						√	√	√	√				KT
TMDC		√	√	√	√			√		√							√				TB
KHM	√	√	√	√	√	√		√		√	√	√		√							MT
Ciclo de China	√	√	√	√		√		√		√	√	√			√						MT
Ciclo de Beijing	√	√	√	√				√		√	√	√						√	√		MT
Ciclo de HK y Zhulai	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√	√		√		√		MT
Ciclo de Pune	√							√		√	√	√					√				MT
Ciclo de Metro Manila	√																√		√	√	MCMC
Ciclo BDC	√	√	√	√			√	√		√	√	√			√						MT

Fuente. Elaboración propia en base a las referencias [40, 41]

MT: Micro-trips, MCMC: Markov Chain-Monte Carlo, TB: Travel based, KT: Knight Tour

I. Micro- trips (MT)

Los datos de velocidad y tiempo recolectado en los viajes monitoreados son divididos en micro segmentos de viaje, delimitados generalmente por una velocidad del vehículo igual a 0 km/h. Una fase intermedia consiste en la clasificación y agrupación de los micro segmentos en base a características como velocidad promedio, aceleración promedio o modos de operación El resultado del paso anterior, permite realizar una selección cuasi-aleatoria con base a la distribución de probabilidad. Posteriormente los micro segmentos seleccionados son empalmados, generando así un ciclo de conducción candidato (CDC) [32, 38, 40].

II. Cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC)

Este método se basa en la teoría de Markov y utiliza la técnica de Monte Carlo [38-40, 42, 43]. Los datos de velocidad – aceleración son discretizados en estado de operación. La frecuencia de ocurrencia de cada estado de operación es registrada en la matriz de estados, a partir de este resultado, la probabilidad de cambiar de un estado X_i a un estado X_{i+1} es calculado y registrado en una matriz de transición. Esta matriz es utilizada para realizar la selección cuasi-aleatoria de los estados subsiguientes al estado inicial, lo cual, tiene como resultado un ciclo de conducción candidato expresado como un vector de estados de operación. Es ciclo es decodificado en función de sus valores de velocidad y tiempo, generando así un CDC.

Los métodos anteriormente explicados, son reproducibles, pero no repetibles, esto significa que el ciclo de conducción resultante es diferente cada vez que los métodos son utilizados, a pesar de usar el mismo conjunto de datos. Esto quiere decir que los diferentes ciclos de conducción obtenidos pueden conservar características globales como la velocidad promedio o aceleración promedio. Sin embargo, las características locales en pequeños intervalos de tiempo cambien debido a la variación del perfil de velocidad, lo cual se traduce en variaciones de consumo de combustible y emisiones.

En conclusión, los métodos de la metodología estocástica pueden ser utilizados para generar diferentes ciclos de conducción a partir del mismo conjunto de datos, los cuales pueden ser utilizados en las etapas de diseño y validación del tren de potencia de un vehículo.

1.3.1.2 Metodología determinística

Los ciclos de conducción obtenidos por esta vertiente son seleccionados de uno de los viajes contenidos en los datos de los vehículos monitoreados. Los métodos más utilizados en la actualidad son:

I. Trip Based Method (TBM)

Para la obtención de ciclos de conducción, se utilizan criterios de evaluación para determinar la representatividad del viaje seleccionado, generalmente están asociados a los parámetros característicos del vehículo como la velocidad promedio, aceleración promedio entre otros. Esto quiere decir que se comparan los parámetros de los viajes con respecto al patrón de conducción de la muestra global, y se selecciona aquel viaje con un nivel de similitud dentro de un umbral preestablecido (Diferencia relativa < 5%), por lo tanto, el perfil de velocidad de este viaje se considera como el ciclo de conducción representativo.

II. Fuel Based Method (FBM)

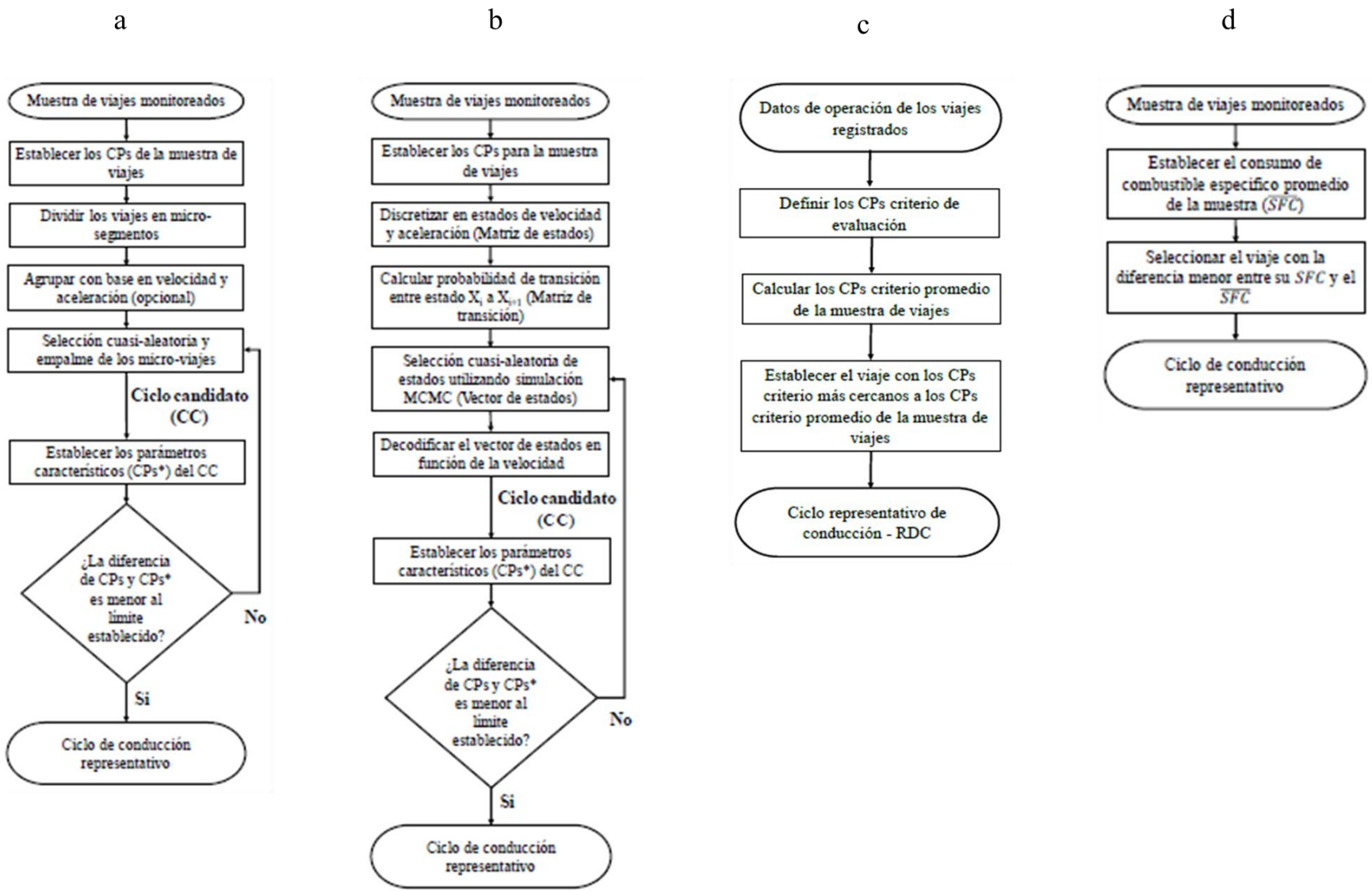
En este método al igual que el anterior, utiliza parámetros para la selección del viaje más representativo de las condiciones globales de manejo, sin embargo, se diferencian en que la variable o parámetro seleccionado es solo uno, el consumo especifico de combustible (Specific Fuel Consumption – SFC). Esto se debe a que, en diferentes investigaciones desarrolladas por el grupo de Investigación, se descubrió y valido que este parámetro es un excelente descriptor de los patrones de manejo, en donde ha logrado describir el 95% de los parámetros característicos de una muestra de viajes monitoreados [25, 44].

Por lo tanto, en este método se calcula el consumo de combustible especifico promedio los viajes muestreados. Luego el viaje con el SFC más cercano al SFC promedio, se selecciona como el ciclo de conducción representativo.

Estos métodos tienen la característica de ser repetibles y reproducibles, esto quiere decir que permiten asociar un único perfil de velocidad vs tiempo a los patrones de manejo y externalidades particulares de la región de estudio, lo cual disminuye las variaciones en los cálculos de rendimiento energético y emisiones vehiculares asociados a la variación del ciclo de conducción.

En conclusión, siempre habrá la necesidad de identificar qué parámetros característicos influyen más en las condiciones reales de operación y cuales son realmente capturadas por las pruebas de homologación. Es por eso, que se deben construir ciclos de conducción representativos (RDC) de las regiones, que reproduzcan los patrones de conducción y el consumo de combustible, además de reflejar los factores de mayor incidencia en la operación normal de los vehículos, para así desarrollar estrategias que conlleven a una mejora significativa, económica e inmediata del rendimiento energético de los vehículos.

Figura 11. Procesos para generar ciclos de conducción representativos utilizando a) MT, b) MCMC, c) TBM y d) FBM



Fuente. Adaptado de las referencias [25, 44]

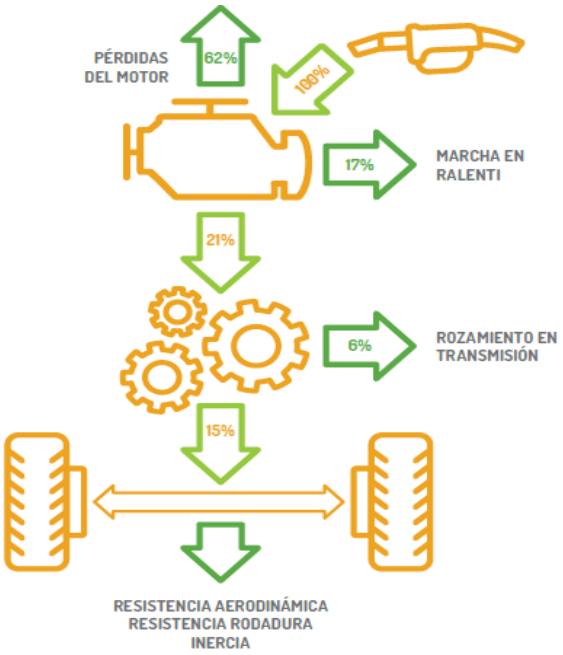
1.4 ESTRATEGIAS DE CONDUCCIÓN EFICIENTE

Con base en el contexto anterior, los países y compañías han emprendido acciones para reducir su consumo de combustible y el impacto ambiental, en donde se destacan las practicas conducción eficiente, que han sido investigada en todo el mundo en la última década debido a su saldo positivo de costo-beneficio, y se basan en la toma de decisiones por parte del conductor que pueden representar desde nada hasta un 45% de las reducciones en el consumo de combustible [6].

Por lo tanto, la conducción eficiente es una manera y actitud de manejar que busca lograr que el vehículo no se sobre esfuerce para llegar a su destino, es decir, que no gaste más de los necesario. La conducción eficiente, se enfoca en mejorar el tipo de conducción y la actitud al momento de manejar, que permite a los conductores tener un mayor rendimiento del combustible durante los recorridos además de otros beneficios como menores costos de mantenimiento, menor cantidad de gases de emisiones contaminantes y aumento de la seguridad vial al reducir el estrés al conducir. Para entender mejor la importancia de este tipo de conducción, es necesario entender como es el proceso que permite el movimiento de un vehículo y las perdidas relacionadas para conseguirlo.

Los vehículos que usan como carburantes combustibles fósiles (gasolina, diésel, gas licuado del petróleo, etc.), se mueven gracias al proceso de combustión. En donde a partir de una reacción química entre un combustible y aire, se genera una explosión en donde se trasmite la energía contenida en el combustible como energía mecánica a las ruedas del automotor. Sin embargo, como todo proceso termodinámico, este no es ideal. En donde no toda la energía térmica liberada en la combustión se puede aprovechar como energía útil. Es así como a medida que se transfiere la energía entre los mecanismos del vehículo, se obtiene diferentes pedidas, que pueden llegar a ser entre un 62-76%. La *Figura 12* muestra un esquema, en donde se pueden evidenciar las pérdidas más comúnmente presentadas.

Figura 12. Pérdidas de energía desde el combustible hasta las ruedas



Fuente. Manual de conducción eficiente para vehículos particulares [45]

La conducción eficiente se logra a partir de la optimización de los factores que intervienen en las etapas de la conducción, en donde como se muestra en las secciones posteriores, todo empieza antes de iniciar un recorrido (arranque, primera marcha), luego pasa para tener en cuenta los factores durante la marcha (cambios de marcha) y por ultimó la forma de actuar bajo las diferentes condiciones de tráfico (adelantamiento, detención, paradas). De acuerdo con esto, a continuación, se presentan las consideraciones que se tienen en cada una de las etapas mencionadas.

1.4.1 Antes de iniciar el recorrido

- ✓ Neumáticos

Uno de los factores que se deben tener en cuenta antes de emprender cualquier viaje a través de un vehículo, es la revisión del estado de los neumáticos, ya que estos son los encargados de otorgarle la tracción y adherencia a la carretera, necesarios para el avance, frenado y estabilidad en las curvas. La presión de las ruedas es entonces, un factor crucial, en donde en todo momento debe ser el adecuado para el tipo de neumático y las condiciones de carga y velocidad previstas.

La falta de presión en los neumáticos ocasiona que el vehículo tenga una mayor resistencia a la rodadura, además de tener que desarrollar una mayor potencia para mantener la marcha del vehículo. Es decir, este comportamiento se traduce en un aumento en el consumo de combustible, además de ser uno de los principales factores de los accidentes en las vías.

Una presión de 0,3 bares por debajo del recomendado por el fabricante, ocasionada un incremento del consumo del 3%, además de una reducción de la vida útil del neumático. Por lo tanto, para evitar las pérdidas ocasionadas por este factor, se recomienda que los neumáticos sean inflados con nitrógeno en lugar de aire, ya que, a corto económicamente puede ser más costoso, pero a largo plazo llega a compensarse con lo ahorros presentados en el consumo de combustible

- ✓ Mantenimiento

El diagnóstico del motor y el control de los niveles y filtros, son factores asociados al mantenimiento general del vehículo, en donde después de determinado tiempo, se debe realizar un diagnóstico computarizado a partir de la unidad de control del motor (Engine Control Unit – ECU) que permite detectar averías que producen aumentos del consumo y las emisiones vehiculares.

Con respecto a los niveles y filtros (aire, combustible, aceite, etc.), también son factores importantes que permiten mantener en condiciones óptimas el motor, que permite tener una reducción del combustible y emisiones vehiculares.

- ✓ Condiciones de carga

La distribución del peso del vehículo es un factor, que afecta directamente el consumo de combustible, ya que, es el encargado de someter a esfuerzos los componentes del vehículo (motor, suspensión y frenos). Una mala distribución de la carga puede ocasionar una mayor resistencia aerodinámica o mayor inestabilidad al disminuir la adherencia del eje delantero.

Todo objeto, instalado en el exterior del vehículo puede ocasionar un aumento en el coeficiente de arrastre global, ocasionando que se dificulte el avance. En la *Figura 13* se representa el aumento en el consumo de algunos casos típicos de sistemas instalados y en la parte superior.

Figura 13. Efecto de las configuraciones de baca sobre el aumento del consumo de combustible (a 120 km/h)

Fuente. Como conducir de manera eficiente [46]

1.4.2 Inicio de la marcha

- ✓ Arranque

El arranque del motor se debe realizar sin acelerar, ya que en muchas ocasionas, el hábito de acelerar solo sirve para desajustar la regulación electrónica y disminuir el rendimiento de la operación de arranque, lo que se traduce en un consumo excesivo de combustible y por ende una emisión elevada de contaminantes a la atmosfera.

- ✓ Primera marcha

En los vehículos a base de gasolina, se deberá iniciar la marcha en primera velocidad inmediatamente después de arrancar el motor, ya que, se tiene la idea de que se debe dejar calentar el motor, lo cual es una concepción errónea. Por otra parte, en los vehículos alimentados con diésel, es crucial dejar pasar unos segundos una vez arrancado el motor, antes de comenzar la marcha.

1.4.3 Durante la marcha

La moderación de la velocidad para cada tipo de vía presentes en una ciudad, es un factor muy importante a la hora de reducir el consumo de combustible. Esto se debe a que a un aumento de la velocidad de un 16,7%, se traducirá en un incremento de consumo de combustible del 24,8% y 35% para tecnologías diésel y gasolina respectivamente. Sin embargo, si se realiza una reducción de la misma magnitud, los porcentajes de reducción serán de 21% para vehículos diésel y 29,6 para gasolina.

- ✓ Programación de marchas

Los procesos de aceleración se deberán cambiar de forma rápida para llegar a la marcha más larga lo antes posible. Estos pueden variar de acuerdo al tipo de motor y en función de la velocidad, en el primer caso, se cambiará entre 2.000 y 2.500 rpm. Con respecto a la velocidad se deben tener en cuenta las consideraciones de la *Tabla 3*:

Tabla 3. Cambios de marcha para aceleraciones en lugares de poca altitud (< 1.215 m)

Cambio de velocidad	**Km/h**
1ª a 2ª	13
2ª a 3ª	27
3ª a 4ª	40
4ª a 5ª	58
5ª a 6ª	82

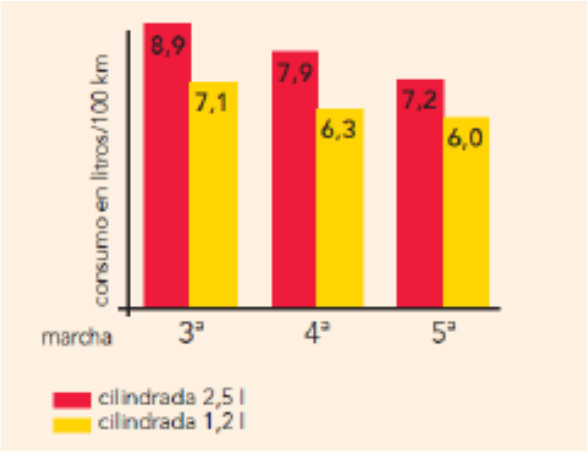
A continuación, se muestra el comportamiento del consumo de combustible en diferentes marchas a una misma velocidad para dos tamaños de motor diferentes (*Figura 14*).

Al procurar por cambiar a una marcha más larga, se debe accionar rápidamente el acelerador (no fuertemente), para llegar al punto en el cual mantener la velocidad. En un caso hipotético, en el cual se esté circulando en 2ª marcha, y se opte por alcanzar la velocidad constante, se pueden presentar dos casos dependiendo de la condición de tráfico y la velocidad de la vía (*Tabla 4*).

Tabla 4. Saltos de marcha para diferentes velocidades de diseño de vías

Vía	**Tráfico**	**Descripción**
Elevada velocidad media	Despejado	Se cambiará a 3ª hasta llegar a la velocidad de diseño de la vía, pasando posteriormente de forma directa a la 5ª o 6ª marcha. Estos cambios se deben realizar sin sobrepasar las 2.500 rpm, para vehículos a gasolina.
Velocidad media normal	Despejado	Si en 2ª marcha ya se alcanzó la velocidad de diseño, se pasará directamente a la 4ª velocidad. Y posteriormente, si el trafico lo permite, a 6ª.
Fuente. La conducción eficiente [47]		

Figura 14. Consumo de combustible para diferente cilindrada según la marcha a 60 km/h.



Fuente. Como conducir de manera eficiente [46]

1.4.4 Otras circunstancias del tráfico

- ✓ Adelantamiento

El adelantamiento es un comportamiento que depende de la personalidad de cada conductor, y puede realizar a velocidades considerablemente altas y a marchas elevadas. Pero depende de la seguridad y confianza del conductor, ya que necesita de una buena aceleración. Se puede cambiar a una macha menor a fin de lograr un mejor desempeño a la hora de realizar la aceleración del vehículo, sin tener en cuenta el pico transitorio de consumo.

- ✓ Detención

Al llegar a una señal de pare, semáforo o cualquier otra señal de transito que requiera que el vehículo se detenga, se debe seguir la siguiente secuencia:

1. Anticipar la operación, al prestar atención a la señal de indicación.
2. Levantar el pie del acelerador, para dejar rodar el vehículo por su inercia.
3. Corregir con el freno, la velocidad.
4. Reducir la marcha, si es necesario para evitar cese abrupto del motor.
5. Detención

- ✓ Paradas

Si se prevé que una parada va a tener una duración prolongada (> 60 s) es recomendable apagar el motor. Ya que cuando el vehículo está detenido con el motor encendí, se encuentra funcionando en ralentí, con un consumo entre 0,4 a 0,7 L/h. Estas cifras, aunque no son altas, representan un consumo considerable si se suman de manera acumulada en todos los tiempos

de parada realizadas, además de empeorar el rendimiento del vehículo (km/L). De acuerdo con eso, es recomendable que durante las paradas que duren más de 1 minuto, es recomendable detener el motor para así reducir el consumo de combustible innecesario.

Es importante recalcar que la práctica frecuente de detención y arranque del motor de combustión no perjudica el motor de arranque, ya que en los motores modernos no se produce el desgaste que se registraba en los más antiguos y que obligaba a que se tuvieran que cambiar permanentemente. Además, actualmente los automóviles de última generación cuentan con sistemas de apagado y arranque automático (start/stop), por lo que esta práctica ya no es necesaria para estas tecnologías vehiculares.

En este orden de ideas, los efectos de la formación en prácticas de conducción eficiente son de corta duración y tienden a desaparecer con el tiempo, por lo tanto, es necesario un monitoreo y retroalimentación continua del comportamiento del conductor. Esto quiere decir que aún se necesitan grandes esfuerzos por lograr convertir el impacto positivo de la conducción eficiente en una práctica de conducción real [48].

2 OBJETIVOS

Para dar respuesta a la problemática y la necesidad planteada en este trabajo, se propone el siguiente objetivo general y objetivos específicos.

General:

Desarrollar estrategias de conducción eficiente para la reducción del consumo de combustible a partir del ciclo de conducción representativo para vehículos livianos en Bucaramanga, Santander.

Específicos:

- ✓ Obtener el ciclo de conducción representativo para vehículos livianos en Bucaramanga, Santander mediante la adquisición de datos usando OBD o GPS.
- ✓ Estimar el consumo de combustible para vehículos livianos en Bucaramanga, Santander.
- ✓ Identificar el ahorro potencial en el consumo de combustible una vez se implementen las estrategias de conducción eficiente.

3 METODOLOGÍA

Para caracterizar el patrón de conducción y consumo de combustible de vehículos bajo condiciones reales de operación, se seleccionó una ciudad y de acuerdo con dos vehículos de las mismas características y tecnología de control de emisiones con los que contaba una entidad pública, se monitoreo durante un período prologando de tiempo. A continuación, se describe la región del estudio, los vehículos monitoreados, la instrumentación utilizada y la campaña de monitoreo realizada.

3.1 REGIÓN DE ESTUDIO

Con el objetivo de proporcionar generalidad en el presente trabajo y de obtener información del consumo de combustible en Bucaramanga bajo condiciones reales de majeo, se realizaron mediciones de la operación normal de los vehículos por las diferentes vías que componen la ciudad.

3.1.1 Localización y área

Bucaramanga es un municipio colombiano, capital del departamento de Santander. Se encuentra ubicada al nororiente del país sobre la Cordillera Oriental, rama de la Cordillera de los Andes, como se muestra en la *Figura 15*. Bucaramanga junto con los municipios de Girón, Floridablanca y Piedecuesta, constituyen el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), el quinto conglomerado del país y uno de los cuatro centros macro regionales, en conjunto con las ciudades de Cali, Medellín y Barranquilla, en donde cumple diversas funciones como centro institucional, político, financiero y económico [49].

Con el paso de los años, el AMB se ha caracterizado por el predominio de las actividades comerciales y de servicios, con sectores específicos como el residencial e industrial. Esto ha promovido el crecimiento de los diferentes municipios, en especial de aquellos diferentes a Bucaramanga, debido a la poca disponibilidad de espacio que se presenta en está. Sin embargo, este fenómeno no le resta importancia a la ciudad, ya que, al contrario de lo esperado, se han generado flujos de personas y bienes en los que Bucaramanga juega un papel central, por su protagonismo como generador de empleo.

Figura 15. Ubicación geográfica de Bucaramanga dentro de Colombia

Fuente. Elaboración propia

Los municipios que integran el AMB se encuentran ubicados entre los 777 y 1005 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), sin embargo, estos valores pueden variar según las características específicas de cada uno de los municipios. El área total de la zona metropolitana es de 1.417 km2, de los cuales según sus dimensiones se organizan de mayor a menor en Girón, Piedecuesta, Bucaramanga y Floridablanca, estas características se presentan en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Área y altura sobre el nivel del mar del Área Metropolitana de Bucaramanga

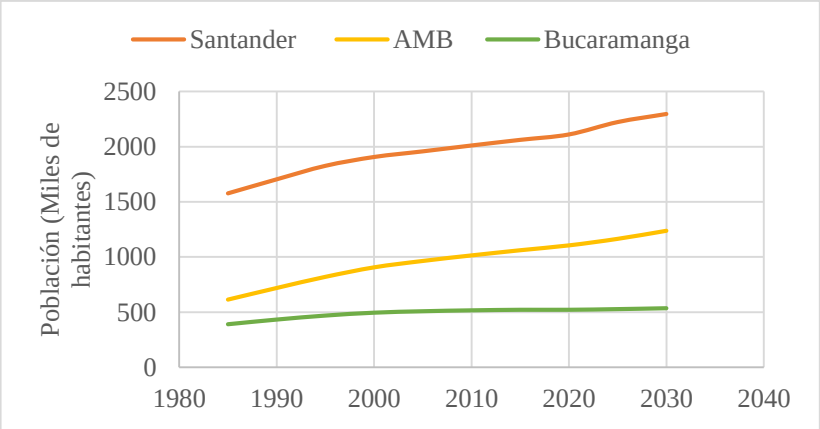
Municipio	**Área [km2]**	**Altitud [m]**
Bucaramanga	165	959
Floridablanca	97	925
Girón	864	777
Piedecuesta	345	1005
Fuente. Plan de Ordenamiento Metropolitano de Bucaramanga. Componente Territorial		

3.1.2 Población

De acuerdo con las proyecciones realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la población para el año 2010 del AMB era de 1’014.088 habitantes, que corresponden a alrededor del 51% de total de la población del departamento de

Santander. La mayor parte de esta población se encuentra acentuada en la ciudad de Bucaramanga, sin embargo, existe una tendencia decreciente a favor de los otros municipios aledaños, este crecimiento poblacional seguirá dándose, aunque no a un ritmo tan alto como el presentado en la segunda mitad del siglo XX, lo que asegura una tendencia de urbanización constante como se presenta en diferentes regiones del país, el comportamiento se puede ver en la *Figura 16*.

Figura 16. Población urbana de Bucaramanga frente al AMB (1985-2030)



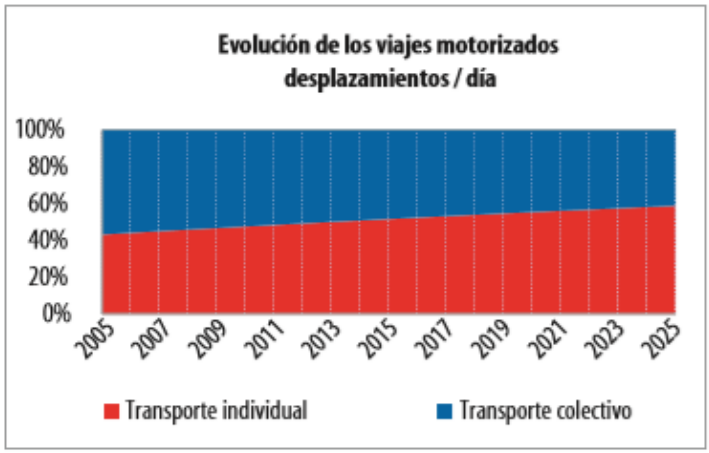
Fuente. Elaboración propia en base a la referencia [49]

El desplazamiento de la población a municipios diferentes a Bucaramanga justifica el aumento en el flujo de viajes que ocasionan una fuerte presión sobre la malla vial, lo cual exige que se desarrollen y adopten medidas para reducir los efectos negativos que toda esta variación de la conducta de las personas ocasionará.

3.1.3 Movilidad

De acuerdo con un estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander, se identificó que la participación de la demanda de viajes motorizados para el año 2010 se encontraba en un 55% para el transporte colectivo (TC) y un 45% para el transporte individual (TI) [49], pero esto iba a cambiar con el paso de los años, en donde el TC iría disminuyendo a una tasa del 1.6% anual; esta tendencia a favor del TI ocasionaría que para el año 2025 tuviera una participación del 65%, lo cual acarrearía una fuerte presión sobre la red vial que sin duda empeoraría la congestión y aumentaría los efectos adversos sobre la calidad de vida de los habitantes y por su puesto la competitividad de la ciudad. En la *Figura 17* se presenta la evolución de los viajes motorizados si el porcentaje de decrecimiento se mantiene constante.

Figura 17. Evolución de los viajes motorizados (2005-2025)



Fuente. Plan Maestro de Movilidad Bucaramanga 2010 - 2030

El comportamiento de la demanda vehicular presenta cuatro picos durante todo el día, estos son ocasionados por la movilización de múltiples usuarios por motivos de trabajo (durante la mañana y por la tarde) y por cuestiones del hogar (al medio día y en la noche). Esta conducta varía los fines de semana en referencia a un día hábil en un 77% para el sábado y un 56% los domingos [49]. Este patrón se debe a la alta concentración de flujos provenientes de los municipios adyacentes hacia Bucaramanga, específicamente hacia las zonas Cabecera, Centro, San Francisco, Ciudadela Real de Minas y la Concordia, en donde se realizan cerca de 55.000 viajes, tanto en horas de la mañana, como en sentido contrario en horas de la tarde.

3.1.3.1 Nivel de motorización

La urbanización al igual que la calidad de vida tienen una relación directa, esto se debe a que múltiples países que han tenido importantes desarrollos por defecto han mejorado el bienestar social de su población. Al considerar esto en el contexto colombiano, el área metropolitana de Bucaramanga no es la excepción, ya que el aumento demográfico ha provocado que poco a poco se vayan trasladando y generando concentraciones de personas en zonas específicas o la concepción de nuevas ciudadelas. Este fenómeno de reubicación en conjunto con un servicio deficiente de transporte colectivo, promueven el uso de transporte motorizado privado (automóvil o motocicleta), ya que la posibilidad de una vivienda y la necesidad de trasladarse son críticos a la hora de seleccionar un servicio o actividad, pero también a la hora de considerar una oferta laboral.

Según el Ministerio del Transporte para el 2010 existían en el AMB un total de 86.973 autos y 135.206 motocicletas matriculadas, de los cuales el 73,4% de los autos y el 7% de las motos se encuentran registradas en Bucaramanga. Esto quiere decir, que la tasa de motorización entre los años 2005-2010 pasó de ser de 51 a 81 vehículos por cada mil habitantes. Si se mantiene esta tendencia, se espera que se tenga un incremento anual de 6.250 vehículos, además del triple de viajes motorizados para el 2025. Sin embargo, este índice es bajo en comparación con otras ciudades del mundo que promedian 180. Es por esto, que no solo es la cantidad de vehículos lo que realmente importa, sino también el grado de obsolescencia que se tiene del parque automotor; que, en el caso colombiano, los vehículos de cuatro ruedas tienen una antigüedad promedio de 16 años en donde el 33% tiene más de 20 años y solo el 48% no supera los 10 años [50].

3.1.3.2 Jerarquización de la malla vial

Las vías de Bucaramanga se han agrupado con base en diferentes criterios (funcionalidad, tipo de transporte, conectividad, etc.). En base a esas características se formaron dos grandes grupos:

- Sistema vial arterial.
- Sistema vial local.

En el primer grupo se clasifican las vías de acuerdo con su función territorial, es decir, vías arteriales primarias, secundarias y terciarias. Por su parte, en el otro grupo se encuentran las vías que han sido adecuadas y cedidas al AMB para dar continuidad con la malla vial existente; en este caso se clasifican en red local 1 y 2. Teniendo en cuenta las variables de caracterización de la infraestructura vial se presenta en la *Tabla 6*, la jerarquización y especialización de la malla vial urbana.

Esto quiere decir que la estrecha malla vial, sumado a una mala condición de uso y a una población obsoleta de vehículos forman un trío que genera elevados costos económicos y ambientales [50].

Tabla 6. Jerarquización y caracterustucas de la malla vial de Bucaramanga

Sistema	Tipología	Carriles totales	Velocidad de diseño [km/h]	Distancia [km]
Sistema arterial	Arteria primaria	> 4	60	56,81
	Arteria secundaria	2 a 4	50	40,13
	Arteria terciaria	2 a 4	40	49,81
Sistema local	Vía local nivel 1	2	30	93,92
	Vía local nivel 2	2	25	285,29
Fuente: Elaboración propia en base a las referencias [49, 51]				

3.1.4 Vehículos

Los vehículos utilizados para este estudio fueron puestos a disposición por una entidad pública que tiene como objetivo recorrer diferentes zonas de Bucaramanga. Los vehículos cuentan con condiciones de mantenimiento similares, al igual, que los mismos conductores, lo que permite que se eliminen los efectos de la variación provocadas por estas variables en los resultados. La cantidad de vehículos disponibles fueron dos, y pertenecen al año-modelo 2014 y 2015. Usan motores a gasolina QR25DE, 4 cilindros en línea y 2,5 litros, los motores incluyen un sistema convertidor catalítico para reducir las emisiones. Estos motores ofrecen una potencia de 166 HP y un torque de 241 Nm. Cada vehículo tiene una capacidad de 5 pajeros, además de contar con un platón para cargar los sistemas que se requieren para la actividad diaria, es decir un peso bruto de alrededor de 2.550 kg. Los vehículos tienen 5,26 m de largo, 1,78 m de alto y 1,79 m de ancho, como se puede apreciar en la *Figura 18*.

Figura 18. Vehículo monitoreado

Dimensiones: 5,26 x 1,78 x 1,79 m
Capacidad: 5 personas
Combustible: Gasolina
Peso bruto: 2.550 kg
Motor: QR25DE, 4 cilindros en línea, 2,5 litros, 9,5 relación de compresión, 166 HP, 241 Nm
Transmisión: 6MT
Llantas: Rin de acero de 15 in
Modelo: 2014-2015
Platón: Sí

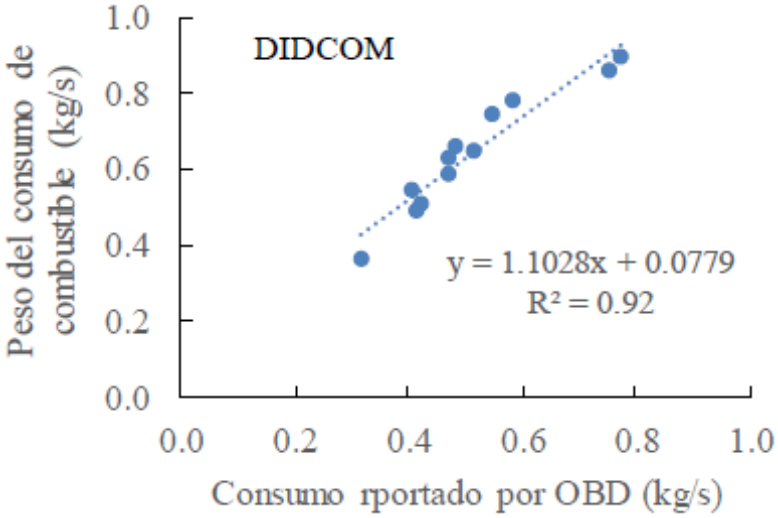
Fuente. Elaboración propia

3.2 INSTRUMENTACIÓN

Actualmente, se pueden encontrar diferentes equipos que pueden ser utilizados para caracterizar el patrón de manejo de una ciudad, estos pueden variar según la cantidad de recursos y la precisión que se dispongan y requieran. Sin embargo, ya que este proyecto de grado se encuentra enmarcado bajo uno de los objetivos del Grupo de investigación de energía y cambio climático del Tecnológico de Monterrey, el cual consiste en la utilización de dispositivos de bajo costo que permitan adquirir múltiple información con una precisión considerable. Por lo tanto, la forma en la que se determinó el consumo de combustible, además, de diferentes variables que permiten describir objetivamente un patrón de conducción, fue a partir de la Unidad de Control del Motor (Engine Control Unit - ECU), en la cual se pueden obtener variables (velocidad, tiempo, revoluciones del motor, etc.) de los diferentes sensores que se incorporan en los vehículos a partir del puerto de diagnóstico a bordo (OBD), es decir, el sistema encargado de monitorear y controlar por completo el motor.

La precisión de los datos obtenidos del consumo de combustible, utilizando la interfaz del puerto OBD fueron validados por el grupo de investigación utilizando un tanque externo, como se estipula en el procedimiento estándar SAE J1321 para determinar el consumo de combustible. En donde se determinó la correlación a partir del coeficiente de determinación (R2 > 0,9) y pendientes de calibración (m = 1,1) de los dos métodos, llegando a la conclusión de que el valor reportado a través del puerto OBD, arroja resultados comparables a los obtenidos por un tanque de calibración, como se muestra en la *Figura 19* [25, 52].

Figura 19. Verificación de la medición de consumo de combustibles con el sistema OBD versus el consumo con un tanque calibrado



Fuente. Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz [53]

En base a los resultados anteriores y ya que la mayor parte de los automóviles están obligados por ley a incorporar una interfaz para la conexión de equipos de diagnóstico que permiten la transferencia de datos bajo estándares internacionales, se utilizó un escáner elm327, el cual está diseñado para actuar como un puente entre el puerto de diagnóstico y la interfaz de un aparato electrónico (ordenador, dispositivo móvil, etc.) en donde se almacenara la información. En la siguiente *Figura 20* se presenta un esquema alusivo al funcionamiento de los instrumentos de medición.

Figura 20. Funcionamiento del puerto de diagnóstico a bordo (OBD)

Fuente. Elaboración propia.

Con respecto a las características o especificaciones técnicas del escáner ELM327 (*Tabla 7*), a continuación, se presenta un resumen de los protocolos soportados, así como también algunas características del dispositivo.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del escáner ELM327

Escáner	**Protocolos soportados**				**Protocolo de salida**	**Velocidad de transmisión**	**Dimensiones**
OBD-II ELM327 V 1.5	SAE J1850-PWM SAE J1850-VPW	ISO 9142-2	ISO 14230-4 (Slow) ISO 14230-4 (fast)	ISO 15765-4 (CAN)	RS232	96.800 - 38.400	8,8 x 4,6 x 2,5 cm

3.3 TOMA DE DATOS

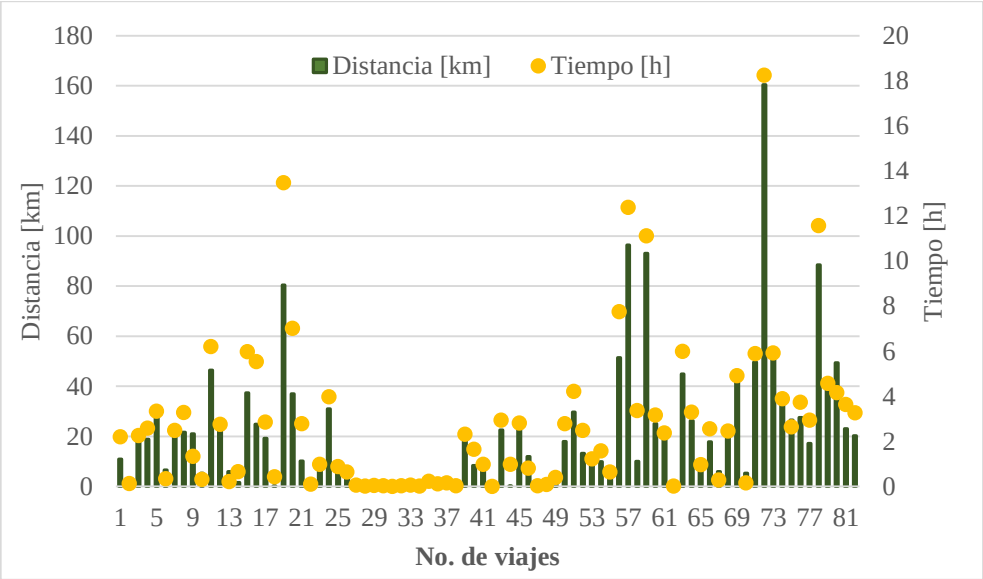
Se llevó a cabo una campaña de monitoreo durante 5 meses, en donde se utilizó la interfaz OBD proporcionada por el fabricante del motor en un periodo de muestreo de 1 Hz, para obtener datos reales de conducción durante la operación normal de los vehículos de la compañía. Estos vehículos empiezan las actividades laborales sobre las 7:30 am y se llevan a cabo hasta las 12:30 pm, hora en la cual regresan a las instalaciones para hacer el cambio

respectivo de conductor, a la 1:30 pm se reanudan las actividades hasta las 7:00 pm, es decir, la información recopilada obtiene datos de los diferentes comportamientos de la demanda vehicular que se presenta en las diferentes zonas de Bucaramanga. Los vehículos fueron conducidos por los conductores regulares de la compañía (2 por cada vehículo), y se monitorearon variables de manejo (velocidad, tiempo, etc.) junto con datos de posicionamiento global a través del GPS del dispositivo celular y el consumo de combustible instantáneo a una frecuencia de 1 Hz. La campaña de monitoreo incluye viajes en diferentes horas del día, diferentes días de la semana (excluidos fines de semana).

Como cualquier equipo de medición, se presentan perdidas de la información, y los equipos utilizados no son la excepción, es así que se debe garantizar la calidad de los datos que permitan obtener resultados confiables y verídicos. De acuerdo con esto, se debe tratar la información para eliminar datos inválidos, es decir, datos que no contiene información, que están en blanco o fuera del rango racional, un ejemplo de esto puede ser: revoluciones del motor negativas, consumo de combustible instantáneo superiores a 100 (L/s), etc., son datos que por lo general se dan por fallas en la comunicación, y tienen la cualidad de ser muy fáciles de identificar.

El filtro de la información consistió en la eliminación de datos inválidos en lugar de datos atípicos, ya que, los datos atípicos surgen de comportamiento atípicos, y precisamente eso hace referencia a la forma de manejo. El propósito de esta fase de verificación no fue manipular la información, sino al contrario, procurar eliminar la menor cantidad de datos para así no omitir valores clave que describan la forma de conducción de los vehículos de la compañía. Por lo tanto, mientras que los datos se encuentren dentro del rango de los sensores del vehículo, se consideraron como datos válidos. De con eso, se obtuvieron 82 viajes en total, en donde se tienen mediciones simultaneas que pasaron el proceso de verificación de la calidad de datos. En la *Figura 21* se presentan algunas características de los viajes obtenidos.

Figura 21. Características de los viajes monitoreados



Fuente. Elaboración propia

3.4 ANÁLISIS DE DATOS

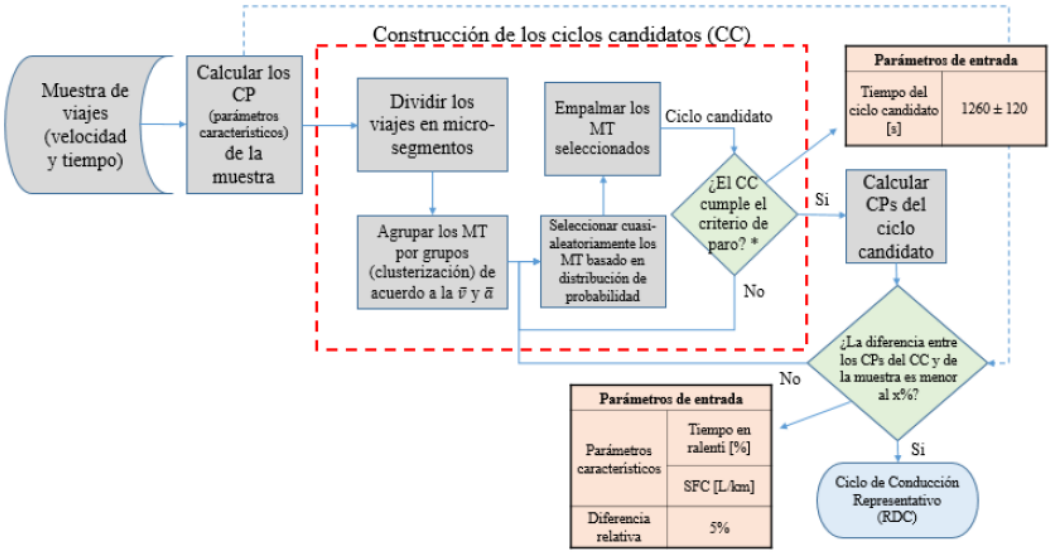
Como se explicó en capítulos anteriores (1.3), en el mundo se han utilizado dos metodologías para generación de ciclos de conducción; la metodología estocástica que tiene un carácter constructivo en donde a partir de una muestra de datos, se genera un ciclo de conducción, y, por otra parte, la metodología determinística que tiene una naturaleza selectiva, es decir, de todos los viajes que se muestrean, se selecciona uno como el más representativo.

Dentro la metodología estocástica, existen varios métodos, pero Micro-trips (MT) y Markov Chains Monte Carlos (MCMC) son los dos más comúnmente utilizados en la literatura, y tienen la característica de que ambos discretizan en micro segmentos o estados de operación los datos obtenidos y después los unen cuasi aleatoriamente de acuerdo con su distribución de probabilidad. Algo que no sucede en la metodología determinística, en donde los métodos principales son: Trip Based Method (TBM) y Fuel Based Method (FBM), la característica que comparten estos dos métodos es que se selecciona el viaje que sea más representativo, es decir, el viaje con los criterios de selección más similares a la población. En el TBM, se seleccionan los CPs que se consideren más importantes y se convierten en los criterios de selección, por su parte, el FBM, como su nombre lo describe, solo considera el consumo de combustible específico (Specific Fuel Consumption – SFC) como el criterio de mayor importancia, ya que solo este parámetro es capaz de describir en un 95% el patrón de conducción en rutas determinadas [44, 53], a pesar de no ser un parámetro característico.

De acuerdo con esto, para propósitos de este proyecto, el método utilizado para la generación de ciclos de conducción consta de la combinación de los métodos de MT y FBM, en donde se mantiene el algoritmo base del método de Micro-trips y se adiciona el consumo de combustible especifico como uno de los criterios de selección, que permita obtener ciclos representativos del patrón de conducción de la ciudad.

Diversos autores en la literatura han identificado un gran número de parámetros característicos que permiten evaluar que tan representativo es un ciclo de conducción, sin embargo, cuando se quiere construir un ciclo no se pueden utilizar todos estos, ya que, si se utilizaran, la construcción nunca sería posible, porque el algoritmo nunca llegaría a converger, es por esto que se escogen los parámetros más representativos, en donde para el método propuesto serian el porcentaje de tiempo en ralentí, el consumo específico de combustible y el tiempo de duración del ciclo, como se muestra en la *Figura 22*.

Figura 22. Algoritmo del método Micro-trips Fuel Based Method



Fuente. Elaboración propia en base a la referencia [25]

Para la ejecución de las etapas del algoritmo propuesto, se agruparon los 82 viajes mencionados en la sección 3.3, para de esta forma contar con la base de datos global que representan el patrón de conducción de los vehículos monitoreados. A partir de esto se realiza el cálculo de los parámetros característicos de la muestra objetivo. Las ecuaciones de la *Tabla 8* se aplican al perfil de velocidad que consta de n filas de datos de tiempo en segundos t_i $(1 \leq i \leq n)$ y velocidad v_i en km/h, con $(1 \leq i < n)$ [30].

Tabla 8. Cálculo de los parámetros característicos en cada viaje

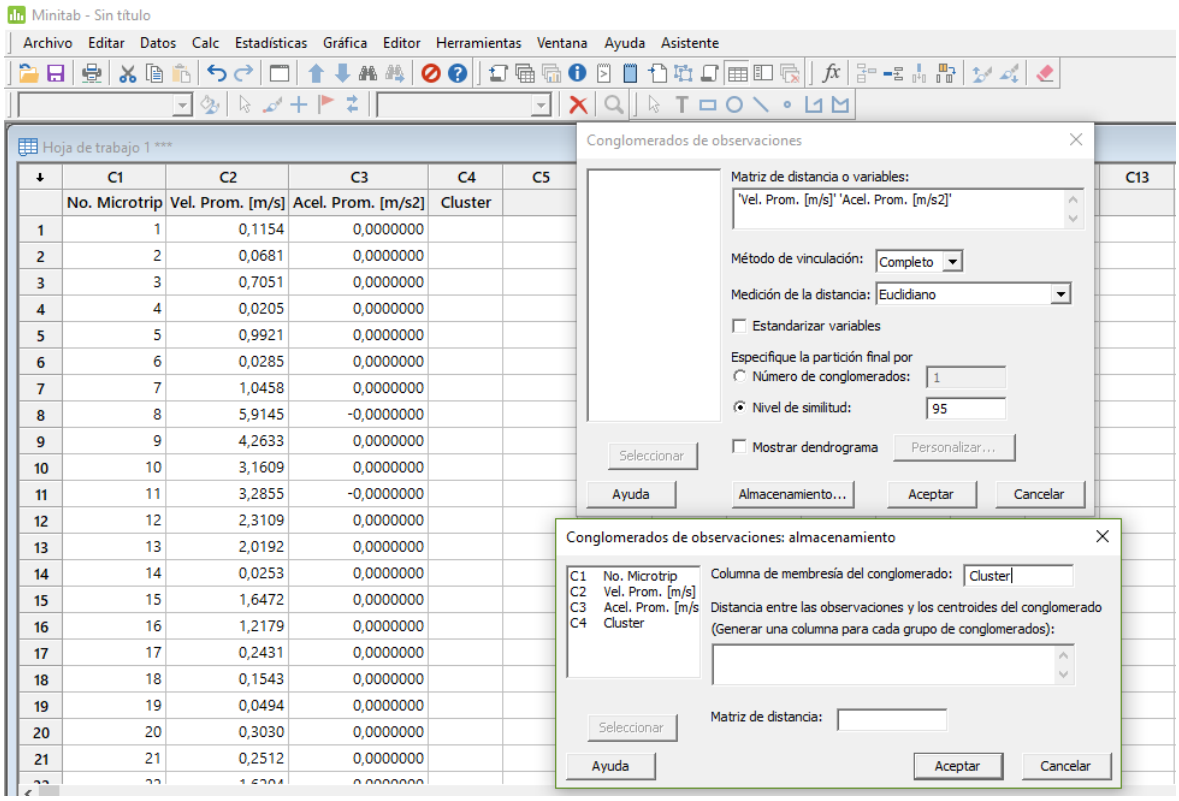
Relacionado con distancia	Distancia total	$dist = (t_2 - t_1)\frac{v_1}{3{,}6} + \sum_{i=2}^{n}(t_i - t_{i-1})\frac{v_i}{3{,}6}$	*(1)*
Relacionado con tiempo	Tiempo total	$T_{total} = t_2 - t_1 + \sum_{i=2}^{n}(t_i - t_{i-1})$	*(2)*
	Tiempo de crucero	$T_{cru} = T_{total} - T_{acc} - T_{des} - T_{det}$	*(3)*
	Tiempo de conducción empleado acelerando	$T_{acc} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (a_1 > acc_límite) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n}\begin{cases} t_i - t_{i-1} & (a_1 > acc_límite) \\ 0 & (else) \end{cases}$	*(4)*
	Tiempo de conducción empleado desacelerando	$T_{des} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (a_1 < -acc_límite) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n}\begin{cases} t_i - t_{i-1} & (a_1 < -acc_límite) \\ 0 & (else) \end{cases}$	*(5)*
	Tiempo detenido	$T_{det} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (v_1 = 0 \wedge a_1 = 0) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^{n}\begin{cases} t_i - t_{i-1} & (v_1 = 0 \wedge a_1 = 0) \\ 0 & (else) \end{cases}$	*(6)*
	% de tiempo crucero	$\%_{cru} = 100 - T_{acc} - T_{des} - T_{det}$	*(7)*
	% de tiempo acelerando	$\%_{a+} = \frac{T_{acc}}{T_{total}} x\ 100$	*(8)*

	% de tiempo desacelerando	$\%_{a-} = \frac{T_{des}}{T_{total}} x\ 100$	(9)
	% de tiempo ralentí	$\%_{idl} = \frac{T_{det}}{T_{total}} x\ 100$	(10)
Relacionado con velocidad	Velocidad promedio	$Ave_s = \frac{dist}{T_{total}}$	(11)
	Desviación estándar de la velocidad	$SD_s = \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} {v_i}^2}$	(12)
Relacionado con aceleración	Aceleración promedio	$Ave_{a+} = \left(\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases}\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases}$	(13)
	Desaceleración promedio	$Ave_{a-} = \left(\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases}\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases}$	(14)
	Desviación estándar aceleración	$SD_{a+} = \sigma_{a+} = \sqrt{\frac{1}{n_{a+}-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}{a_i}^2 & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases}}, donde \quad n_{a+} = \sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > 0)\\ 0 & (else)\end{cases}$	(15)
	Desviación estándar desaceleración	$SD_{a-} = \sigma_{a-} = \sqrt{\frac{1}{n_{a-}-1}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}{a_i}^2 & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases}}, donde \quad n_{a-} = \sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i < 0)\\ 0 & (else)\end{cases}$	(16)
	Número de aceleraciones	$acc_{nr} = \sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1 & (a_i > acc_{límite} \wedge\ a_{i-1} \leq acc_límite\ )\\ 0 & (else)\end{cases}$	(17)
Dinámicas	Número de aceleraciones por km	$Accel/km = 1000\ x\ \frac{acc_{nr}}{dist}$	(18)

	Raíz media cuadrática	$RMS_a = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert a_i\rvert^2}$	*(19)*
	Energía cinética positiva	$PKE = \frac{1}{dist}\sum_{i=2}^{n} \begin{matrix} {v_i}^2 - v_{i-1}^2 & (v_1 > v_{i-1}) \\ 0 & (else) \end{matrix}$	*(20)*
	Potencia específica del vehículo	$VSP = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot (1{,}1 * a_i + 9{,}81 + 0{,}132) + 3{,}02 \cdot 10^{-4} \cdot (v_i + v_w)^2 \cdot v_i$	*(21)*
	Intensidad cinética	$KI = \left(\sum_{i=1}^{n} \begin{cases} 0{,}5 \cdot \left({v_i}^2 - v_{i-1}^2\right) & \left(0{,}5 \cdot \left({v_i}^2 - v_{i-1}^2\right)\right) > 0 \\ 0 & else \end{cases}\right) x \frac{1000}{\sum_{i=2}^{n}(v_i^3 + \left(v_i^2 \cdot v_{i-1}\right) + (v_i \cdot v_{i-1}^2) + v_{i-1}^3)/4}$	*(22)*
Consumo de combustible	Consumo de combustible específico	$SFC = \frac{\sum_i^n IFC_i}{dist}$	*(23)*
Fuente. Elaboración propia con base a las referencias [30, 54]			

Una vez calculado los CPs del patrón de conducción, se procede a realiza la división de los viajes en micro segmentos, delimitados por una velocidad del vehículo igual a 0 (ver sección 1.3.1.1). Luego se realiza la agrupación de los micro segmentos de acuerdo con la velocidad y aceleración promedio de cada uno, utilizando la herramienta estadística Minitab 18, la cual permite generar clústeres de acuerdo a la similitud que hay entre los datos (*Figura 23*), para de esta forma determinar la distribución de probabilidad que tiene el clúster, y así mismo los micro segmentos que se agrupan, con la Ecuación *(24)*.

Figura 23. Clusterización de los Micro-trips a partir del análisis de conglomerados en software Minitab 18



Fuente. Elaboración propia

$$P_{Cluster_i} = \frac{Casos\ Favorables}{Casos\ Posibles} \qquad (24)$$

Posteriormente, la selección cuasi-aleatoria se realiza como se muestra en los siguientes pasos:

Paso 1: generación de un numero aleatorio entre 0 a 1.

Paso 2: selección del primer clúster con la probabilidad acumulada mayor al número generado.

Paso 3: identificación de la cantidad de micro viajes que pertenecen al clúster seleccionado.

Paso 4: generación de un numero aleatorio entre el 1 y el número máximo de micro viajes dentro del clúster.

Paso 5: Selección del micro viaje de acuerdo con el numero generado anteriormente.

El proceso de empalme de los micro segmentos, se realiza repitiendo los pasos anteriores hasta que se cumple con la condición de parada, es decir, hasta que se obtiene un conjunto de micro viajes con un tiempo entre los 1140 y 1360 segundos; al satisfacer esta condición los micro segmentos entran a considerarse como un ciclo de conducción candidato, al cual se le calculan sus parámetros característicos (CP_i*) para después evaluar si satisfacen con la condición de convergencia, comparando los dos parámetros característicos que se muestran en la *Tabla 9*.

Finalmente, ya que el método propuesto mantiene la naturaleza estocástica, es decir, se obtienen diferentes ciclos de conducción representativos cada vez que se ejecuta el algoritmo, se calcula la diferencia relativa en cada iteración, entre los parámetros característicos del ciclo de conducción (CP_i^*) y los parámetros característicos de la muestra global ($\overline{CP_i}$), de acuerdo con la Ecuación *(25)*. Para esto, se seleccionaron 19 parámetros característicos que se utilizaran para verificar la representación de los ciclos obtenidos. En la *Tabla 10* se presentan los valores de referencia para para realizar la comparación respetiva. Las diferentes etapas del algoritmo propuesto se desarrollan en el software comercial Matlab 2017a y se plasman en 871 líneas de código (ANEXO A).

$$RD_I = \sum_{j=1}^{n} \frac{(CP_i^* - \overline{CP_i})}{\overline{CP_i}} \qquad (25)$$

3.4.1 Ciclo de conducción representativo

Uno de los objetivos específicos de este trabajo es obtener un ciclo de conducción representativo del patrón de manejo de la ciudad, además de evaluar la capacidad de representar el consumo de combustible que exhiben los vehículos en la región, por lo tanto,

y como se mencionó anteriormente, para cada CP considerado en este estudio, se calculó la diferencia relativa (RD_I) entre los CP_i^* del ciclo y el $\overline{CP_i}$ de la muestra de viajes monitoreados para determinar la dispersión de los datos con la Ecuación *(26)(25)* y el ARD_I con la Ecuación *(26)* para poder comparar el valor que se obtiene con el método propuesto.

$$ARD_I = \sum_{j=1}^{n} \frac{(CP_i^* - \overline{CP_i})}{n\overline{CP_i}} \qquad (26)$$

Por lo tanto, para seleccionar el ciclo de conducción para la región de estudio se escoge aquel con la mínima diferencia entre los parámetros característicos seleccionados que se presentan en la *Tabla 9*. En donde para considerarse como realmente representativo del patrón de manejo, su diferencia relativa entre los parámetros característicos, se debe encontrar entre un 5-20% [38, 40, 55, 56].

Un aspecto crucial en el proceso de evaluación del método propuesto, está en la naturaleza del mismo (estocástico), es por esto, que para superar esta complicación y de acuerdo con las referencias [25, 44], se repitió el proceso de construcción de DC varias veces y se observó la diferencia relativa promedio obtenida ($ARDi$) de diferentes parámetros característicos, después de 100, 500 y 1000 iteraciones de la aplicación del método. La

Figura 24.a-b muestran como ejemplo las ARD obtenidas para los CPs relacionados con la velocidad y modos de operación después de diversas iteraciones de la aplicación del método propuesto (MTFBM), ambas figuras muestran el intervalo de confianza de la variación de las ARD. Por lo tanto, para cuestiones de este estudio se informarán las ARD iguales a 1000 iteraciones, además de utilizar el rango intercuartíl (IQR) como una métrica para la dispersión y presentación de los resultados en términos de graficas de cajas y bigotes.

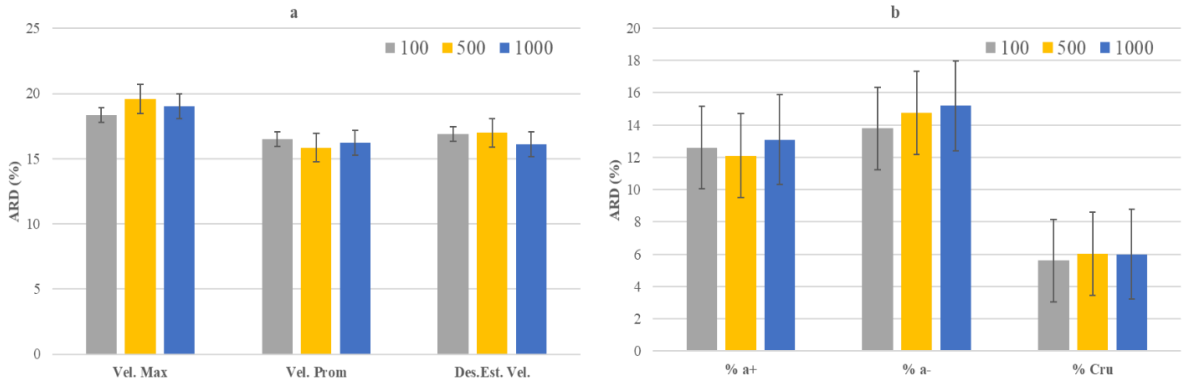
En conclusión, el método propuesto se evaluó con respecto a la capacidad de i) describir los patrones de manejo de la región de estudio y ii) la representación del consumo de combustible de los vehículos analizados.

Tabla 9. Parámetros característicos (CPs) y variables de consumo de combustible para la validación del método (MTFBM) en la construcción de ciclos de conducción (DC)

Parámetro Característicos (CP)		Símbolo	Unidades
Velocidad	Velocidad promedio	Ave S	m/s
	Velocidad máxima	Max S	m/s
	D. E. velocidad	SD S	m/s
Aceleración	Aceleración máxima	Max a+	m/s^2
	Desaceleración máxima	Max a-	m/s^2
	Aceleración promedio	Ave a+	m/s^2
	Desaceleración promedio	Ave a-	m/s^2
	D. E. aceleración	SD a+	m/s^2
	D. E. desaceleración	SD a-	m/s^2
Modos de operación	**Porcentaje en ralentí ***	% idl	%
	Porcentaje acelerando	% a+	%
	Porcentaje desacelerando	% a-	%
	Porcentaje en crucero	% cru	%
Dinámicas	Número de aceleraciones por kilometro	Accel/km	km^{-1}
	Raíz media cuadrática	RMS	m/s^2
	Energía cinética positiva	PKE	m/s^2
	Potencia específica del vehículo	VSP	
	Intensidad cinética	KI	
Consumo de combustible	**Consumo específico de combustible ***	SFC	L/km

*Los CPs en negrita representan las variables utilizadas por el método especificado como criterios de evaluación para la construcción de ciclos de conducción representativos

Figura 24. Valores de ARD e intervalos de confianza para algunos CPs con diferente número de iteraciones. CPs relacionados con: a) velocidad y b) modos de operación, cuando se aplica el método MTFBM



Fuente. Elaboración propia

3.4.2 Estrategias de conducción eficiente

En el proceso de analizar las estrategias estudiadas en los vehículos livianos alrededor del mundo, se determinó que la conducción eficiente es una de las más viables para implementar, ya que su desarrollo y apropiación está orientada al cambio en el comportamiento de los conductores, y su vida útil no está ligada a solo una tecnología vehicular, sino por el contrario, al conocimiento adquirido durante la capacitación e instrucción recibida, por tanto, su beneficio-costo tiende a ser alto [57, 58]. Se ha investigado el efecto de la conducción eficiente realizando recorridos con distancias predeterminadas en un dinamómetro de rodillos, encontrando que realizar cambios suaves de aceleración y mantener una velocidad constante podrían generar una reducción de hasta un 11,7% [59]. Además, según los autores de la referencia [60], los factores en lo que intervienen y controlan los conductores, pueden llegar a representar una reducción del 45% en el consumo de combustible en carretera, un porcentaje significativo que conlleva un mejoramiento en los hábitos de conducción y que vale la pena tener en consideración.

Las características de conducción eficiente y segura son generalmente bien definidas y fácilmente caracterizadas, como lo vimos en la sección 1.4. Las estrategias relevantes tenidas en cuenta para ejecutar la conducción eficiente en los vehículos analizados son [61-64]:

1. Aceleración moderada (con paso de cambio entre 2000 y 2500 revoluciones para aquellos con trasmisiones manuales).
2. Planificación del recorrido y anticipación de la hora pico (alta congestión)
3. Anticipar el flujo de tráfico y señales, con lo cual se evitan arranques y paradas repentinas.
4. Mantener una velocidad constante en la conducción y reducir los tiempos de ralentí.
5. Conducir con seguridad; por debajo del límite de velocidad, eliminando el calentamiento excesivo del motor.
6. Mantenimiento preventivo general del automóvil.
7. Preparar el vehículo para el recorrido, controlando la cantidad de peso en este caso en el platón de los vehículos.

4 DESARROLLO

De acuerdo con lo constatado en secciones anteriores, se presentó que las emisiones de CO2 son un problema crítico que afecta y es promovido por diferentes sectores económicos, y que su relación directa con el consumo de combustible se demuestra a partir de la conservación de masa en el proceso antes y después de la combustión. Es así como diferentes factores constituyen una cadena, en donde las emisiones dependen principalmente del consumo de combustible, y el consumo de combustible del patrón de conducción. Por lo tanto, para abordar parcialmente este problema, el objetivo de esta parte del trabajo es proporcionar resultados de mediciones simultáneas de patrones de manejo y consumo de combustible que permitan mejorar el desempeño del vehículo a partir de la implementación de estrategias específicas para los vehículos en uso que operan en gran parte de la ciudad y están constantemente bajo diferentes condiciones de operación del motor, ocasionado por las múltiples variaciones de las condiciones y demandas viales.

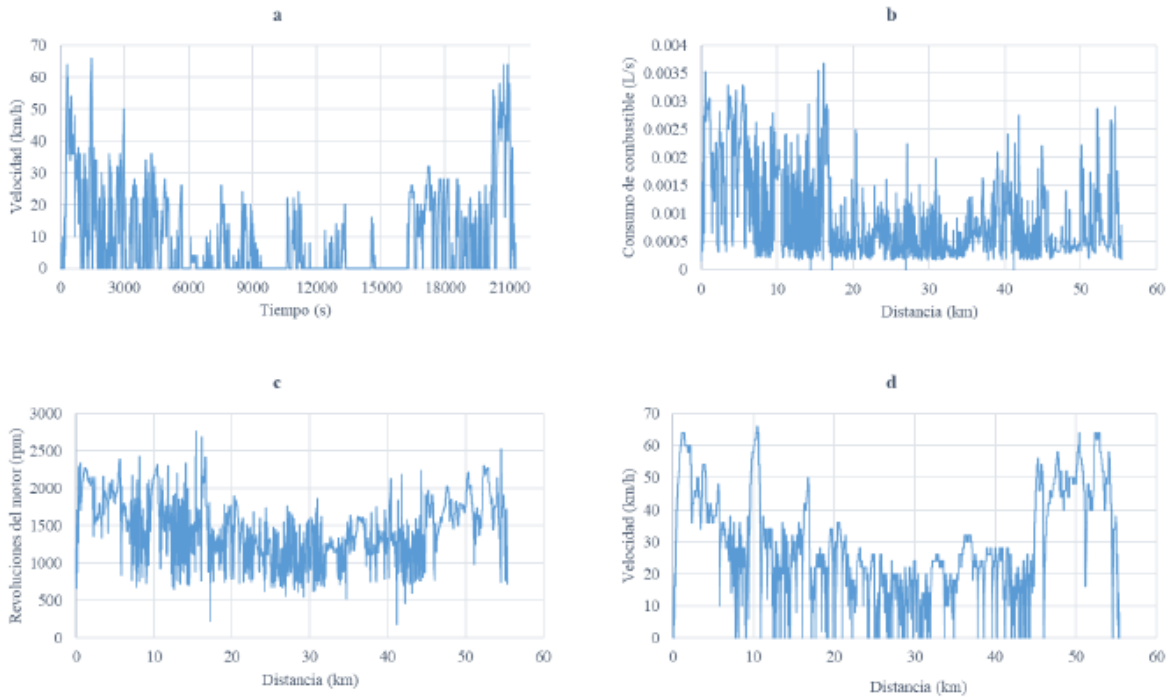
Los resultados de este estudio solo se pueden considerar para los vehículos de la compañía, ya que, para ser considerados como valores de referencia para todas las tecnologías vehiculares presentes en la ciudad de Bucaramanga, se debe cumplir tres factores: i) calidad y cantidad de datos de operación de los vehículos utilizados en la ciudad, ii) el método utilizado para construir el DC y iii) las métricas utilizadas para evaluar la evaluar la representatividad del DC. Dentro de este proyecto se logran cumplir dos de las tres condiciones, en donde el único factor que no se cumple por completo es en la cantidad de vehículos muestreados. Sin embargo, estos resultados si se pueden considerar a pequeña escala dentro de la compañía para implementar temas relacionados con la eficiencia energética de los vehículos.

4.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Las gráficas presentes en la *Figura 25.b-d*. ilustran los perfiles de consumo de combustible, revoluciones del motor y velocidad, en función de la distancia, de un viaje arbitrario obtenido en la región de estudio y el rango de variación de estas variables. En la *Figura 25.a* se muestra que durante los viajes se presentan períodos importantes en los cuales el vehículo se encuentra en un funcionamiento sin variaciones en su velocidad (Tiempo en ralentí), en alrededor de los 3000 segundos, esto se puede corroborar en la *Figura 25.c* en donde en varias ocasiones los vehículos alcanzan puntos por debajo de 1000 revoluciones por minuto (RPM) e inclusive por debajo de 500 RPM. Por último, en la *Figura 25.d se* logra apreciar

que los regímenes de velocidad son bajos, corroborando las velocidades de diseño de la mayoría de las vías de la ciudad, sin embargo, este comportamiento también puede ser ocasionado por la naturaleza de la actividad que realizan los vehículos, lo cual restringe o limita la operación de los vehículos.

Figura 25. Ilustración de los perfiles de a) velocidad en función del tiempo, b) consumo de combustible. c) revoluciones del motor y d) velocidad, en función de la distancia, obtenido de un viaje aleatorio en la región de estudio.



Fuente. Elaboración propia

4.2 DESCRIPCIÓN EL PATRÓN DE MANEJO

Aunque no exista una definición clara para los patrones de manejo, varios autores [25, 55, 56, 65] describen implícitamente los patrones de manejo que siguen los conductores en una región y se representan en términos de un conjunto de parámetros característicos (CP). Los CP son variables basadas en series de velocidad en función del tiempo que describen las características de conducción de los vehículos, como por ejemplo la velocidad promedio, aceleración media positiva, tiempo en ralentí, etc. Actualmente, uno de los objetivos de los investigadores en este campo de acción es lograr determinar el conjunto de CP que describe por completo un patrón de conducción. Esa meta está cada vez más cerca, ya que, a medida que pasa el tiempo y la posibilidad de adquirir más información del vehículo a bajo costo con

una precisión considerablemente ha permitido reducir el número de variables; de acuerdo con esto, en la *Tabla 10* se muestran los CP más utilizados en los estudios realizados, además de los valores respectivos para cada uno de ellos, obtenidos durante la campaña de medición.

Tabla 10. Parámetros característicos (CPs) que describen los patrones de manejo seguidos por los conductores, mientras el consumo de combustible del vehículo era monitoreado.

Parámetro Característicos (CP)		**Símbolo**	**Unidades**	**Bucaramanga**	**ECE 15 + EUDC**	**FTP-75**
Velocidad	Velocidad promedio	Ave S	m/s	2,0788	11,4167	8,1139
	Velocidad máxima	Max S	m/s	16,1111	33,3583	25,3028
	D. E. velocidad	SD S	m/s	3,4691	8,1472	6,5306
Aceleración	Aceleración máxima	Max a+	m/s^2	4,4444		
	Desaceleración máxima	Max a-	m/s^2	-5,5556		
	Aceleración promedio	Ave a+	m/s^2	1,1132	0,3240	0,4200
	Desaceleración promedio	Ave a-	m/s^2	-1,1935	-0,4000	-0,4570
	D. E. aceleración	SD a+	m/s^2	0,7298	0,2600	0,4230
	D. E. desaceleración	SD a-	m/s^2	0,8419		
Modos de operación	Porcentaje en ralentí	% idl	%	59,9016	20,9100	12,8600
	Porcentaje acelerando	% a+	%	6,2289	27,1300	36,4500
	Porcentaje desacelerando	% a-	%	5,7590	19,7500	30,6300
	Porcentaje en crucero	% cru	%	26,8426	32,2100	20,0600
Dinámicas	Número de aceleraciones por kilometro	Accel/km	km^{-1}	29	16	61
	Raíz media cuadrática	RMS	m/s^2	0,4703	0,1310	0,1900
	Energía cinética positiva	PKE	m/s^2	0,2887		
	Potencia específica del vehículo	VSP		21,7505		
	Intensidad cinética	KI		1,9064		

*D.E.: Desviación estándar, FTP-75: Procedimiento de prueba federal

*$PKE = \frac{1}{L}\sum_{i=2}^{n} {v_i}^2 - {v_{i-1}}^2$, para $v_i > v_{i-1}$, de otra forma $PKE = 0$. L es la distancia recorrida y v_i es la velocidad del vehículo en el segundo i.

En la *Tabla 10* se puede ver que los parámetros característicos de los ciclos europeo (ECE 15 + EUDC) y americano (FTP-75) no logran describir el patrón de manejo de una región en específico, en este caso Bucaramanga, y que por lo tanto solo deben ser utilizados con fines de homologación; confirmando así la problemática y necesidad planteadas en este estudio. En la tabla también se observa como las aceleraciones pueden lograr valores superiores a los (4 m/s^2), lo que plantea la posibilidad de que se generan cambios abruptos de velocidad provocada por la prolongada exposición en ralentí que representa más del 50% del tiempo de operación de los vehículos, esta hipótesis se puede justificar con el poco tiempo que pasan los vehículos en los regímenes de aceleración.

El objetivo de comparar el patrón de manejo obtenido de las mediciones realizadas con respecto a los referentes mundiales se debe a que estos ciclos son utilizados por el gobierno

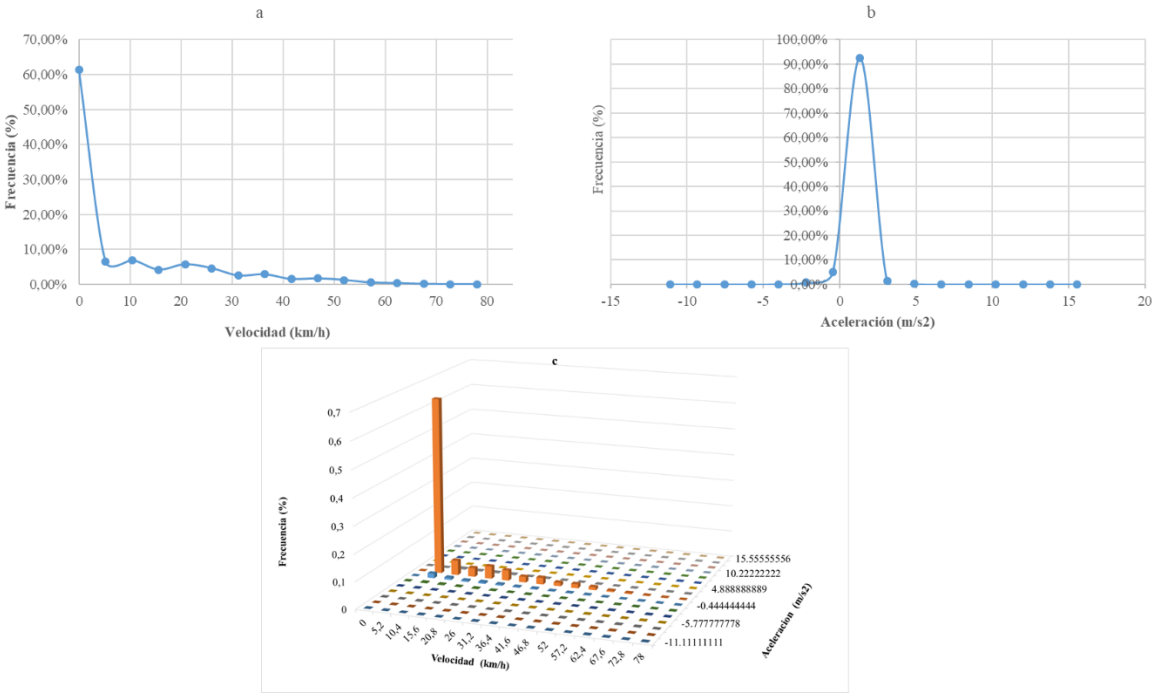
colombiano para evaluar los límites máximos permisibles de emisión para toda fuente móvil (vehículo automotor) con motor a gasolina, que se ensamble o se importe al país para transitar o circular en el territorio nacional, según la resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Algunos investigadores, concuerdan en que los patrones de manejo se pueden describir a partir del porcentaje del tiempo en el que los vehículos pasan en rangos de velocidad y VSP, o rangos de velocidad y aceleración. La

Figura 26.a-c muestran el porcentaje de tiempo que los dos vehículos monitoreados pasaron en cada rango de velocidad, durante las pruebas por diferentes zonas de la ciudad. Estas figuras muestran que, los vehículos pasaron más del 60% del tiempo en ralentí, y que muy pocas veces alcanzan velocidades superiores a los 60 km/h. De igual forma, en la

Figura 26.b se muestra como más del 90% del tiempo de operación, los vehículos se encontraban en un rango de aceleración entre -0,4444 hasta 1.3333 m/s^2. Al agrupar estas dos variables (velocidad y aceleración) en una sola gráfica, podemos ver la distribución de frecuencias de velocidad – aceleración (Speed Acceleration Frecuency Distribución – SAFD) [52], en donde se puede ver una zona muy específica en la que se corrobora que el principal modo de operación de los vehículos es el ralentí.

Figura 26. Descripción del patrón de manejo seguido por los conductores de los vehículos monitoreados, expresado como el porcentaje de tiempo que el vehículo fue conducido en un conjunto de rangos a) velocidad, b) aceleración y c) velocidad y aceleración de los vehículos



Fuente. Elaboración propia

4.2.1 Ciclo de conducción representativo de Bucaramanga

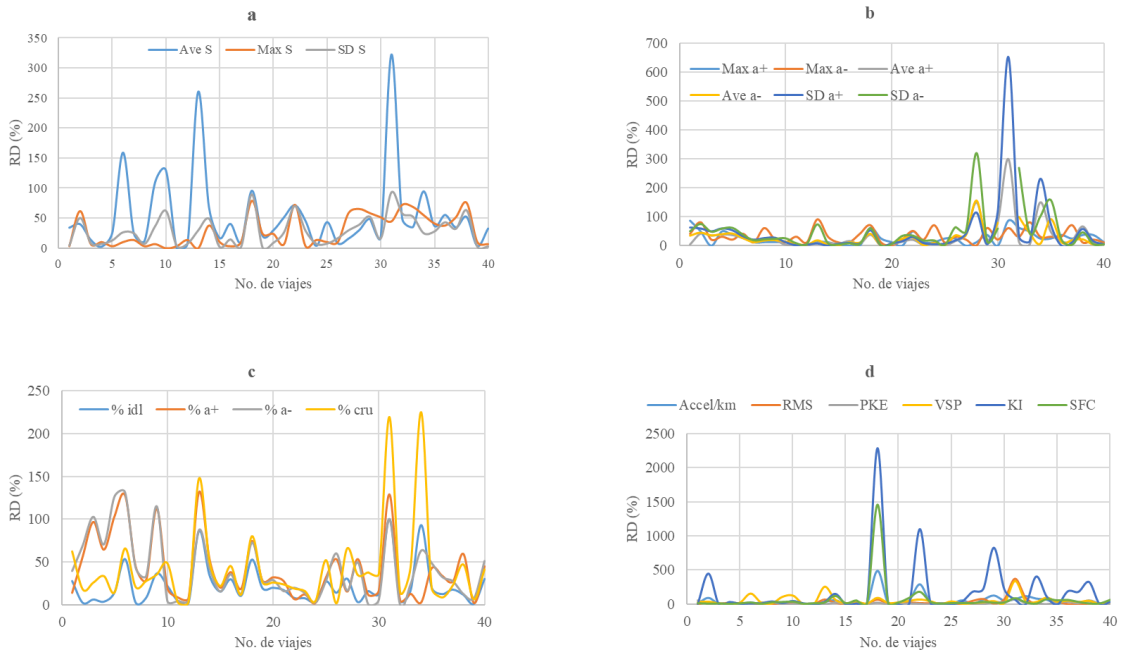
En esta sección el objetivo es demostrar que el DC representativo para la ciudad basado en el método propuesto (Micro-trips Fuel Based Method), exhibe parámetros característicos (CP_i^*) que se aproximan a los parámetros característicos de los viajes muestreados ($\overline{CP_i}$), según las métricas descritas en la sección

La *Figura 27.a muestra* el RD para el caso de las variables de velocidad, en donde la velocidad promedio de los viajes monitoreados, presenta valores superiores a 100% en diferentes ocasiones, lo que quiere decir que en los viajes monitoreados se encuentra muy lejos del comportamiento global de los datos. El mismo comportamiento se observó para aquellos parámetros característicos relacionados con la desviación estándar de la aceleración positiva, el porcentaje de tiempo en crucero y las aceleraciones por kilómetro, en donde al igual que la primera variable, se encuentran picos muy elevados que superan inclusive los 1000 (%). Esto se debe a que el rango potencial de variación del RD es de cero a infinito, y por lo tanto, nos da una idea del orden de magnitud que pueden llegar a tener algunas variables, y el hecho de lograr valores bajos de RD (<20%) indican un alto nivel de similitud [53], lo cual es el caso de variables como la velocidad máxima, la aceleración máxima negativa, la potencia especifica del vehículo, entre otros, como se puede ver en las *Figura 27.b-d*.

El tiempo en ralentí es uno de los CP que cobra gran importancia en este estudio a pesar de influir débilmente en el consumo de combustible, ya que en muchas ocasiones puede considerarse un factor externo o un factor humano no relacionado, teniendo en cuenta que, al movilizarse en los vehículos, los conductores naturalmente no se detienen a menos de que por factores externos los obliguen a hacerlo, sin embargo, ya que la actividad que realizan los vehículos monitoreados requiere que estén realizando paradas constantes, ocasiona que no sea un factor humano, sino por el contrario, un factor representativo de la forma en que se conduce, al menos para esta tecnología vehicular en específico. De acuerdo con esto, el tiempo en ralentí es un factor que en las metodologías presentadas en la (sección 1.3.1) es difícil de representar por completo, es decir, se obtienen valores de ARD superiores al 50% [25, 52]. Sin embargo, la solución planteada en este estudio consistió en el uso de este parámetro característico como un criterio de selección además del consumo de combustible específico para la generación de DC, como se presentó en secciones anteriores.

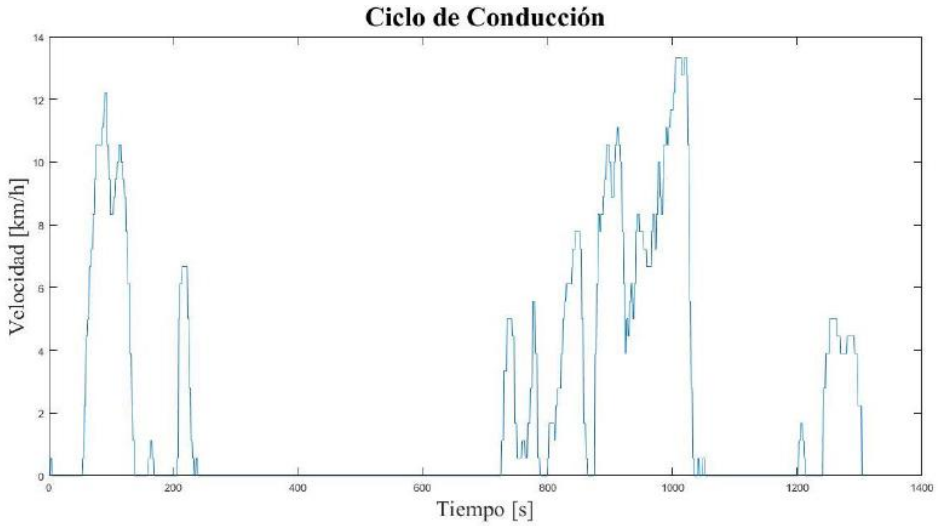
En este orden de ideas, se obtuvo que el ciclo de conducción representativo para la ciudad de Bucaramanga, generado por el método propuesto después de 1000 iteraciones, tiene el perfil de velocidad en función del tiempo que se muestra en la *Figura 28* y tiene las características que aparecen en la *Tabla 11*.

Figura 27. Diferencia relativa (RDi) de los parámetros características (CPs) más comúnmente usados para describir los ciclos de conducción (DC) como una función del número de viajes muestreados para: a) velocidades, b) aceleración, c) modos de operación y d) dinámicas y consumo de combustible especifico



Fuente. Elaboración propia

Figura 28. Ciclo de conducción para la ciudad de Bucaramanga a partir de la tecnología vehicular muestreada



Fuente. Elaboración propia

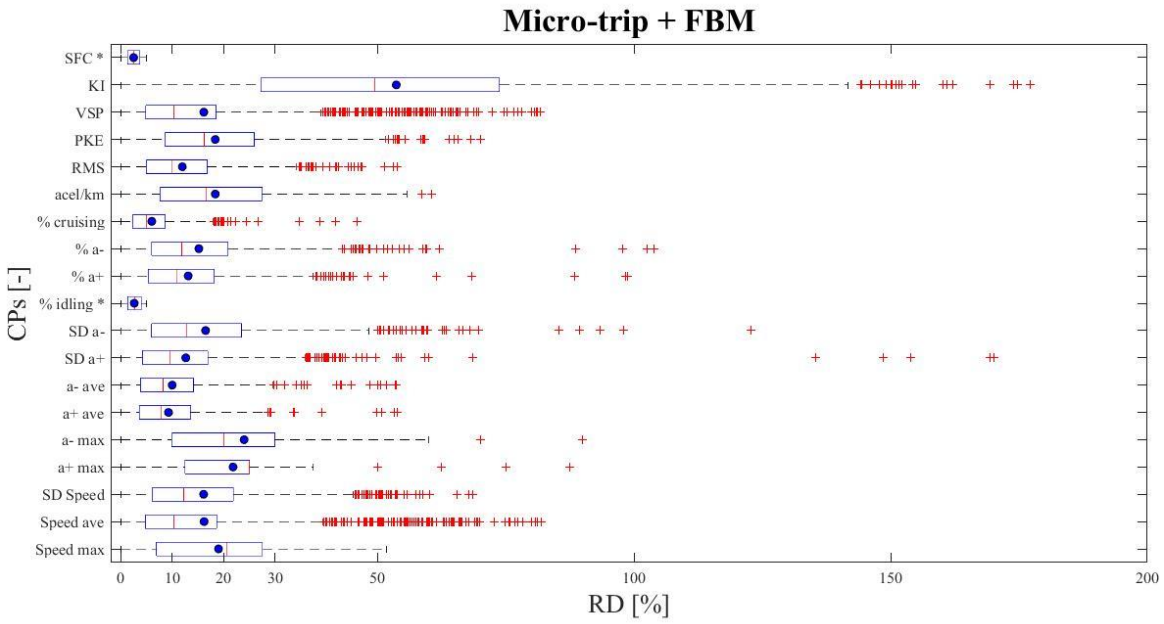
Tabla 11. CPs que describen los patrones de conducción y el consumo específico de combustible descrito en la ciudad. Las diferencias relativas promedio (en porcentaje) observadas entre los CPs después de 1000 iteraciones.

Parámetro Característicos (CP)		**Símbolo**	**Unidades**	**Patrón de Conducción**	**Ciclo de conducción de**	**Diferencia relativa promedio (ARD)**
Velocidad	Velocidad promedio	Ave S	m/s	2,0788	2,2111	16,19496709
	Velocidad máxima	Max S	m/s	16,1111	13,3333	19,00250552
	D. E. velocidad	SD S	m/s	3,4691	3,6198	16,10588851
Aceleración	Aceleración máxima	Max a+	m/s^2	4,4444	4,4444	**21,840684 ***
	Desaceleración máxima	Max a-	m/s^2	-5,5556	-5,0000	**23,998558 ***
	Aceleración promedio	Ave a+	m/s^2	1,1132	1,0328	9,267482449
	Desaceleración promedio	Ave a-	m/s^2	-1,1935	-1,1846	9,974256203
	D. E. aceleración	SD a+	m/s^2	0,7298	0,7476	12,632801
	D. E. desaceleración	SD a-	m/s^2	0,8419	0,8948	16,49485546
Modos de operación	Porcentaje en ralentí	% idl	%	59,9016	62,5000	2,587419543
	Porcentaje acelerando	% a+	%	6,2289	5,9816	13,09436333
	Porcentaje desacelerando	% a-	%	5,7590	5,2147	15,18657908
	Porcentaje en crucero	% cru	%	26,8426	26,3037	6,008052078
Dinámicas	Número de aceleraciones por kilometro	Accel/km	km^{-1}	29	27,0520	18,38484525
	Raíz media cuadrática	RMS	m/s^2	0,4703	0,4595	11,95839078
	Energía cinética positiva	PKE	m/s^2	0,2887	0,2891	18,3673804
	Potencia específica del vehículo	VSP		21,7505	23,1240	16,14341687
	Intensidad cinética	KI		1,9064	1,9126	**53,646066 ***
Consumo de combustible	Consumo específico de combustible	SFC	L/km	0,2197	0,2220	2,470586553

***** Las casillas en negrilla corresponden a los CPs con diferencias relativas superiores al 20%

El uso del consumo de combustible especifico además del tiempo en ralentí como criterios para la construcción de ciclos de conducción aumenta la factibilidad de generar ciclos reales, ya que los resultados experimentales muestran que los DCs basados en estos dos parámetros reproducen el consumo de combustible (por diseño) e implícitamente la mayoría de los CPs, exceptuando la aceleraciones máxima positiva y negativa, al igual que la potencia especifica del vehículo, como se puede ver en la *Figura 29*, en donde los ARDi se muestran como puntos azules, el IQRi por recuadros y los valores atípicos como signos rojos "+". Los CPs utilizados por el método como criterio para la construcción del DC están marcados con (*)

Figura 29. Diagrama de caja y bigotes de las diferencias relativas (RDi) de los CPs que describen los DCs obtenidos por el método propuesto (MTFBM) después de 1000 iteraciones

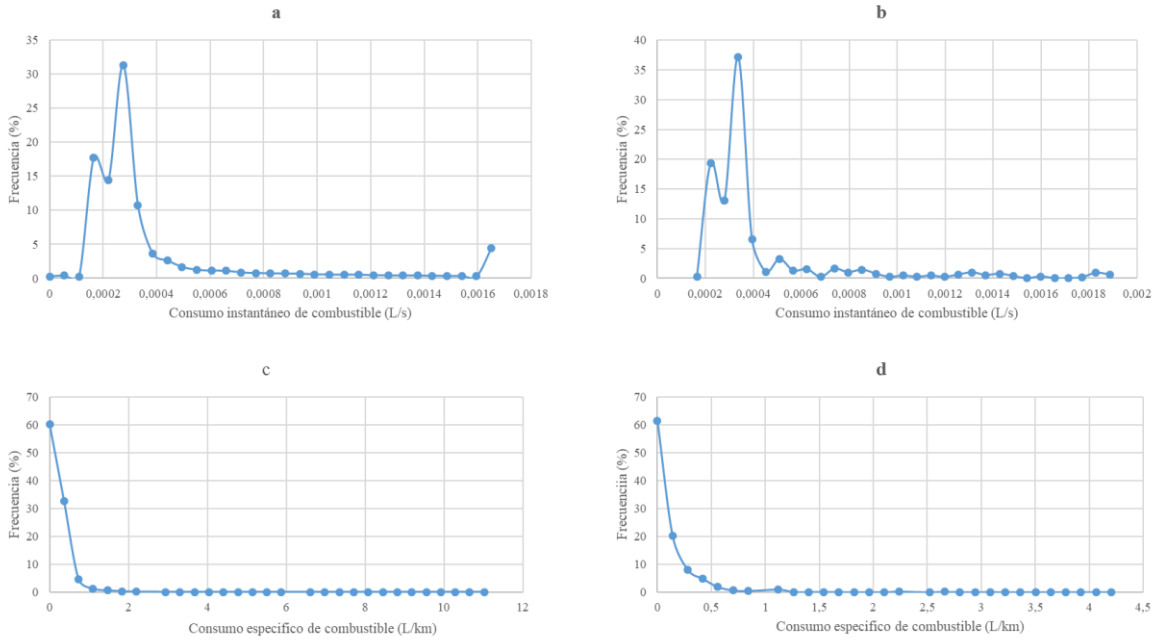


4.2.2 Consumo de combustible

El flujo másico de contaminantes emitidos por los vehículos está directamente relacionado con el consumo de combustible. De acuerdo con esto, el consumo de combustible especifico utilizado como criterio de selección para la obtención de ciclos representativos, garantiza que el valor obtenido sea muy cercano a la población (RD < 5%), esto quiere decir que el consumo de combustible del ciclo representa el consumo de toda la muestra de viajes. Por lo tanto, a continuación, se muestra la distribución del consumo de combustible obtenido por los vehículos monitoreados versus el obtenido a partir del ciclo de conducción para Bucaramanga (*Figura 30*)

La *Figura 30.a-b* muestran que el consumo de combustible instantáneo de la muestra global y el obtenido por el ciclo de conducción de Bucaramanga, describe por completo el comportamiento de los vehículos monitoreados, además de identificar que no se tiene una distribución normal, ocasionada por los múltiples factores que influyen en la variación del consumo, y por lo tanto, no se puede esperar seguir un función de distribución predeterminada.

Figura 30. Resultados de consumo de combustibles instantáneo y su distribución de frecuencia para a) Total de los viajes monitoreados, b) Ciclo de conducción de Bucaramanga y el consumo específico de combustible de c) Total de viajes monitoreados, d) Ciclo de conducción de Bucaramanga.



Estos resultados, confirman el comportamiento del consumo presentado en estudios realizados por el grupo de investigación [44, 53], en donde para representar el consumo de una tecnología vehicular, no se pueden recurrir a medidas de tendencia central como la media o mediana, sino que, por el contrario, debe representarse como un intervalo, entre un rango intercuartilico (Ecuación *(27)*). Ya que si se recurre solo al valor del consumo específico de combustible (*Figura 30.c-d*), no se representaría la distribución multimodal que se tiene. De acuerdo con esto y para propósitos de esta investigación, el valor reportado como consumo de combustible para los vehículos monitoreados será de 0,2220 ± 0,0828 (L/km).

$$IQR = Q_3 - Q_1 \qquad (27)$$

4.3 ESTRATEGIAS DE CONDUCCIÓN EFICIENTE

Las estrategias presentadas en la sección 3.4.2 se pueden clasificar como se muestra en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Estrategias organizacionales y operacionales

Componente	Estrategia
Organizacional	Planificación del recorrido y anticipación de las horas de alta congestión.
	Anticipar el flujo de tráfico y señales de tránsito, con lo cual se evitan arranques y paradas repentinas.
	Conducir por debajo del límite de velocidad, eliminando el calentamiento excesivo del motor.
	Mantenimiento preventivo general de los vehículos.
	Preparación del vehículo para los recorridos, controlando la cantidad de peso extra.
Operacional	Aceleración moderada, con cambios de marcha entre las 2000 y 2500 revoluciones.
	Mantener una velocidad constante, además de reducir los tiempos excesivos en ralentí.

Las estrategias organizacionales dependen en gran medida de la planeación y compromiso de la empresa, para su integración y socialización con los diferentes conductores. Por otra parte, la estrategias relacionadas con la optimización de la operación del motor (Estrategias 6 y 7), necesitan implementar una metodología de pruebas para la medición del impacto ambiental y de consumo de energía, generado por la ejecución de las estrategias, lo que requeriría de equipos presentes en un laboratorio de homologación (sección 1.2) que midan y representen los factores que afectan la eficiencia del vehículo, tales como la carga, infraestructura y topografía vial, entre otros [66, 67]. Además, se debe estructurar un plan de capacitación, en donde se incluyan temas teóricos relacionados con la eficiencia del motor, consumo especifico de combustible, ciclos de conducción, entre otros, así como de la aplicación de forma teórico-práctica de las técnicas de conducción eficiente.

Por cuestiones de tiempo y del alcance de este proyecto, la estrategia de conducción eficiente está sujeta al comportamiento obtenido durante la campaña de medición, esto quiere decir, que se planteara una situación hipotética en la cual se espera que los conductores sigan a cabalidad en la operación normal de los vehículos, por lo tanto, esto no fue validado con ninguna metodología, ni tampoco con una nueva campaña de monitoreo una vez se implementara la estrategia. En este orden de ideas, teniendo en cuenta la explicación de los conceptos básicos y los diferentes tipos de estrategias que se pueden considerar a la hora de manejar, descritos en las secciones 1.4 y 3.4.2 respectivamente, se hizo énfasis en aquella que de acuerdo con los resultados obtenidos tiene un gran impacto en los vehículos de la compañía analizados y esta es:

- Reducir el tiempo en ralentí

Al ser una variable dependiente del comportamiento humano, es un factor que requiere de una reestructuración en los hábitos de conducción, sin embargo, para cuestiones de este proyecto se asumirá que los conductores apagaran el vehículo si pasan un tiempo superior a al calculado en base al tiempo en ralentí de los ciclos de conducción estándar desarrollados en el mundo (*Tabla 13*), El énfasis se realizará en esta variable ya que presento un comportamiento muy elevado de acuerdo con las características del ciclo de conducción representativo obtenido, como se puede ver en la *Tabla 11*, además de ser una estrategia considerada por diferentes estudios e informes basados en conducción eficiente, como un variable importante a la hora de reducir el consumo de combustible [45, 47, 68].

Tabla 13. Tiempo de duración de la operación en ralentí de diferentes ciclos de conducción

Ciclo de conducción estándar	**Tiempo en ralentí [s]**
NEDC	240,01
WLTC	340,20
FTP-75	241,38
JP 10-15	172,00
CALCULADO *	248

Con el fin de cuantificar el ahorro potencial que se tendría si los conductores logran controlar el tiempo en ralentí, se utilizó la representación sintetizada del patrón de conducción de los vehículos monitoreados descrito en el ciclo de conducción representativo obtenido (*Figura 28*). De acuerdo con el tiempo de duración del ciclo obtenido (1304 segundos), se planteó limitar el tiempo en ralentí de un 62.5% (815 segundos) a un 19.04% (248 segundos), esto quiere decir que los vehículos solo permanecerán un tiempo máximo de 248 segundos detenidos sin cambios en su aceleración. Una vez hecho esta salvedad, fue necesario utilizar el consumo de combustible instantáneo del ciclo de conducción, presentado en el ANEXO B, para medir y cuantificar el ahorro; ya que si se utiliza el consumo especifico, este valor seria cero debido a que no se recorre ninguna distancia, como se pudo ver en la *Figura 30.a-d*. En el ANEXO B, se presenta una tabla con los parámetros como el tiempo de conducción y el consumo instantáneo de combustible tanto para el ciclo de conducción original, como el modificado para la materialización del ahorro, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14. Materialización del ahorro potencial para los vehículos monitoreados

Ciclo de conducción	**Tiempo en ralentí (% - s)**	**Consumo instantáneo de combustible (L/s)**	**Ahorro potencial (Gal)**
Normal	62,5% - 814	0,2406247	11,73768272
Calculado	19,04% - 248	0,1622614	

Esto quiere decir que, para los vehículos de la entidad lograr efectuar acciones respectivas para reducir los periodos prolongados en los que los conductores mantienen el motor encendido sin ningún movimiento, puede llegar a representar una reducción de ~ 11,74 galones, qué en términos de la operación normal, se reflejaría en que ya no se realizaría la renovación del combustible cada semana sino cada semana y media.

5 CONCLUSIONES

- El método propuesto para la generación de ciclos de conducción representativos para la empresa bajo rutas aleatorias logra representar en un **82,5%** el patrón de conducción global, esto quiere decir que tiene el potencial de generar ciclos con diferencias relativas (RDi) entre los parámetros características del ciclo (CP_i^*) y el patrón de conducción ($\overline{CP_i}$) inferiores al 20%. Sin embargo, aún se debe lograr obtener una representación de variables como las aceleraciones positivas y negativas, al igual que la intensidad cinética (KI).

- El consumo específico de combustible (SFC) obtenido a partir del ciclo de conducción para los vehículos monitoreados en su operación normal dentro de la ciudad de Bucaramanga es de **0,220 ± 0,0828** (L/km), este valor es bajo debido a los grandes periodos de tiempo en el que los vehículos permanecen encendidos sin trasladarse, lo que ocasiona que el vehículo mantenga un régimen de consumo mínimo, por tiempos superiores a 13 minutos, muchas veces provocado por los sistemas auxiliares incorporados en los vehículos (aire acondicionado).

- Se ha logrado determinar un potencial de ahorro del **12,46%** del consumo de combustible de los vehículos monitoreados, limitando el tiempo en el que los conductores permanecen dentro de la cabina sin cambios en la posición (Tiempo en ralentí) y con el sistema de acondicionamiento encendido. En especial, porque este representa más del 60% del tiempo de operación de los vehículos.

6 RECOMENDACIONES

- El porcentaje de representatividad del método propuesto (MTFBM), puede mejorarse si se logra incrementar la cantidad de vehículos muestreados y la duración de la campaña de medición por tiempos superiores a un año, además de considerar el efecto de la variación en la pendiente. Lo que permitiría cumplir con el único factor en el cual se presentan falencias en esta investigación (calidad y cantidad de los datos de operación de los vehículos utilizados en la ciudad).

- Si se quieren realizar inventarios de emisiones locales, utilizando la metodología propuesta, se deben realizar primero pruebas con dispositivos portátiles como los PEMS (Portable Emission Measurement Systems) que permitan realizar una validación de la representatividad de los ciclos de conducción obtenidos por el método propuesto para las emisiones de contaminantes de las tecnologías vehiculares analizadas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] International Energy Agency, "CO2 Emissions from Fuel Combustion: Highlights," pp. 166, 2018.

[2] World Health Organization, "WHO Global Ambient Air Quality Database (update 2018)," vol. 2019, 2018.

[3] U. Tietge, P. Mock, J. German, A. Bandivadekar and N. Ligterink, "From Laboratory to Road a 2017 Update of Official and “Real-World” Fuel Consumption and CO2 Values For Passenger Cars in Europe," pp. 62, 2015.

[4] R. Astudillo, "Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca," pp. 115, 2016.

[5] M. Zhou, H. Jin and W. Wang, "A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 49, pp. 203-218, 2016.

[6] M. Sivak and B. Schoettle, "Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy," Transport Policy, vol. 22, pp. 96-99, 2012.

[7] Y. Huang, E.C.Y. Ng, J.L. Zhou, N.C. Surawski, E.F.C. Chan and G. Hong, "Eco-driving technology for sustainable road transport: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 93, pp. 596-609, 2018.

[8] IEA, "CO2 Emissions From Fuel Combustion: Overview," pp. 14, 2017.

[9] U. Tietge, P. Mock, V. Franco and N. Zacharof, "From laboratory to road: Modeling the divergence between official and real-world fuel consumption and CO2 emission values in the German passenger car market for the years 2001–2014," Energy Policy, vol. 103, pp. 212-222, 2017.

[10] International Energy Agency, "Transport, Energy and CO2," Huss., pp. 418, 2009.

[11] Ministerio de Minas y Energía, "Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017 - 2022," pp. 157, 2016.

[12] IDEAM, PNUD, MADS, DNP and CANCILLERIA, "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia." pp. 36, 2015.

[13] International Energy Agency, "International Comparison of Light-Duty Vehicle Fuel Economy 2005-15," pp. 133, 2017.

[14] International Energy Agency, "Market Report Series: Energy efficiency 2017," pp. 143, 2017.

[15] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2015," pp. 418, 2015.

[16] International Energy Agency, "Energy Efficiency Indicators: Highlights," pp. 191, 2018.

[17] International Energy Agency, "Technology Roadmap - Fuel Economy of Road Vehicles," 2012.

[18] T.M.I. Mahlia, S. Tohno and T. Tezuka, "A review on fuel economy test procedure for automobiles: Implementation possibilities in Malaysia and lessons for other countries," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 4029-4046, 2012.

[19] Global Fuel Economy Iniciative, "Fuel Economy State of the World 2016 - Time for global action," 2016.

[20] N.E. Ligterink and A.R.A. Eijk, "Update analysis of real-world fuel consumption of business passenger cars based on Travelcard Nederland fuelpass data," Jan 1,. 2014.

[21] L. Ntziachristos, G. Mellios, D. Tsokolis, M. Keller, S. Hausberger, N.E. Ligterink and P. Dilara, "In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe," Energy Policy, vol. 67, pp. 403-411, 2014.

[22] G.O. Duarte, G.A. Gonçalves and T.L. Farias, "Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 44, pp. 43-54, 2016.

[23] S. Zhang, Y. Wu, H. Liu, R. Huang, P. Un, Y. Zhou, L. Fu and J. Hao, "Real-world fuel consumption and CO2 (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China," Energy, vol. 69, pp. 247-257, 2014.

[24] Ministre de l'environnement de l'énergie et de la mer, "Contrôles des émissions de polluants atmosphériques et de CO2," 2016.

[25] J. Huertas, L. Quirama, M. Giraldo and J. Díaz, "Comparison of Three Methods for Constructing Real Driving Cycles," Energies, vol. 12, pp. 665, Feb 19,. 2019.

[26] G. Kadijk, R.P. Verbeek, R.T.M. Smokers, J.S. Spreen, A.F. Patuleia and M.G.v. Ras, "Supporting Analysis regarding Test Procedure Flexibilities and Technology Deployment for Review of the Light Duty Vehicle CO2 Regulations," European Commission., 2012.

[27] ICCT, "Quantifying the impact of real-world driving on total CO2 emissions from UK cars and vans: final report for The Committee on Climate Change," 2015.

[28] G. Fontaras, N. Zacharof and B. Ciuffo, "Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 60, pp. 97-131, 2017.

[29] U. Tietge, N. Zacharov, P. Mock, V. Franco, J. German, A. Bandivadekar, N.E. Ligterink and U. Lambrecht, "From Laboratory to Road. A 2015 update of official and real-world fuel concumption and CO2 values for passenger cars in Europe," International Council on Clean Transportation Europe., 2015.

[30] T. Barlow, S. Latham, I. Mccrae and P. Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions," TRL Published Project Report., pp. 280, 2009.

[31] J. Brady and M. O'Mahony, "Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas," Applied Energy, vol. 177, pp. 165-178, 2016.

[32] T. NUTRAMON and C. SUPACHART, "Influence of driving cycles on exhaust emissions and fuel consumption of gasoline passenger car in Bangkok," Journal of Environmental Sciences, vol. 21, pp. 604-611, 2009.

[33] H. Achour and A.G. Olabi, "Driving cycle developments and their impacts on energy consumption of transportation," Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 1778-1788, 2016.

[34] A. Ashtari, E. Bibeau and S. Shahidinejad, Using Large Driving Record Samples and a Stochastic Approach for Real-World Driving Cycle Construction: Winnipeg Driving Cycle, 2014, pp. 170-183.

[35] P. Pérez and C. Quito, "Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca," pp. 132, 2018.

[36] F. Quinchimbla and J. Solis, "Desarrollo de ciclos de conducción en ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real de combustible de un vehículo con motor de ciclo otto en el distrito metropolitano de Quito." pp. 163, 2017.

[37] DieselNet, "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)," vol. 2019, 2019.

[38] S. Ho, Y. Wong and V.W. Chang, "Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions," Atmospheric Environment, vol. 97, pp. 353-362, 2014.

[39] Q. Shi, Y. Zheng, R. Wang and Y. Li, "The study of a new method of driving cycles construction," Procedia Engineering, vol. 16, pp. 79-87, 2011.

[40] W.T. Hung, H.Y. Tong, C.P. Lee, K. Ha and L.Y. Pao, "Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 12, pp. 115-128, 2007.

[41] H. Tong and W. Hung, "A Framework for Developing Driving Cycles with On-Road Driving Data," Transport Reviews, vol. 30, pp. 589-615, 2010.

[42] J.D.K. Bishop, C.J. Axon and M.D. McCulloch, "A robust, data-driven methodology for real-world driving cycle development," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 17, pp. 389-397, 2012.

[43] Z. Xiao, Z. Dui-Jia and S. Jun-Min, "A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles," Energy Procedia, vol. 16, pp. 1868-1873, 2012.

[44] J. Huertas, M. Giraldo, L. Quirama and J. Díaz, "Driving Cycles Based on Fuel Consumption," Energies, vol. 11, pp. 3064, Nov 7,. 2018.

[45] IDAE, "Manual de Conducción Eficiente para Conductores del Parque Móvil del Estado," pp. 39, 2002.

[46] IDAE, "Cómo conducir de manera eficiente," pp. 30, 2003.

[47] IDAE, "La Conducción Eficiente," pp. 34, 2005.

[48] J.I. Huertas, J. Díaz, M. Giraldo, D. Cordero and L.M. Tabares, "Eco-driving by replicating best driving practices," International Journal of Sustainable Transportation, vol. 12, pp. 107-116, 2018.

[49] Escuela de Ingeniería Civil, Geomatica, gestión y optimizacion de sistemas, "Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010-2030," pp. 143, 2010.

[50] EConcept, "El Sector de Vehículos en Colombia: Características y Propuestas de Mejora a su Régimen Impositivo." 2016.

[51] Escuela de Ingeniería Civil Geomatica, gestión y optimizacion de sistemas, "Plan Maestro de Movilidad, Área Metropolitana de Bucaramanga 2011 - 2030," pp. 202, 2011.

[52] J. Huertas, M. Giraldo, L. Quirama and J. Díaz-Ramírez, "Driving Cycles Based on Fuel Consumption," Energies, vol. 11, pp. 3064, 2018.

[53] M. Giraldo, "Método basado en el consumo de combustible para la construcción de ciclos de conducción que representen patrones locales de manejo," pp. 73, 2018.

[54] J. Jimenez, P. McClintock, G. McRae, D. Nelson and M. Zahniser, Vehicle Specific Power: A Useful Parameter for Remote Sensing and Emission Studies, San Diego: 1999, pp. 361.

[55] N.H. Arun, S. Mahesh, G. Ramadurai and S.M. Shiva Nagendra, "Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India," Sustainable Cities and Society, vol. 32, pp. 508-512, 2017.

[56] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao and Q. Zhang, "Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 13, pp. 289-297, 2008.

[57] R.A. Simmons, G.M. Shaver, W.E. Tyner and S.V. Garimella, "A benefit-cost assessment of new vehicle technologies and fuel economy in the U.S. market," Applied Energy, vol. 157, pp. 940-952, 2015.

[58] S. Birrell, J. Taylor, A. McGordon, J. Son and P. Jennings, "Analysis of three independent real-world driving studies: A data driven and expert analysis approach to determining parameters affecting fuel economy," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 33, pp. 74-86, 2014.

[59] H. Kato, R. Ando, Y. Kondo, T. Suzuki, K. Matsuhashi and S. Kobayashi, "Comparative measurements of the eco-driving effect between electric and internal combustion engine vehicles," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2014, 2014.

[60] M. Sivak and B. Schoettle, "Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy," Transport Policy, vol. 22, pp. 96-99, 2012.

[61] J.N. Barkenbus, "Eco-driving: An overlooked climate change initiative," Energy Policy, vol. 38, pp. 762-769, 2010.

[62] V. Basaric, M. Jambrovic, M. Milicic, T. Savković, D. Basaric and V. Bogdanović, "Positive effects of eco-driving in public transport: A case study of Novi Sad," Thermal Science, vol. 21, pp. 160, 2016.

[63] M. Rutty, L. Matthews, J. Andrey and T.D. Matto, "Eco-driver training within the City of Calgary's municipal fleet: Monitoring the impact," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 24, pp. 44-51, 2013.

[64] IDAE, "Manual de conducción eficiente para conductores de vehículos industriales," pp. 80, 2006.

[65] G. Amirjamshidi and M.J. Roorda, "Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 34, pp. 255-266, 2015.

[66] M. Andrejić, N. Bojović and M. Kilibarda, "A framework for measuring transport efficiency in distribution centers," Transport Policy, vol. 45, pp. 99-106, 2016.

[67] J. Wu, Q. Zhu, J. Chu, H. Liu and L. Liang, "Measuring energy and environmental efficiency of transportation systems in China based on a parallel DEA approach," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 48, pp. 460-472, 2016.

[68] Centro del transporte de la Universidad Andres Bello, "Manual de conducción eficiente," pp. 32, 2014.

ANEXOS

ANEXO A

A continuación, se muestra el código desarrollado en el software comercial Matlab 2017a del método Micro-trips Fuel Based Method, para la generación de ciclos de conducción.

```
%Drinving cycle construction program
%Microtrips Fuel Based Method

%Elimina las variables creadas
tic
clear
clc
tam=20;
num_iter = 1000;
Diff=[];

%Lee archivos de excel de la hoja 1
trips = xlsread('Muestras_T_C')


%Inicialización de variables
tiempo = 1260;
intervals = 10;
%Velocidad en idle minima
velidmin = 0.01;
%Aceleración positiva de referencia
apref = 0.14;
%Aceleración negativa de referencia
anref = -0.14;
%RPM min de referencia
rpmmin = 750;
% Diferencia relativa
er = 0.05;


%Vector de velocidades del ciclo
DC = [];
% Vector de RPM del ciclo
RPM = [];
% Vector de aceleraciones
A = [];
%Microtrips seleccionados
micro_sele = [];
%Pendiente
%Pen= [];
%Specific fuel consumption
```

```
SFC = [];
%Flujo de emisiones dióxido de carbono
%FECO2 = [];
%Flujo de emisiones de monóxido de carbono
%FECO = [];
%Flujo de emisiones de monóxido de nitrógeno
%FENO = [];
%Flujo de emisiones de dióxido de nitrógeno
%FENO2 = [];
%Longitud del ciclo de manejo
len_DC = length(DC);
%Distribución de Probabilidad de Velocidad-Aceleración
%SAPD = [];


%Valores iniciales de los PVs del ciclo candidato
%Velocidad media del ciclo
mvDC = 0;


%-------------------- Calculos de CP's generales --------------------

%---------- Calculos muestra ----------
% Velocidad
mvelmaxmtra=[];
mvelpmtra=[];
mvelsdmtra=[];

% Aceleración
macelmaxmtrap=[];
macelpmtrap=[];
macelsdmtrap=[];

% Desaceleración
macelmaxmtran=[];
macelpmtran=[];
macelsdmtran=[];

% Porcentaje de Tiempo
mperidle=[];
mperacelp=[];
mperaceln=[];
mpercrucero=[];

% No de aceleraciones/km
macelxkm=[];

% RMS
mrms=[];

% PKE
mpke=[];
```

```
%SFC
mSFC=[];

%Emisiones
%mCO=[];
%mNO=[];
%mNO2=[];
%mNOx=[];

%VSP y KI
mVSP=[];
mKI=[];

for bb=1:1:max(trips(:,2))

    t_viaje=[];
    speed=[];

    %Posiciones del viaje i
    posxviaje = find(trips(:,2)==bb);

    %Velocidad
    velmaxviaje = max(trips(posxviaje,7));
    velpviaje = mean(trips(posxviaje,7));
    velsdviaje = std(trips(posxviaje,7));

    mvelmaxmtra=[mvelmaxmtra;velmaxviaje];
    mvelpmtra = [mvelpmtra;velpviaje];
    mvelsdmtra = [mvelsdmtra;velsdviaje];

    %Aceleración
    acelviaje = trips(posxviaje,8);
    acelxviajep = find(acelviaje>=apref);

    acelmaxviajep = max(acelviaje(acelxviajep));
    acelpviajep = mean(acelviaje(acelxviajep),'omitnan');
    acelsdviajep = std(acelviaje(acelxviajep),'omitnan');

    macelmaxmtrap = [macelmaxmtrap;acelmaxviajep];
    macelpmtrap = [macelpmtrap;acelpviajep];
    macelsdmtrap = [macelsdmtrap;acelsdviajep];

    %Desaceleración
    acelxviajen = find(acelviaje<=anref);

    acelmaxviajen = min(acelviaje(acelxviajen));
    acelpviajen = mean(acelviaje(acelxviajen),'omitnan');
    acelsdviajen = std(acelviaje(acelxviajen),'omitnan');

    macelmaxmtran = [macelmaxmtran;acelmaxviajen];
    macelpmtran = [macelpmtran;acelpviajen];
```

```
macelsdmtran = [macelsdmtran;acelsdviajen];

%Porcentaje de tiempo
velidviaje = find(trips(posxviaje,7)<=velidmin);

tviaje = length(trips(posxviaje,7));
tidviaje = length(velidviaje);
tacelp = length(acelxviajep);
taceln = length(acelxviajen);

pertidviaje = 100*(tidviaje/tviaje);
pertacelviajep = 100*(tacelp/tviaje);
pertacelviajen = 100*(taceln/tviaje);
pertcruviaje = 100-pertidviaje-pertacelviajep-pertacelviajen;

mperidle = [mperidle;pertidviaje];
mperacelp = [mperacelp;pertacelviajep];
mperaceln = [mperaceln;pertacelviajen];
mpercrucero = [mpercrucero;pertcruviaje];

% No. de aceleraciones/km
lviaje = length(acelviaje);
fviaje=zeros(lviaje,1);

for yy=1:1:lviaje-1
    if acelviaje(yy+1)>0&&acelviaje(yy)<=0
       fviaje(yy+1,1)=1;

    else
       fviaje(yy+1,1)=0;

    end
end

distviaje = sum(trips(posxviaje,9))/1000;
acelxkm = sum(fviaje)/distviaje;

macelxkm=[macelxkm;acelxkm];

% RMS
rmsviaje = rms(trips(posxviaje,8));

mrms = [mrms;rmsviaje];

% PKE
velviaje = trips(posxviaje,7);
lviaje = length(velviaje);
qviaje = zeros(lviaje,1);
for ff=1:1:lviaje-1

     if velviaje(ff+1,1)>velviaje(ff,1)
```

```
            qviaje(ff+1,1)= (((velviaje(ff+1,1))^2)-
((velviaje(ff,1))^2));

        else
            qviaje(ff+1,1) = 0;

        end

    end
    pkeviaje = sum(qviaje)/(distviaje*1000);

    mpke=[mpke;pkeviaje];

    %Consumo real
    fuelviaje = sum(trips(posxviaje,13));
    SFCviaje = fuelviaje/distviaje;
    mSFC = [mSFC;SFCviaje];

    %{
    %Emisiones [g/km]
    vCO2=sum(trips(posxviaje,14))/distviaje;
    mCO2=[mCO2;vCO2];
    vCO=sum(trips(posxviaje,15))/distviaje;
    mCO=[mCO;vCO];
    vNO=sum(trips(posxviaje,16))/distviaje;
    mNO=[mNO;vNO];
    vNO2=sum(trips(posxviaje,17))/distviaje;
    mNO2=[mNO2;vNO2];
    vNOx=vNO+vNO2;
    mNOx=[mNOx;vNOx];
    %}

    %VSP y KI
    VSPpviaje = mean(trips(posxviaje,25));
    KIpviaje = nansum(trips(posxviaje,27))*1000/sum(trips(posxviaje,26));

    mVSP = [mVSP;VSPpviaje];
    mKI = [mKI;KIpviaje];

end

% Velocidad
velmaxmtra = median(mvelmaxmtra);
velpmtra = median(mvelpmtra);
velsdmtra = median(mvelsdmtra);

% Aceleración
acelmaxmtrap = median(macelmaxmtrap);
acelpmtrap = median(macelpmtrap,'omitnan');
acelsdmtrap = median(macelsdmtrap,'omitnan');

% Desaceleración
```

```
acelmaxmtran = median(macelmaxmtran);
acelpmtran = median(macelpmtran,'omitnan');
acelsdmtran = median(macelsdmtran,'omitnan');

% Porcentaje de Tiempo
peridlemtra = median(mperidle);
peracelmtrap = median(mperacelp);
peracelmtran = median(mperaceln);
percruceromtra = median(mpercrucero);

% No de aceleraciones/km
acelxkmmtra = median(macelxkm,'omitnan');

% RMS
rmsmtra = median(mrms);

% PKE
pkemtra = median(mpke,'omitnan');

% SAPD
%[SAPDmtra,int_velmtra,int_acelmtra] =
SAPD(trips(:,7),trips(:,8),intervals,max(trips(:,7)),min(trips(:,7)),max(
trips(:,8)),min(trips(:,8)));

%SFC
SFCmtra = median(mSFC);

%{
%Emisiones
pCO2=median(mCO2);
pCO=median(mCO);
pNO=median(mNO);
pNO2=median(mNO2);
pNOx=median(mNOx);
%}

%VSP y KI
pVSP=median(mVSP,'omitnan');
pKI=median(mKI,'omitnan');

%Inicialización de diferencias
DiffCiclos = zeros(num_iter,1);

Diffvel = zeros(num_iter,1);
Diffap = zeros(num_iter,1);
Diffan = zeros(num_iter,1);
Difftid = zeros(num_iter,1);

Diffvelmax = zeros(num_iter,1);
Diffacelmaxp = zeros(num_iter,1);
Diffacelmaxn = zeros(num_iter,1);
Diffperidle = zeros(num_iter,1);
```

```
Diffperacelp = zeros(num_iter,1);
Diffperaceln = zeros(num_iter,1);
Diffpercru = zeros(num_iter,1);
Diffvelp = zeros(num_iter,1);
Diffacelpp = zeros(num_iter,1);
Diffacelpn = zeros(num_iter,1);
Diffacelxkm = zeros(num_iter,1);
Diffvelsd = zeros(num_iter,1);
Diffacelsdp = zeros(num_iter,1);
Diffacelsdn = zeros(num_iter,1);
Diffrms = zeros(num_iter,1);
Diffpke = zeros(num_iter,1);
Diffsapd = zeros(num_iter,1);
DiffSFC= zeros(num_iter,1);
DiffCO2=zeros(num_iter,1);
DiffCO=zeros(num_iter,1);
DiffNO=zeros(num_iter,1);
DiffNO2=zeros(num_iter,1);
DiffNOx=zeros(num_iter,1);
DiffVSP=zeros(num_iter,1);
DiffKI=zeros(num_iter,1);


%------------Inicialización de Matrices RDC's-------------
M_len = zeros(1,num_iter);
M_DC = zeros(1380,num_iter);
M_RPM = zeros(1380,num_iter);
M_A = zeros(1380,num_iter);
M_FR = zeros(1380,num_iter);
M_VSP = zeros(1380,num_iter);
M_Vaero = zeros(1380,num_iter);
M_CA = zeros(1380,num_iter);
M_len_DC = zeros(1380,num_iter);
M_Micro_Sele = zeros(1380,num_iter);

%------------Inicialización de vectores CP's de CDC-------------------
CP_velmaxCDC = zeros(num_iter,1);
CP_acelmaxCDCp = zeros(num_iter,1);
CP_acelmaxCDCn = zeros(num_iter,1);
CP_pertidCDC = zeros(num_iter,1);
CP_pertacelCDCp = zeros(num_iter,1);
CP_pertacelCDCn = zeros(num_iter,1);
CP_pertcruCDC = zeros(num_iter,1);
CP_velpCDC = zeros(num_iter,1);
CP_acelpCDCp = zeros(num_iter,1);
CP_acelpCDCn = zeros(num_iter,1);
CP_acelxkmCDC = zeros(num_iter,1);
CP_velsdCDC = zeros(num_iter,1);
CP_acelsdCDCp = zeros(num_iter,1);
CP_acelsdCDCn = zeros(num_iter,1);
CP_rmsCDC = zeros(num_iter,1);
CP_pkeCDC = zeros(num_iter,1);
CP_SFCreal = zeros(num_iter,1);
CP_VSPCDC = zeros(num_iter,1);
```

```
CP_KICDC = zeros(num_iter,1);


u = 0;

% Generación del ciclo candidato
for oo = 1 : 1 : num_iter

     DC = [];
     RPM = [];
     A = [];
     %Pen = [];
     FR = [];
     %FECO2 = [];
     %FECO = [];
     %FENO = [];
     %FENO2 = [];
     VSP = [];
     Vaero = [];
     CA = [];
     micro_sele = [];
     mat_DC = [];
     len_DC = length(DC);
     u = 0;

while u==0

    while len_DC<tiempo

        %Selección del cluster de forma aleatoria con distribución de
probabilidad
        %Entrega el máximo número de cluster (columna 2, archivo cluster)
        max_cluster = max(trips(:,23));
        %Entrega un vector con valores de probabilidad de cada cluster
(columna 3, archivo cluster)
        prob = trips(1:max_cluster,24);
        %Entrega un vector con la suma acumulado de todas las
probabilidades
        prob=cumsum(prob);
        %Genera un número aleatorio con el cual se compara la
probabilidad de cada cluster.
        r_px = rand;
        %Selecciona la probabilidad de acuerdo al numero aleatorio
generado y devuelve la posición de dicho número (1 busca un solo
numero,first lo hace de arriba hacia abajo)
        number_cluster = find(r_px<prob,1,'first');
        %Selecciona los micro_trips de acuerdo al número de cluster
        sel_micros = find(trips(:,22)==number_cluster);
        %Selecciona los micro_trips
        micros = trips(sel_micros,19);

        %Selección de micro_trips uniforme y aleatoriamente
        %Entrega el tamaño del vector micros
```

```
        len_micros = length(micros);
        %Entrega un número aleatorio entre 1 y el tamaño del vector
micros
        r_u = randi([1 len_micros],1,1);
        %Entrega el número del micro_trip seleccionado obtenido
aleatoriamente
        number_micro = micros (r_u);
        %Entrega la posicion de los datos del micro_trip seleccionado
        sel_micro = find(trips(:,18)==number_micro);
        %Entrega los datos de velocidad (m/s) de las posiciones del
        %micro_trip seleccionado contenidas en la columna 7
        micro_trip_DC = trips(sel_micro,7);
        %Entrega los datos de rpm de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 5
        micro_trip_rpm = trips(sel_micro,5);
        %Entrega los datos de rpm de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 8
        micro_trip_a = trips(sel_micro,8);
        %Entrega los datos de pendiente de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 12
        %micro_trip_pen = trips(sel_micro,12);
        %Entrega los datos de SFC de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 13
        micro_trip_fr = trips(sel_micro,13);
        %Entrega los datos de CO2 de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 14
        %micro_trip_co2 = trips(sel_micro,14);
        %Entrega los datos de CO de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 15
        %micro_trip_co = trips(sel_micro,15);
        %Entrega los datos de NO de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 16
        %micro_trip_no = trips(sel_micro,16);
        %Entrega los datos de NO2 de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 17
        %micro_trip_no2 = trips(sel_micro,17);
        %Entrega los datos de VSP de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 25
        micro_trip_vsp = trips(sel_micro,25);
        %Entrega los datos de V_aero de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 26
        micro_trip_vaero = trips(sel_micro,26);
        %Entrega los datos de C_A de las posiciones del micro_trip
        %seleccionado contenidas en la columna 27
        micro_trip_ca = trips(sel_micro,27);


        %Cosntrucción de los ciclos candidatos a partir del empalme de
micro_trips
        %Matríz con datos de micro_trips seleccionados y número de
micro_trips
        micro_sele = [micro_sele;number_micro];
```

```
        % El punto y como empalma el microtrip anterior con el nuevo y
así sucesivamente
        DC = [DC;micro_trip_DC];
        RPM = [RPM;micro_trip_rpm];
        A = [A;micro_trip_a];
        %Pen = [Pen;micro_trip_pen];
        FR = [FR;micro_trip_fr];
        %FECO2 = [FECO2;micro_trip_co2];
        %FECO = [FECO;micro_trip_co];
        %FENO = [FENO;micro_trip_no];
        %FENO2 = [FENO2;micro_trip_no2];
        VSP = [VSP;micro_trip_vsp];
        Vaero = [Vaero;micro_trip_vaero];
        CA = [CA;micro_trip_ca];
        len_DC = length(DC);

    end

    mat_DC = [RPM DC A FR VSP Vaero CA];

    t_CDC=transpose(1:1:length(DC));
    T_CDC=transpose(1:1:len_DC);

    pen_CDC=zeros(length(DC),1);

    %pen_CDC=Pen;


    %-------------------- Calculos de CP's Ciclo candidato --------------
------
%Performance values ciclo candidato CDC
%Velocidad
    velmaxCDC = max(DC);
    velpCDC = mean(DC);
    velsdCDC = std(DC);

%Aceleración
    acelxCDCp = find(A>=apref);

    acelmaxCDCp = max(A(acelxCDCp));
    acelpCDCp = mean(A(acelxCDCp));
    acelsdCDCp = std(A(acelxCDCp));

%Desaceleración
    acelxCDCn = find(A<=anref);

    acelmaxCDCn = min(A(acelxCDCn));
    acelpCDCn = mean(A(acelxCDCn));
    acelsdCDCn = std(A(acelxCDCn));

%Porcentaje de tiempo
    velidCDC = find(DC<=velidmin);
```

```
    tCDC = length(DC);
    tidCDC = length(velidCDC);
    tacelCDCp = length(acelxCDCp);
    tacelCDCn = length(acelxCDCn);

    pertidCDC = 100*(tidCDC/tCDC);
    pertacelCDCp = 100*(tacelCDCp/tCDC);
    pertacelCDCn = 100*(tacelCDCn/tCDC);
    pertcruCDC = 100-pertidCDC-pertacelCDCp-pertacelCDCn;

% No. de aceleraciones/km
    lCDC = length(A);
    fCDC=zeros(lCDC,1);

    for yy=1:1:lCDC-1
        if A(yy+1)>0&&A(yy)<=0
           fCDC(yy+1,1)=1;

        else
           fCDC(yy+1,1)=0;

        end
    end
    distCDC = sum(DC)/1000;
    acelxkmCDC = sum(fCDC)/distCDC;

% RMS
    rmsCDC = rms(A);

% PKE
    lvCDC = length(DC);
    qCDC = zeros(lvCDC,1);
    for ff=1:1:lvCDC-1

         if DC(ff+1)>DC(ff)
             qCDC(ff+1,1)= (((DC(ff+1))^2)-((DC(ff))^2));

         else
             qCDC(ff+1,1) = 0;

         end

    end
    pkeCDC = sum(qCDC)/(distCDC*1000);


% SAPD
%[SAPDCDC,int_velCDC,int_acelCDC] =
SAPD(DC,A,intervals,max(trips(:,7)),min(trips(:,7)),max(trips(:,8)),min(t
rips(:,8)));
```

```
%SFC real [L/km]
fuelCDC = sum(FR);
SFCreal = fuelCDC/distCDC;


%{
%Emisiones
EFCO2=sum(FECO2)/distCDC;
EFCO=sum(FECO)/distCDC;
EFNO=sum(FENO)/distCDC;
EFNO2=sum(FENO2)/distCDC;
EFNOx=EFNO+EFNO2;
%}

%VSP y KI
VSPCDC = mean(VSP);
KICDC = nansum(CA)*1000/sum(Vaero);

    %Comparación de los parámetros de desempeño del ciclo candidato y la
población
    if(abs(SFCmtra-SFCreal)/SFCmtra>er)||(abs(peridlemtra-
pertidCDC)/peridlemtra>er)||(len_DC>tiempo+120)

        %if(abs(velpmtra-velpCDC)/velpmtra>er)||(abs(peridlemtra-
pertidCDC)/peridlemtra>er)||(sum(sum((SAPDmtra-
SAPDCDC).^2))>er)||(abs(peracelmtrap-
pertacelCDCp)/peracelmtrap>er)||(len_DC>tiempo+120)

    %Sino cumple se inicializan de nuevo las variables
             u = 0;
             DC = [];
             RPM = [];
             A = [];
             %Pen=[];
             FR = [];
             %FECO2 = [];
             %FECO = [];
             %FENO = [];
             %FENO2 = [];
             VSP = [];
             Vaero = [];
             CA = [];
             micro_sele = [];
             mat_DC = [];
             len_DC = length(DC);
    else

             u=1;
    end

end
```

```
%---------- Diferencias CDC vs Muestra ----------

%1. Diferencia velocidad máxima
Diffvelmax(oo) = 100*(abs(velmaxmtra-velmaxCDC)/velmaxmtra);

%2. Diferencia aceleración positiva máxima
Diffacelmaxp(oo) = 100*(abs(acelmaxmtrap-acelmaxCDCp)/acelmaxmtrap);

%3. Diferencia desaceleración máxima
Diffacelmaxn(oo) = 100*(abs((acelmaxmtran-acelmaxCDCn)/acelmaxmtran));

%4. Diferencia de porcentual en idle
Diffperidle(oo) = 100*(abs(peridlemtra-pertidCDC)/peridlemtra);

%5. Diferencia de porcentual acelerando
Diffperacelp(oo) = 100*(abs(peracelmtrap-pertacelCDCp)/peracelmtrap);

%6. Diferencia de porcentual desacelerando
Diffperaceln(oo) = 100*(abs(peracelmtran-pertacelCDCn)/peracelmtran);

%7. Diferencia de porcentual en crucero
Diffpercru(oo) = 100*(abs(percruceromtra-pertcruCDC)/percruceromtra);

%8. Diferencia porcentual velocidad promedio
Diffvelp(oo) = 100*(abs(velpmtra-velpCDC)/velpmtra);

%9. Diferencia porcentual aceleración positiva promedio
Diffacelpp(oo) = 100*(abs(acelpmtrap-acelpCDCp)/acelpmtrap);

%10. Diferencia porcentual aceleración negativa promedio
Diffacelpn(oo) = 100*(abs(acelpmtran-acelpCDCn)/abs(acelpmtran));

%11. Diferencia número de aceleraciones por km
Diffacelxkm(oo) = 100*(abs(acelxkmmtra-acelxkmCDC)/acelxkmmtra);

%12. Diferencia desviación estándar velocidad
Diffvelsd(oo) = 100*(abs(velsdmtra-velsdCDC)/velsdmtra);

%13. Diferencia desviación estándar aceleración positiva
Diffacelsdp(oo) = 100*(abs(acelsdmtrap-acelsdCDCp)/acelsdmtrap);

%14. Diferencia desviación estándar aceleración negativa
Diffacelsdn(oo) = 100*(abs(acelsdmtran-acelsdCDCn)/acelsdmtran);

%15. Diferencia RMS
Diffrms(oo) = 100*(abs(rmsmtra-rmsCDC)/rmsmtra);

%16. Diferencia PKE
Diffpke(oo) = 100*(abs(pkemtra-pkeCDC)/pkemtra);
```

```
%17. Diferencia SAPDs
%Diffsapd(oo)=1000*(sum(sum((SAPDmtra-SAPDCDC).^2)));

%18. Diferencia SFC real
DiffSFC(oo)=100*(abs(SFCmtra-SFCreal)/SFCmtra);

%19. Diferencia CO2
%DiffCO2(oo)=100*(abs(pCO2-EFCO2)/pCO2);

%20. Diferencia CO
%DiffCO(oo)=100*(abs(pCO-EFCO)/pCO);

%21. Diferencia NO
%DiffNO(oo)=100*(abs(pNO-EFNO)/pNO);

%22. Diferencia NO2
%DiffNO2(oo)=100*(abs(pNO2-EFNO2)/pNO2);

%23. Diferencia NOx
%DiffNOx(oo)=100*(abs(pNOx-EFNOx)/pNOx);

%24. Diferencia VSP
DiffVSP(oo)=100*(abs(pVSP-VSPCDC)/pVSP);

%25. Diferencia KI
DiffKI(oo)=100*(abs(pKI-KICDC)/abs(pKI));

%Determinación del ciclo más representativo
DiffCiclos(oo)=(Diffacelmaxn(oo)+Diffacelmaxp(oo)+Diffacelpn(oo)+Diffacel
pp(oo)+Diffacelsdn(oo)+Diffacelsdp(oo)+Diffacelxkm(oo)+Diffan(oo)+Diffap(
oo)+DiffKI(oo)+Diffperaceln(oo)+Diffperacelp(oo)+Diffpercru(oo)+Diffperid
le(oo)+Diffpke(oo)+Diffrms(oo)+Diffsapd(oo)+DiffSFC(oo)+Difftid(oo)+Diffv
el(oo)+Diffvelmax(oo)+Diffvelp(oo)+Diffvelsd(oo)+DiffVSP(oo))/100;


%----------Inicialización de Matrices de Ciclos Representativos----------

%1. Matriz de velocidad
M_DC(1:length(DC),oo) = DC;

%2. Matriz de RPM's
M_RPM(1:length(RPM),oo) = RPM;

%3. Matriz de Aceleraciones
M_A(1:length(A),oo) = A;

%4. Matriz de consumo especifico de combustible
M_FR(1:length(FR),oo) = FR;

%5. Matriz de VSP
M_VSP(1:length(VSP),oo) = VSP;
```

```
%6. Matriz de
M_Vaero(1:length(Vaero),oo) = Vaero;

%7. Matriz de
M_CA(1:length(CA),oo) = CA;

%. Matriz del tiempo de cada ciclo
M_len(1,oo) = len_DC;

M_len_DC(1:length(T_CDC),oo) = T_CDC;

%. Matriz de microtrips seleccionados para cada ciclo
M_Micro_Sele(1:length(micro_sele),oo) = micro_sele;

%------------Vectores para comparar CP´s de cada CDC--------------
CP_velmaxCDC(oo) = velmaxCDC;
CP_acelmaxCDCp(oo) = acelmaxCDCp;
CP_acelmaxCDCn(oo) = acelmaxCDCn;
CP_pertidCDC(oo) = pertidCDC;
CP_pertacelCDCp(oo) = pertacelCDCp;
CP_pertacelCDCn(oo) = pertacelCDCn;
CP_pertcruCDC(oo) = pertcruCDC;
CP_velpCDC(oo) = velpCDC;
CP_acelpCDCp(oo) = acelpCDCp;
CP_acelpCDCn(oo) = acelpCDCn;
CP_acelxkmCDC(oo) = acelxkmCDC;
CP_velsdCDC(oo) = velsdCDC;
CP_acelsdCDCp(oo) = acelsdCDCp;
CP_acelsdCDCn(oo) = acelsdCDCn;
CP_rmsCDC(oo) = rmsCDC;
CP_pkeCDC(oo) = pkeCDC;
CP_SFCreal(oo) = SFCreal;
CP_VSPCDC(oo) = VSPCDC;
CP_KICDC(oo) = KICDC;

end

%--------------Ciclo de Conducción Más Representativo---------------

[val,pos] = min(DiffCiclos);
Time = M_len(1,pos);
             DC_RDC = M_DC(1:Time,pos);
             M_DC_KM = DC_RDC*3.6;
             RPM_RDC = M_RPM(1:Time,pos);
             A_RDC = M_A(1:Time,pos);
             %Pen=[];
             FR_RDC= M_FR(1:Time,pos);
             %FECO2 = [];
             %FECO = [];
             %FENO = [];
             %FENO2 = [];
             VSP_RDC = M_VSP(1:Time,pos);
```

```
            Vaero_RDC = M_Vaero(1:Time,pos);
            CA_RDC= M_CA(1:Time,pos);
            micro_sele_RDC = M_Micro_Sele(1:Time,pos);
            Tiempo = transpose(1:Time);
            %Speed = M_DC(1:Time,pos);
            Speed = M_DC_KM;


%Velocidad
    velmaxRDC = max(DC_RDC);
    velpRDC = mean(DC_RDC);
    velsdRDC = std(DC_RDC);

%Aceleración
    acelxRDCp = find(A_RDC>=apref);

    acelmaxRDCp = max(A_RDC(acelxRDCp));
    acelpRDCp = mean(A_RDC(acelxRDCp));
    acelsdRDCp = std(A_RDC(acelxRDCp));

%Desaceleración
    acelxRDCn = find(A_RDC<=anref);

    acelmaxRDCn = min(A_RDC(acelxRDCn));
    acelpRDCn = mean(A_RDC(acelxRDCn));
    acelsdRDCn = std(A_RDC(acelxRDCn));

%Porcentaje de tiempo
    velidRDC = find(DC_RDC<=velidmin);

    tRDC = length(DC_RDC);
    tidRDC = length(velidRDC);
    tacelRDCp = length(acelxRDCp);
    tacelRDCn = length(acelxRDCn);

    pertidRDC = 100*(tidRDC/tRDC);
    pertacelRDCp = 100*(tacelRDCp/tRDC);
    pertacelRDCn = 100*(tacelRDCn/tRDC);
    pertcruRDC = 100-pertidRDC-pertacelRDCp-pertacelRDCn;

% No. de aceleraciones/km
    lRDC = length(A_RDC);
    fRDC=zeros(lRDC,1);

    for cc=1:1:lRDC-1
        if A_RDC(cc+1)>0&&A_RDC(cc)<=0
           fRDC(cc+1,1)=1;

        else
           fRDC(cc+1,1)=0;

        end
```

```
    end
    distRDC = sum(DC_RDC)/1000;
    acelxkmRDC = sum(fRDC)/distRDC;

% RMS
    rmsRDC = rms(A_RDC);

% PKE
    lvRDC = length(DC_RDC);
    qRDC = zeros(lvRDC,1);
    for mm=1:1:lvRDC-1

         if DC_RDC(mm+1)>DC_RDC(mm)
             qRDC(mm+1,1)= (((DC_RDC(mm+1))^2)-((DC_RDC(mm))^2));

         else
             qRDC(mm+1,1) = 0;

         end

    end

    pkeRDC = sum(qRDC)/(distRDC*1000);


% SAPD
%[SAPDCDC,int_velCDC,int_acelCDC] =
SAPD(DC,A,intervals,max(trips(:,7)),min(trips(:,7)),max(trips(:,8)),min(t
rips(:,8)));

%SFC real [L/km]
fuelRDC = sum(FR_RDC);
SFCrealRDC = fuelRDC/distRDC;


%{
%Emisiones
EFCO2=sum(FECO2)/distCDC;
EFCO=sum(FECO)/distCDC;
EFNO=sum(FENO)/distCDC;
EFNO2=sum(FENO2)/distCDC;
EFNOx=EFNO+EFNO2;
%}

%VSP y KI
VSPRDC = mean(VSP_RDC);
KIRDC = nansum(CA_RDC)*1000/sum(Vaero_RDC);

Grafica_CDC = plot(Tiempo,Speed);
xlabel('Tiempo [s]', 'Fontsize',tam,'FontName','Times New Roman')
ylabel('Velocidad [km/h]', 'Fontsize',tam,'FontName','Times New Roman')
```

```
title('Ciclo de Conducción', 'Fontsize',tam+5,'FontName','Times New
Roman')

Diff=[Diffvelmax,Diffvelp,Diffvelsd,Diffacelmaxp,Diffacelmaxn,Diffacelpp,
Diffacelpn,Diffacelsdp,Diffacelsdn,Diffperidle,Diffperacelp,Diffperaceln,
Diffpercru,Diffacelxkm,Diffrms,Diffpke,DiffVSP,DiffKI,DiffSFC];
promedio = mean(Diff,'omitnan');
desviacion_std = std(Diff);
varianza=desviacion_std.^2;
CoV=100*(desviacion_std./promedio);
minDiff = min(Diff);
maxDiff = max(Diff);
QDiff = quantile(Diff,[0.25 0.50 0.75]);
IQR=QDiff(3,:)-QDiff(1,:);
Results=transpose([promedio;IQR;desviacion_std;varianza;CoV;minDiff;QDiff
;maxDiff]);
parameter = ["Speed max","Speed ave","SD Speed","a+ max","a- max","a+
ave","a- ave","SD a+","SD a-","% idling *","% a+","% a-","%
cruising","acel/km","RMS","PKE","VSP","KI","SFC *"];
boxplot(Diff,parameter, 'orientation', 'horizontal')
set(gca,'Fontsize',tam*0.6,'FontName','Times New Roman')
xlim([-2 200])
xticks([0 10 20 30 50 100 150 200])
xlabel('RD [%]', 'Fontsize',tam,'FontName','Times New Roman')
ylabel('CPs [-]', 'Fontsize',tam,'FontName','Times New Roman')
title('Micro-trip Fuel Based Method', 'Fontsize',tam+5,'FontName','Times
New Roman')

hold on
scatter(promedio.',1:1:size(Diff,2),'MarkerEdgeColor',[0 0
0],'MarkerFaceColor','b')
hold off

toc
```

ANEXO B

A continuación, se presenta una tabla con el consumo instantáneo de combustible del ciclo de conducción obtenido sin modificarse, así como también una vez aplicada la estrategia de reducción del tiempo en ralentí, para posteriormente calcular su ahorro potencial.

Tiempo [s]	**Velocidad [m/s]**	**Consumo instantáneo de combustible original [L/s]**	**Consumo instantáneo de combustible modificado [L/s]**
1	0	0,001786989	0,001786989
2	0	0,001786989	0,001786989
3	0,555555556	0,000307097	0,000307097
4	0,555555556	0,000307097	0,000307097
5	0	0,000279741	0,000279741
6	0	0,000336453	0,000336453
7	0	0,000336453	0,000336453
8	0	0,000357482	0,000357482
9	0	0,000357482	0,000357482
10	0	0,000357482	0,000357482
11	0	0,000357482	0,000357482
12	0	0,000357482	0,000357482
13	0	0,000315425	0,000315425
14	0	0,000315425	0,000315425
15	0	0,000315425	0,000315425
16	0	0,000336453	0,000336453
17	0	0,000336453	0,000336453
18	0	0,000336453	0,000336453
19	0	0,000220798	0,000220798
20	0	0,000220798	0,000220798
21	0	0,000220798	0,000220798
22	0	0,000199769	0,000199769
23	0	0,000199769	0,000199769
24	0	0,000199769	0,000199769
25	0	0,000304911	0,000304911
26	0	0,000304911	0,000304911
27	0	0,000304911	0,000304911
28	0	0,000325939	0,000325939

29	0	0,000325939	0,000325939
30	0	0,000325939	0,000325939
31	0	0,000315425	0,000315425
32	0	0,000315425	0,000315425
33	0	0,000315425	0,000315425
34	0	0,000304911	0,000304911
35	0	0,000304911	0,000304911
36	0	0,000357482	0,000357482
37	0	0,000357482	0,000357482
38	0	0,000357482	0,000357482
39	0	0,000315425	0,000315425
40	0	0,000315425	0,000315425
41	0	0,000315425	0,000315425
42	0	0,000199769	0,000199769
43	0	0,000199769	0,000199769
44	0	0,000199769	0,000199769
45	0	0,000620336	0,000620336
46	0	0,000620336	0,000620336
47	0	0,000620336	0,000620336
48	0	0,000304911	0,000304911
49	0	0,000304911	0,000304911
50	0	0,000304911	0,000304911
51	0	0,00088319	0,00088319
52	0	0,00088319	0,00088319
53	0	0,000820105	0,000820105
54	0,555555556	0,000820105	0,000820105
55	0,555555556	0,000820105	0,000820105
56	0,555555556	0,001419413	0,001419413
57	2,222222222	0,001419413	0,001419413
58	2,222222222	0,001419413	0,001419413
59	4,444444444	0,000746506	0,000746506
60	4,444444444	0,000746506	0,000746506
61	4,444444444	0,000746506	0,000746506
62	5	0,002071291	0,002071291
63	5	0,002071291	0,002071291
64	5	0,002071291	0,002071291
65	6,666666667	0,002954481	0,002954481
66	6,666666667	0,002954481	0,002954481

67	6,666666667	0,002123862	0,002123862
68	7,222222222	0,002123862	0,002123862
69	7,222222222	0,002123862	0,002123862
70	7,222222222	0,002334145	0,002334145
71	8,333333333	0,002334145	0,002334145
72	8,333333333	0,002334145	0,002334145
73	8,333333333	0,002660084	0,002660084
74	9,444444444	0,002660084	0,002660084
75	9,444444444	0,002660084	0,002660084
76	10,55555556	0,002050263	0,002050263
77	10,55555556	0,002050263	0,002050263
78	10,55555556	0,002050263	0,002050263
79	10,55555556	0,001103988	0,001103988
80	10,55555556	0,001103988	0,001103988
81	10,55555556	0,001103988	0,001103988
82	10,55555556	0,001818951	0,001818951
83	10,55555556	0,001818951	0,001818951
84	10,55555556	0,002260546	0,002260546
85	11,11111111	0,002260546	0,002260546
86	11,11111111	0,002260546	0,002260546
87	11,11111111	0,003606359	0,003606359
88	11,66666667	0,003606359	0,003606359
89	11,66666667	0,003606359	0,003606359
90	12,22222222	0,001997692	0,001997692
91	12,22222222	0,001997692	0,001997692
92	12,22222222	0,001997692	0,001997692
93	10,55555556	0,001282728	0,001282728
94	10,55555556	0,001282728	0,001282728
95	10,55555556	0,001282728	0,001282728
96	9,444444444	0,002670598	0,002670598
97	9,444444444	0,002670598	0,002670598
98	9,444444444	0,000851648	0,000851648
99	8,333333333	0,000851648	0,000851648
100	8,333333333	0,000851648	0,000851648
101	8,333333333	0,002365688	0,002365688
102	8,333333333	0,002365688	0,002365688
103	8,333333333	0,002365688	0,002365688
104	8,888888889	0,001040903	0,001040903

105	8,888888889	0,001040903	0,001040903
106	8,888888889	0,001040903	0,001040903
107	9,444444444	0,000357482	0,000357482
108	9,444444444	0,000357482	0,000357482
109	9,444444444	0,000357482	0,000357482
110	10	0,000325939	0,000325939
111	10	0,000325939	0,000325939
112	10	0,000483652	0,000483652
113	10,55555556	0,000483652	0,000483652
114	10,55555556	0,000483652	0,000483652
115	10,55555556	0,000262854	0,000262854
116	10	0,000262854	0,000262854
117	10	0,000262854	0,000262854
118	10	0,000809591	0,000809591
119	9,444444444	0,000809591	0,000809591
120	9,444444444	0,000809591	0,000809591
121	8,888888889	0,000389024	0,000389024
122	8,888888889	0,000389024	0,000389024
123	8,888888889	0,000389024	0,000389024
124	7,777777778	0,000325939	0,000325939
125	7,777777778	0,000325939	0,000325939
126	7,777777778	0,000325939	0,000325939
127	6,111111111	0,000336453	0,000336453
128	6,111111111	0,000336453	0,000336453
129	6,111111111	0,000336453	0,000336453
130	3,888888889	0,000336453	0,000336453
131	3,888888889	0,000336453	0,000336453
132	3,888888889	0,000210283	0,000210283
133	2,222222222	0,000210283	0,000210283
134	2,222222222	0,000210283	0,000210283
135	1,111111111	0,000199769	0,000199769
136	1,111111111	0,000199769	0,000199769
137	1,111111111	0,000199769	0,000199769
138	0	0,000178741	0,000178741
139	0	0,000389024	0,000389024
140	0	0,000325939	0,000325939
141	0	0,000325939	0,000325939
142	0	0,000325939	0,000325939

143	0	0,000189255	0,000189255
144	0	0,000189255	0,000189255
145	0	0,000189255	0,000189255
146	0	0,000189255	0,000189255
147	0	0,000189255	0,000189255
148	0	0,000189255	0,000189255
149	0	0,000199769	0,000199769
150	0	0,000199769	0,000199769
151	0	0,000199769	0,000199769
152	0	0,000178741	0,000178741
153	0	0,000178741	0,000178741
154	0	0,000283883	0,000283883
155	0	0,000283883	0,000283883
156	0	0,000283883	0,000283883
157	0	0,000893704	0,000893704
158	0	0,000893704	0,000893704
159	0	0,000893704	0,000893704
160	0,555555556	0,000620336	0,000620336
161	0,555555556	0,000620336	0,000620336
162	0,555555556	0,000620336	0,000620336
163	1,111111111	0,000315425	0,000315425
164	1,111111111	0,000315425	0,000315425
165	1,111111111	0,000315425	0,000315425
166	0,555555556	0,000304911	0,000304911
167	0,555555556	0,000304911	0,000304911
168	0,555555556	0,000462623	0,000462623
169	0	0,000462623	0,000462623
170	0	0,00030445	0,00030445
171	0	0,00037593	0,00037593
172	0	0,00037593	0,00037593
173	0	0,000421818	0,000421818
174	0	0,000421818	0,000421818
175	0	0,00035475	0,00035475
176	0	0,00035475	0,00035475
177	0	0,00035475	0,00035475
178	0	0,000461529	0,000461529
179	0	0,000461529	0,000461529
180	0	0,000307097	0,000307097

181	0	0,000307097	0,000307097
182	0	0,000307097	0,000307097
183	0	0,000207379	0,000207379
184	0	0,000207379	0,000207379
185	0	0,000194142	0,000194142
186	0	0,000194142	0,000194142
187	0	0,000197672	0,000197672
188	0	0,000197672	0,000197672
189	0	0,000197672	0,000197672
190	0	0,000202967	0,000202967
191	0	0,000202967	0,000202967
192	0	0,000341513	0,000341513
193	0	0,000341513	0,000341513
194	0	0,000341513	0,000341513
195	0	0,000306215	0,000306215
196	0	0,000306215	0,000306215
197	0	0,000306215	0,000306215
198	0	0,000302685	0,000302685
199	0	0,000302685	0,000302685
200	0	0,000306215	0,000306215
201	0	0,000306215	0,000306215
202	0	0,000306215	0,000306215
203	0	0,000305332	0,000305332
204	0	0,000305332	0,000305332
205	0	0,0011675	0,0011675
206	0,555555556	0,0011675	0,0011675
207	0,555555556	0,0011675	0,0011675
208	5	0,001298104	0,001298104
209	5	0,001298104	0,001298104
210	6,111111111	0,000305332	0,000305332
211	6,111111111	0,000305332	0,000305332
212	6,111111111	0,000305332	0,000305332
213	6,666666667	0,000296508	0,000296508
214	6,666666667	0,000296508	0,000296508
215	6,666666667	0,000205614	0,000205614
216	6,666666667	0,000205614	0,000205614
217	6,666666667	0,000205614	0,000205614
218	6,666666667	0,000200319	0,000200319

219	6,666666667	0,000200319	0,000200319
220	6,666666667	0,000200319	0,000200319
221	6,666666667	0,000200319	0,000200319
222	6,666666667	0,000200319	0,000200319
223	5	0,000255915	0,000255915
224	5	0,000255915	0,000255915
225	5	0,000301803	0,000301803
226	2,777777778	0,000301803	0,000301803
227	2,777777778	0,000301803	0,000301803
228	1,111111111	0,00030445	0,00030445
229	1,111111111	0,00030445	0,00030445
230	1,111111111	0,000298273	0,000298273
231	0,555555556	0,000298273	0,000298273
232	0,555555556	0,000298273	0,000298273
233	0	0,000314157	0,000314157
234	0	0,000237383	0,000237383
235	0	0,000165021	0,000165021
236	0,555555556	0,000165021	0,000165021
237	0,555555556	0,000165021	0,000165021
238	0,555555556	0,000229441	0,000229441
239	0	0,000229441	0,000229441
240	0	0,000262854	0,000262854
241	0	0,000262854	0,000262854
242	0	0,000283883	0,000283883
243	0	0,000283883	0,000283883
244	0	0,000283883	0,000283883
245	0	0,000283883	0,000283883
246	0	0,000283883	0,000283883
247	0	0,000189255	0,000189255
248	0	0,000189255	0,000189255
249	0	0,000189255	0,000189255
250	0	0,000189255	0,000189255
251	0	0,000199769	0,000199769
252	0	0,000199769	0,000199769
253	0	0,000199769	0,000199769
254	0	0,000199769	0,000199769
255	0	0,000283883	0,000283883
256	0	0,000283883	0,000283883

257	0	0,000283883	0,000283883
258	0	0,000283883	0,000283883
259	0	0,000294397	0,000294397
260	0	0,000294397	0,000294397
261	0	0,000294397	0,000294397
262	0	0,000294397	0,000294397
263	0	0,000315425	0,000315425
264	0	0,000315425	0,000315425
265	0	0,000315425	0,000315425
266	0	0,000315425	0,000315425
267	0	0,000283883	0,000283883
268	0	0,000283883	0,000283883
269	0	0,000283883	0,000283883
270	0	0,000283883	0,000283883
271	0	0,000189255	0,000189255
272	0	0,000189255	0,000189255
273	0	0,000189255	0,000189255
274	0	0,000189255	0,000189255
275	0	0,000294397	0,000294397
276	0	0,000294397	0,000294397
277	0	0,000294397	0,000294397
278	0	0,000294397	0,000294397
279	0	0,000294397	0,000294397
280	0	0,000283883	0,000283883
281	0	0,000283883	0,000283883
282	0	0,000283883	0,000283883
283	0	0,000283883	0,000283883
284	0	0,000315425	0,000315425
285	0	0,000315425	0,000315425
286	0	0,000315425	0,000315425
287	0	0,000315425	0,000315425
288	0	0,000325939	0,000325939
289	0	0,000325939	0,000325939
290	0	0,000325939	0,000325939
291	0	0,000325939	0,000325939
292	0	0,000210283	0,000210283
293	0	0,000210283	0,000210283
294	0	0,000210283	0,000210283

295	0	0,000210283	0,000210283
296	0	0,000283883	0,000283883
297	0	0,000283883	0,000283883
298	0	0,000283883	0,000283883
299	0	0,000283883	0,000283883
300	0	0,000273368	0,000273368
301	0	0,000273368	0,000273368
302	0	0,000273368	0,000273368
303	0	0,000273368	0,000273368
304	0	0,000325939	0,000325939
305	0	0,000325939	0,000325939
306	0	0,000325939	0,000325939
307	0	0,000325939	0,000325939
308	0	0,000325939	0,000325939
309	0	0,000273368	0,000273368
310	0	0,000273368	0,000273368
311	0	0,000273368	0,000273368
312	0	0,000273368	0,000273368
313	0	0,000199769	0,000199769
314	0	0,000199769	0,000199769
315	0	0,000199769	0,000199769
316	0	0,000199769	0,000199769
317	0	0,00025234	0,00025234
318	0	0,00025234	0,00025234
319	0	0,00025234	0,00025234
320	0	0,00025234	0,00025234
321	0	0,00025234	0,00025234
322	0	0,00025234	0,00025234
323	0	0,00025234	0,00025234
324	0	0,00025234	0,00025234
325	0	0,000273368	0,000273368
326	0	0,000273368	0,000273368
327	0	0,000273368	0,000273368
328	0	0,000273368	0,000273368
329	0	0,000336453	0,000336453
330	0	0,000336453	0,000336453
331	0	0,000336453	0,000336453
332	0	0,000336453	0,000336453

333	0	0,00025234	0,00025234
334	0	0,00025234	0,00025234
335	0	0,00025234	0,00025234
336	0	0,00025234	0,00025234
337	0	0,00025234	0,00025234
338	0	0,000473138	0,000473138
339	0	0,000473138	0,000473138
340	0	0,000473138	0,000473138
341	0	0,000473138	0,000473138
342	0	0,000178741	0,000178741
343	0	0,000178741	0,000178741
344	0	0,000178741	0,000178741
345	0	0,000178741	0,000178741
346	0	0,000273368	0,000273368
347	0	0,000273368	0,000273368
348	0	0,000273368	0,000273368
349	0	0,000273368	0,000273368
350	0	0,00025234	0,00025234
351	0	0,00025234	0,00025234
352	0	0,00025234	0,00025234
353	0	0,00025234	0,00025234
354	0	0,000294397	0,000294397
355	0	0,000294397	0,000294397
356	0	0,000294397	0,000294397
357	0	0,000294397	0,000294397
358	0	0,000304911	0,000304911
359	0	0,000304911	0,000304911
360	0	0,000304911	0,000304911
361	0	0,000304911	0,000304911
362	0	0,000294397	0,000294397
363	0	0,000294397	0,000294397
364	0	0,000294397	0,000294397
365	0	0,000294397	0,000294397
366	0	0,000294397	0,000294397
367	0	0,000294397	0,000294397
368	0	0,000294397	0,000294397
369	0	0,000294397	0,000294397
370	0	0,000294397	0,000294397

371	0	0,00025234	0,00025234
372	0	0,00025234	0,00025234
373	0	0,00025234	0,00025234
374	0	0,00025234	0
375	0	0,000283883	0
376	0	0,000283883	0
377	0	0,000283883	0
378	0	0,000283883	0
379	0	0,000304911	0
380	0	0,000304911	0
381	0	0,000304911	0
382	0	0,000304911	0
383	0	0,000273368	0
384	0	0,000273368	0
385	0	0,000273368	0
386	0	0,000273368	0
387	0	0,000262854	0
388	0	0,000262854	0
389	0	0,000262854	0
390	0	0,000262854	0
391	0	0,000210283	0
392	0	0,000210283	0
393	0	0,000210283	0
394	0	0,000210283	0
395	0	0,000199769	0
396	0	0,000199769	0
397	0	0,000199769	0
398	0	0,000199769	0
399	0	0,000199769	0
400	0	0,000262854	0
401	0	0,000262854	0
402	0	0,000262854	0
403	0	0,000262854	0
404	0	0,000283883	0
405	0	0,000283883	0
406	0	0,000283883	0
407	0	0,000283883	0
408	0	0,000294397	0

409	0	0,000294397	0
410	0	0,000294397	0
411	0	0,000294397	0
412	0	0,000199769	0
413	0	0,000199769	0
414	0	0,000199769	0
415	0	0,000199769	0
416	0	0,000178741	0
417	0	0,000178741	0
418	0	0,000178741	0
419	0	0,000178741	0
420	0	0,000294397	0
421	0	0,000294397	0
422	0	0,000294397	0
423	0	0,000294397	0
424	0	0,000262854	0
425	0	0,000262854	0
426	0	0,000262854	0
427	0	0,000262854	0
428	0	0,000315425	0
429	0	0,000315425	0
430	0	0,000315425	0
431	0	0,000315425	0
432	0	0,000294397	0
433	0	0,000294397	0
434	0	0,000294397	0
435	0	0,000294397	0
436	0	0,000294397	0
437	0	0,00025234	0
438	0	0,00025234	0
439	0	0,00025234	0
440	0	0,00025234	0
441	0	0,000199769	0
442	0	0,000199769	0
443	0	0,000199769	0
444	0	0,000199769	0
445	0	0,000315425	0
446	0	0,000315425	0

447	0	0,000315425	0
448	0	0,000315425	0
449	0	0,000336453	0
450	0	0,000336453	0
451	0	0,000336453	0
452	0	0,000336453	0
453	0	0,000315425	0
454	0	0,000315425	0
455	0	0,000315425	0
456	0	0,000315425	0
457	0	0,000220798	0
458	0	0,000220798	0
459	0	0,000220798	0
460	0	0,000220798	0
461	0	0,000210283	0
462	0	0,000210283	0
463	0	0,000210283	0
464	0	0,000210283	0
465	0	0,000210283	0
466	0	0,000346968	0
467	0	0,000346968	0
468	0	0,000346968	0
469	0	0,000346968	0
470	0	0,000325939	0
471	0	0,000325939	0
472	0	0,000325939	0
473	0	0,000325939	0
474	0	0,000304911	0
475	0	0,000304911	0
476	0	0,000304911	0
477	0	0,000304911	0
478	0	0,000231312	0
479	0	0,000231312	0
480	0	0,000231312	0
481	0	0,000231312	0
482	0	0,000189255	0
483	0	0,000189255	0
484	0	0,000189255	0

485	0	0,000189255	0
486	0	0,000315425	0
487	0	0,000315425	0
488	0	0,000315425	0
489	0	0,000315425	0
490	0	0,000336453	0
491	0	0,000336453	0
492	0	0,000336453	0
493	0	0,000336453	0
494	0	0,000304911	0
495	0	0,000304911	0
496	0	0,000304911	0
497	0	0,000304911	0
498	0	0,00025234	0
499	0	0,00025234	0
500	0	0,00025234	0
501	0	0,00025234	0
502	0	0,00025234	0
503	0	0,000294397	0
504	0	0,000294397	0
505	0	0,000294397	0
506	0	0,000294397	0
507	0	0,000199769	0
508	0	0,000199769	0
509	0	0,000199769	0
510	0	0,000199769	0
511	0	0,000262854	0
512	0	0,000262854	0
513	0	0,000262854	0
514	0	0,000262854	0
515	0	0,000315425	0
516	0	0,000315425	0
517	0	0,000315425	0
518	0	0,000315425	0
519	0	0,000304911	0
520	0	0,000304911	0
521	0	0,000304911	0
522	0	0,000304911	0

523	0	0,000199769	0
524	0	0,000199769	0
525	0	0,000199769	0
526	0	0,000199769	0
527	0	0,000199769	0
528	0	0,000210283	0
529	0	0,000210283	0
530	0	0,000210283	0
531	0	0,000210283	0
532	0	0,000304911	0
533	0	0,000304911	0
534	0	0,000304911	0
535	0	0,000304911	0
536	0	0,000367996	0
537	0	0,000367996	0
538	0	0,000367996	0
539	0	0,000367996	0
540	0	0,000262854	0
541	0	0,000262854	0
542	0	0,000262854	0
543	0	0,000262854	0
544	0	0,000304911	0
545	0	0,000304911	0
546	0	0,000304911	0
547	0	0,000304911	0
548	0	0,000189255	0
549	0	0,000189255	0
550	0	0,000189255	0
551	0	0,000189255	0
552	0	0,000241826	0
553	0	0,000241826	0
554	0	0,000241826	0
555	0	0,000241826	0
556	0	0,000325939	0
557	0	0,000325939	0
558	0	0,000325939	0
559	0	0,000325939	0
560	0	0,000283883	0

561	0	0,000283883	0
562	0	0,000283883	0
563	0	0,000283883	0
564	0	0,000283883	0
565	0	0,000304911	0
566	0	0,000304911	0
567	0	0,000304911	0
568	0	0,000304911	0
569	0	0,000273368	0
570	0	0,000273368	0
571	0	0,000273368	0
572	0	0,000273368	0
573	0	0,000294397	0
574	0	0,000294397	0
575	0	0,000294397	0
576	0	0,000294397	0
577	0	0,000283883	0
578	0	0,000283883	0
579	0	0,000283883	0
580	0	0,000283883	0
581	0	0,000199769	0
582	0	0,000199769	0
583	0	0,000199769	0
584	0	0,000199769	0
585	0	0,000231312	0
586	0	0,000231312	0
587	0	0,000231312	0
588	0	0,000231312	0
589	0	0,000304911	0
590	0	0,000304911	0
591	0	0,000304911	0
592	0	0,000304911	0
593	0	0,000346968	0
594	0	0,000346968	0
595	0	0,000346968	0
596	0	0,000346968	0
597	0	0,000346968	0
598	0	0,000294397	0

599	0	0,000294397	0
600	0	0,000294397	0
601	0	0,000294397	0
602	0	0,000189255	0
603	0	0,000189255	0
604	0	0,000189255	0
605	0	0,000189255	0
606	0	0,000241826	0
607	0	0,000241826	0
608	0	0,000241826	0
609	0	0,000241826	0
610	0	0,000294397	0
611	0	0,000294397	0
612	0	0,000294397	0
613	0	0,000294397	0
614	0	0,000325939	0
615	0	0,000325939	0
616	0	0,000325939	0
617	0	0,000325939	0
618	0	0,000294397	0
619	0	0,000294397	0
620	0	0,000294397	0
621	0	0,000294397	0
622	0	0,000283883	0
623	0	0,000283883	0
624	0	0,000283883	0
625	0	0,000283883	0
626	0	0,000273368	0
627	0	0,000273368	0
628	0	0,000273368	0
629	0	0,000273368	0
630	0	0,000304911	0
631	0	0,000304911	0
632	0	0,000304911	0
633	0	0,000304911	0
634	0	0,000304911	0
635	0	0,000273368	0
636	0	0,000273368	0

637	0	0,000273368	0
638	0	0,000273368	0
639	0	0,000273368	0
640	0	0,000273368	0
641	0	0,000273368	0
642	0	0,000273368	0
643	0	0,000199769	0
644	0	0,000199769	0
645	0	0,000199769	0
646	0	0,000199769	0
647	0	0,000199769	0
648	0	0,000294397	0
649	0	0,000294397	0
650	0	0,000294397	0
651	0	0,000294397	0
652	0	0,000304911	0
653	0	0,000304911	0
654	0	0,000304911	0
655	0	0,000304911	0
656	0	0,000294397	0
657	0	0,000294397	0
658	0	0,000294397	0
659	0	0,000294397	0
660	0	0,000231312	0
661	0	0,000231312	0
662	0	0,000231312	0
663	0	0,000231312	0
664	0	0,000199769	0
665	0	0,000199769	0
666	0	0,000199769	0
667	0	0,000199769	0
668	0	0,000304911	0
669	0	0,000304911	0
670	0	0,000304911	0
671	0	0,000304911	0
672	0	0,000336453	0
673	0	0,000336453	0
674	0	0,000336453	0

675	0	0,000336453	0
676	0	0,000294397	0
677	0	0,000294397	0
678	0	0,000294397	0
679	0	0,000294397	0
680	0	0,000346968	0
681	0	0,000346968	0
682	0	0,000346968	0
683	0	0,000346968	0
684	0	0,000346968	0
685	0	0,000283883	0
686	0	0,000283883	0
687	0	0,000283883	0
688	0	0,000283883	0
689	0	0,000178741	0
690	0	0,000178741	0
691	0	0,000178741	0
692	0	0,000178741	0
693	0	0,000325939	0
694	0	0,000325939	0
695	0	0,000325939	0
696	0	0,000325939	0
697	0	0,000304911	0
698	0	0,000304911	0
699	0	0,000304911	0
700	0	0,000304911	0
701	0	0,000294397	0
702	0	0,000294397	0
703	0	0,000294397	0
704	0	0,000294397	0
705	0	0,000325939	0
706	0	0,000325939	0
707	0	0,000325939	0
708	0	0,000325939	0
709	0	0,000210283	0
710	0	0,000210283	0
711	0	0,000210283	0
712	0	0,000210283	0

713	0	0,000199769	0
714	0	0,000199769	0
715	0	0,000199769	0
716	0	0,000199769	0
717	0	0,000325939	0
718	0	0,000325939	0
719	0	0,000325939	0
720	0	0,000325939	0
721	0	0,000325939	0
722	0	0,000304911	0
723	0	0,000304911	0
724	0	0,000304911	0
725	0	0,000304911	0
726	1,111111111	0,001219643	0,001219643
727	1,111111111	0,001219643	0,001219643
728	1,111111111	0,001219643	0,001219643
729	1,111111111	0,001219643	0,001219643
730	3,333333333	0,001019874	0,001019874
731	3,333333333	0,001019874	0,001019874
732	3,333333333	0,001019874	0,001019874
733	3,333333333	0,001019874	0,001019874
734	3,333333333	0,00075702	0,00075702
735	5	0,00075702	0,00075702
736	5	0,00075702	0,00075702
737	5	0,00075702	0,00075702
738	5	0,000315425	0,000315425
739	5	0,000315425	0,000315425
740	5	0,000315425	0,000315425
741	5	0,000315425	0,000315425
742	5	0,000210283	0,000210283
743	4,444444444	0,000210283	0,000210283
744	4,444444444	0,000210283	0,000210283
745	4,444444444	0,000210283	0,000210283
746	4,444444444	0,000315425	0,000315425
747	1,666666667	0,000315425	0,000315425
748	1,666666667	0,000315425	0,000315425
749	1,666666667	0,000315425	0,000315425
750	1,666666667	0,000294397	0,000294397

751	0,555555556	0,000294397	0,000294397
752	0,555555556	0,000294397	0,000294397
753	0,555555556	0,000294397	0,000294397
754	0,555555556	0,000294397	0,000294397
755	0,555555556	0,000578279	0,000578279
756	0,555555556	0,000578279	0,000578279
757	0,555555556	0,000578279	0,000578279
758	0,555555556	0,000578279	0,000578279
759	1,111111111	0,000357482	0,000357482
760	1,111111111	0,000357482	0,000357482
761	1,111111111	0,000357482	0,000357482
762	1,111111111	0,000357482	0,000357482
763	1,111111111	0,000315425	0,000315425
764	0,555555556	0,000315425	0,000315425
765	0,555555556	0,000315425	0,000315425
766	0,555555556	0,000315425	0,000315425
767	0,555555556	0,000357482	0,000357482
768	1,666666667	0,000357482	0,000357482
769	1,666666667	0,000357482	0,000357482
770	1,666666667	0,000357482	0,000357482
771	1,666666667	0,00138787	0,00138787
772	2,777777778	0,00138787	0,00138787
773	2,777777778	0,00138787	0,00138787
774	2,777777778	0,00138787	0,00138787
775	2,777777778	0,000536223	0,000536223
776	5,555555556	0,000536223	0,000536223
777	5,555555556	0,000536223	0,000536223
778	5,555555556	0,000536223	0,000536223
779	5,555555556	0,000283883	0,000283883
780	3,888888889	0,000283883	0,000283883
781	3,888888889	0,000283883	0,000283883
782	3,888888889	0,000283883	0,000283883
783	3,888888889	0,000283883	0,000283883
784	0,555555556	0,000273368	0,000273368
785	0,555555556	0,000273368	0,000273368
786	0,555555556	0,000273368	0,000273368
787	0,555555556	0,000273368	0,000273368
788	0	0,000189255	0

789	0	0,000192377	0
790	0	0,000192377	0
791	0	0,000221498	0
792	0	0,000221498	0
793	0	0,000221498	0
794	0	0,000203849	0
795	0	0,000203849	0
796	0	0,000695381	0
797	0	0,000695381	0
798	0	0,000695381	0
799	0	0,000702441	0
800	0,555555556	0,000702441	0,000702441
801	0,555555556	0,000702441	0,000702441
802	1,666666667	0,000342396	0,000342396
803	1,666666667	0,000342396	0,000342396
804	1,666666667	0,000342396	0,000342396
805	1,666666667	0,000451821	0,000451821
806	1,666666667	0,000451821	0,000451821
807	1,666666667	0,000451821	0,000451821
808	1,666666667	0,000344161	0,000344161
809	1,666666667	0,000344161	0,000344161
810	1,666666667	0,000496827	0,000496827
811	1,111111111	0,000496827	0,000496827
812	1,111111111	0,000496827	0,000496827
813	2,222222222	0,000621254	0,000621254
814	2,222222222	0,000621254	0,000621254
815	2,222222222	0,000621254	0,000621254
816	2,777777778	0,000728033	0,000728033
817	2,777777778	0,000728033	0,000728033
818	2,777777778	0,000728033	0,000728033
819	2,777777778	0,00053742	0,00053742
820	2,777777778	0,00053742	0,00053742
821	2,777777778	0,001279572	0,001279572
822	3,888888889	0,001279572	0,001279572
823	3,888888889	0,001279572	0,001279572
824	3,888888889	0,000690087	0,000690087
825	5	0,000690087	0,000690087
826	5	0,000690087	0,000690087

827	5,555555556	0,00073421	0,00073421
828	5,555555556	0,00073421	0,00073421
829	5,555555556	0,00073421	0,00073421
830	6,111111111	0,000527713	0,000527713
831	6,111111111	0,000527713	0,000527713
832	6,111111111	0,000527713	0,000527713
833	6,111111111	0,000351221	0,000351221
834	6,111111111	0,000351221	0,000351221
835	6,111111111	0,000310627	0,000310627
836	6,111111111	0,000310627	0,000310627
837	6,111111111	0,000310627	0,000310627
838	6,111111111	0,000479178	0,000479178
839	6,666666667	0,000479178	0,000479178
840	6,666666667	0,000479178	0,000479178
841	7,222222222	0,000390931	0,000390931
842	7,222222222	0,000390931	0,000390931
843	7,222222222	0,000390931	0,000390931
844	7,777777778	0,000463293	0,000463293
845	7,777777778	0,000463293	0,000463293
846	7,777777778	0,000821574	0,000821574
847	7,777777778	0,000821574	0,000821574
848	7,777777778	0,000821574	0,000821574
849	7,777777778	0,000525066	0,000525066
850	7,777777778	0,000525066	0,000525066
851	7,777777778	0,000525066	0,000525066
852	7,777777778	0,000405051	0,000405051
853	7,222222222	0,000405051	0,000405051
854	7,222222222	0,000405051	0,000405051
855	5	0,000346808	0,000346808
856	5	0,000346808	0,000346808
857	5	0,000346808	0,000346808
858	1,666666667	0,000214439	0,000214439
859	1,666666667	0,000214439	0,000214439
860	1,666666667	0,000209144	0,000209144
861	0,555555556	0,000209144	0,000209144
862	0,555555556	0,000209144	0,000209144
863	0,555555556	0,000239148	0,000239148
864	0	0,000239148	0

865	0	0,000189255	0
866	0	0,000189255	0
867	0	0,000189255	0
868	0	0,000189255	0
869	0	0,000189255	0
870	0	0,000189255	0
871	0	0,000189255	0
872	0	0,000189255	0
873	0	0,001282728	0
874	0	0,001282728	0
875	0	0,001282728	0
876	3,888888889	0,000609822	0,000609822
877	3,888888889	0,000609822	0,000609822
878	3,888888889	0,002586485	0,002586485
879	6,111111111	0,002586485	0,002586485
880	6,111111111	0,002586485	0,002586485
881	8,333333333	0,000588793	0,000588793
882	8,333333333	0,000588793	0,000588793
883	8,333333333	0,000494166	0,000494166
884	7,777777778	0,000494166	0,000494166
885	7,777777778	0,000494166	0,000494166
886	8,333333333	0,000841133	0,000841133
887	8,333333333	0,000841133	0,000841133
888	8,333333333	0,000841133	0,000841133
889	8,888888889	0,001787408	0,001787408
890	8,888888889	0,001787408	0,001787408
891	9,444444444	0,001861008	0,001861008
892	9,444444444	0,001861008	0,001861008
893	9,444444444	0,001861008	0,001861008
894	10,55555556	0,001282728	0,001282728
895	10,55555556	0,001282728	0,001282728
896	10,55555556	0,000956789	0,000956789
897	10,55555556	0,000956789	0,000956789
898	10,55555556	0,000956789	0,000956789
899	10	0,00050468	0,00050468
900	10	0,00050468	0,00050468
901	10	0,000346968	0,000346968
902	8,888888889	0,000346968	0,000346968

903	8,888888889	0,000346968	0,000346968
904	8,888888889	0,001755866	0,001755866
905	8,888888889	0,001755866	0,001755866
906	8,888888889	0,00201872	0,00201872
907	10	0,00201872	0,00201872
908	10	0,00201872	0,00201872
909	10,55555556	0,001871522	0,001871522
910	10,55555556	0,001871522	0,001871522
911	10,55555556	0,000546737	0,000546737
912	11,11111111	0,000546737	0,000546737
913	11,11111111	0,000546737	0,000546737
914	10,55555556	0,000441595	0,000441595
915	10,55555556	0,000441595	0,000441595
916	10,55555556	0,000336453	0,000336453
917	10	0,000336453	0,000336453
918	10	0,000336453	0,000336453
919	7,777777778	0,000283883	0,000283883
920	7,777777778	0,000283883	0,000283883
921	7,777777778	0,000189255	0,000189255
922	6,111111111	0,000189255	0,000189255
923	6,111111111	0,000189255	0,000189255
924	3,888888889	0,001345813	0,001345813
925	3,888888889	0,001345813	0,001345813
926	5	0,00050468	0,00050468
927	5	0,00050468	0,00050468
928	5	0,00050468	0,00050468
929	4,444444444	0,001345813	0,001345813
930	4,444444444	0,001345813	0,001345813
931	5,555555556	0,001808437	0,001808437
932	5,555555556	0,001808437	0,001808437
933	5,555555556	0,001808437	0,001808437
934	6,111111111	0,000704449	0,000704449
935	6,111111111	0,000704449	0,000704449
936	6,111111111	0,001461469	0,001461469
937	5	0,001461469	0,001461469
938	5	0,001461469	0,001461469
939	6,111111111	0,002008206	0,002008206
940	6,111111111	0,002008206	0,002008206

941	6,111111111	0,002681113	0,002681113
942	7,777777778	0,002681113	0,002681113
943	7,777777778	0,002681113	0,002681113
944	8,333333333	0,000315425	0,000315425
945	8,333333333	0,000315425	0,000315425
946	8,333333333	0,000662393	0,000662393
947	7,777777778	0,000662393	0,000662393
948	7,777777778	0,000662393	0,000662393
949	7,777777778	0,000714963	0,000714963
950	7,777777778	0,000714963	0,000714963
951	7,777777778	0,000588793	0,000588793
952	7,777777778	0,000588793	0,000588793
953	7,777777778	0,000588793	0,000588793
954	7,222222222	0,000536223	0,000536223
955	7,222222222	0,000536223	0,000536223
956	7,222222222	0,000304911	0,000304911
957	7,222222222	0,000304911	0,000304911
958	7,222222222	0,000304911	0,000304911
959	6,666666667	0,000998846	0,000998846
960	6,666666667	0,000998846	0,000998846
961	6,666666667	0,000346968	0,000346968
962	6,666666667	0,000346968	0,000346968
963	6,666666667	0,000346968	0,000346968
964	6,666666667	0,001366842	0,001366842
965	6,666666667	0,001366842	0,001366842
966	6,666666667	0,001366842	0,001366842
967	7,777777778	0,000872676	0,000872676
968	7,777777778	0,000872676	0,000872676
969	8,333333333	0,000473138	0,000473138
970	8,333333333	0,000473138	0,000473138
971	8,333333333	0,000473138	0,000473138
972	7,222222222	0,001198615	0,001198615
973	7,222222222	0,001198615	0,001198615
974	7,222222222	0,002250032	0,002250032
975	8,333333333	0,002250032	0,002250032
976	8,333333333	0,002250032	0,002250032
977	10	0,000799077	0,000799077
978	10	0,000799077	0,000799077

979	10	0,000294397	0,000294397
980	8,888888889	0,000294397	0,000294397
981	8,888888889	0,000294397	0,000294397
982	8,333333333	0,000830619	0,000830619
983	8,333333333	0,000830619	0,000830619
984	8,333333333	0,002544428	0,002544428
985	9,444444444	0,002544428	0,002544428
986	9,444444444	0,002544428	0,002544428
987	10,55555556	0,002323631	0,002323631
988	10,55555556	0,002323631	0,002323631
989	10,55555556	0,000494166	0,000494166
990	11,11111111	0,000494166	0,000494166
991	11,11111111	0,000494166	0,000494166
992	10,55555556	0,002365688	0,002365688
993	10,55555556	0,002365688	0,002365688
994	10,55555556	0,002554943	0,002554943
995	11,11111111	0,002554943	0,002554943
996	11,11111111	0,002554943	0,002554943
997	11,66666667	0,001587639	0,001587639
998	11,66666667	0,001587639	0,001587639
999	11,66666667	0,001829465	0,001829465
1000	11,66666667	0,001829465	0,001829465
1001	11,66666667	0,001829465	0,001829465
1002	12,22222222	0,001818951	0,001818951
1003	12,22222222	0,001818951	0,001818951
1004	12,22222222	0,001818951	0,001818951
1005	13,33333333	0,001482498	0,001482498
1006	13,33333333	0,001482498	0,001482498
1007	13,33333333	0,00138787	0,00138787
1008	13,33333333	0,00138787	0,00138787
1009	13,33333333	0,00138787	0,00138787
1010	13,33333333	0,001598153	0,001598153
1011	13,33333333	0,001598153	0,001598153
1012	13,33333333	0,001125016	0,001125016
1013	13,33333333	0,001125016	0,001125016
1014	13,33333333	0,001125016	0,001125016
1015	12,77777778	0,001209129	0,001209129
1016	12,77777778	0,001209129	0,001209129

1017	12,77777778	0,002229003	0,002229003
1018	12,77777778	0,002229003	0,002229003
1019	12,77777778	0,002229003	0,002229003
1020	13,33333333	0,000704449	0,000704449
1021	13,33333333	0,000704449	0,000704449
1022	13,33333333	0,000441595	0,000441595
1023	12,77777778	0,000441595	0,000441595
1024	12,77777778	0,000441595	0,000441595
1025	10,55555556	0,000315425	0,000315425
1026	10,55555556	0,000315425	0,000315425
1027	10,55555556	0,000304911	0,000304911
1028	5,555555556	0,000304911	0,000304911
1029	5,555555556	0,000304911	0,000304911
1030	2,777777778	0,000210283	0,000210283
1031	2,777777778	0,000210283	0,000210283
1032	2,777777778	0,000210283	0,000210283
1033	0,555555556	0,000189255	0,000189255
1034	0,555555556	0,000189255	0,000189255
1035	0	0,000189255	0
1036	0	0,000283883	0
1037	0	0,000210283	0
1038	0	0,000210283	0
1039	0	0,000210283	0
1040	0	0,000273368	0
1041	0,555555556	0,000273368	0,000273368
1042	0,555555556	0,000273368	0,000273368
1043	0	0,000262854	0
1044	0	0,000210283	0
1045	0	0,000210283	0
1046	0	0,000210283	0
1047	0	0,000199769	0
1048	0,555555556	0,000199769	0,000199769
1049	0,555555556	0,000199769	0,000199769
1050	0,555555556	0,000199769	0,000199769
1051	0,555555556	0,000220798	0,000220798
1052	0	0,000220798	0
1053	0	0,000420567	0
1054	0	0,000325939	0

1055	0	0,000325939	0
1056	0	0,000325939	0
1057	0	0,000210283	0
1058	0	0,000210283	0
1059	0	0,000210283	0
1060	0	0,000283883	0
1061	0	0,000283883	0
1062	0	0,000283883	0
1063	0	0,000273368	0
1064	0	0,000273368	0
1065	0	0,000483652	0
1066	0	0,000483652	0
1067	0	0,000483652	0
1068	0	0,000336453	0
1069	0	0,000336453	0
1070	0	0,000336453	0
1071	0	0,000336453	0
1072	0	0,000336453	0
1073	0	0,000336453	0
1074	0	0,000336453	0
1075	0	0,000336453	0
1076	0	0,000336453	0
1077	0	0,000325939	0
1078	0	0,000325939	0
1079	0	0,000325939	0
1080	0	0,000336453	0
1081	0	0,000336453	0
1082	0	0,000336453	0
1083	0	0,000336453	0
1084	0	0,000336453	0
1085	0	0,000346968	0
1086	0	0,000346968	0
1087	0	0,000346968	0
1088	0	0,000220798	0
1089	0	0,000220798	0
1090	0	0,000220798	0
1091	0	0,000210283	0
1092	0	0,000210283	0

1093	0	0,000210283	0
1094	0	0,000210283	0
1095	0	0,000210283	0
1096	0	0,000210283	0
1097	0	0,000210283	0
1098	0	0,000210283	0
1099	0	0,000210283	0
1100	0	0,000210283	0
1101	0	0,000210283	0
1102	0	0,000336453	0
1103	0	0,000336453	0
1104	0	0,000336453	0
1105	0	0,000346968	0
1106	0	0,000346968	0
1107	0	0,000346968	0
1108	0	0,000336453	0
1109	0	0,000336453	0
1110	0	0,000336453	0
1111	0	0,000336453	0
1112	0	0,000336453	0
1113	0	0,000220798	0
1114	0	0,000220798	0
1115	0	0,000220798	0
1116	0	0,000220798	0
1117	0	0,000220798	0
1118	0	0,000220798	0
1119	0	0,000210283	0
1120	0	0,000210283	0
1121	0	0,000210283	0
1122	0	0,000210283	0
1123	0	0,000210283	0
1124	0	0,000210283	0
1125	0	0,000210283	0
1126	0	0,000210283	0
1127	0	0,000210283	0
1128	0	0,000210283	0
1129	0	0,000210283	0
1130	0	0,000325939	0

1131	0	0,000325939	0
1132	0	0,000325939	0
1133	0	0,000336453	0
1134	0	0,000336453	0
1135	0	0,000336453	0
1136	0	0,000336453	0
1137	0	0,000336453	0
1138	0	0,000336453	0
1139	0	0,000336453	0
1140	0	0,000336453	0
1141	0	0,000336453	0
1142	0	0,000220798	0
1143	0	0,000220798	0
1144	0	0,000220798	0
1145	0	0,000252385	0
1146	0	0,000252385	0
1147	0	0,00031151	0
1148	0	0,00031151	0
1149	0	0,000323864	0
1150	0	0,000323864	0
1151	0	0,000323864	0
1152	0	0,000308862	0
1153	0	0,000308862	0
1154	0	0,000308862	0
1155	0	0,000315922	0
1156	0	0,000315922	0
1157	0	0,000315922	0
1158	0	0,000300038	0
1159	0	0,000300038	0
1160	0	0,000321217	0
1161	0	0,000321217	0
1162	0	0,000321217	0
1163	0	0,000277976	0
1164	0	0,000277976	0
1165	0	0,000277976	0
1166	0	0,000295625	0
1167	0	0,000295625	0
1168	0	0,000320334	0

1169	0	0,000320334	0
1170	0	0,000320334	0
1171	0	0,00031504	0
1172	0	0,00031504	0
1173	0	0,000228558	0
1174	0	0,000228558	0
1175	0	0,000228558	0
1176	0	0,000204732	0
1177	0	0,000204732	0
1178	0	0,000204732	0
1179	0	0,000212674	0
1180	0	0,000212674	0
1181	0	0,000212674	0
1182	0	0,000208261	0
1183	0	0,000208261	0
1184	0	0,000294743	0
1185	0	0,000294743	0
1186	0	0,000294743	0
1187	0	0,000303568	0
1188	0	0,000303568	0
1189	0	0,000303568	0
1190	0	0,000318569	0
1191	0	0,000318569	0
1192	0	0,000313275	0
1193	0	0,000313275	0
1194	0	0,000313275	0
1195	0	0,000279741	0
1196	0	0,000279741	0
1197	0	0,000279741	0
1198	0	0,000329159	0
1199	0	0,000329159	0
1200	0	0,000878934	0
1201	0	0,000878934	0
1202	0	0,000878934	0
1203	1,111111111	0,000306215	0,000306215
1204	1,111111111	0,000306215	0,000306215
1205	1,111111111	0,000306215	0,000306215
1206	1,666666667	0,000273564	0,000273564

1207	1,666666667	0,000273564	0,000273564
1208	1,666666667	0,000255915	0,000255915
1209	1,111111111	0,000255915	0,000255915
1210	1,111111111	0,000255915	0,000255915
1211	1,111111111	0,000210026	0,000210026
1212	0,555555556	0,000210026	0,000210026
1213	0,555555556	0,000210026	0,000210026
1214	0	0,000207379	0
1215	0	0,000283883	0
1216	0	0,000283883	0
1217	0	0,000283883	0
1218	0	0,000283883	0
1219	0	0,000283883	0
1220	0	0,000283883	0
1221	0	0,000283883	0
1222	0	0,000283883	0
1223	0	0,000283883	0
1224	0	0,000273368	0
1225	0	0,000273368	0
1226	0	0,000273368	0
1227	0	0,000273368	0
1228	0	0,000273368	0
1229	0	0,000273368	0
1230	0	0,000283883	0
1231	0	0,000283883	0
1232	0	0,000283883	0
1233	0	0,000283883	0
1234	0	0,000304911	0
1235	0	0,000304911	0
1236	0	0,000304911	0
1237	0	0,000304911	0
1238	0	0,000304911	0
1239	0	0,000304911	0
1240	0	0,000262854	0
1241	0	0,000262854	0
1242	2,777777778	0,000262854	0,000262854
1243	2,777777778	0,000262854	0,000262854
1244	2,777777778	0,000262854	0,000262854

1245	2,777777778	0,000262854	0,000262854
1246	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1247	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1248	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1249	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1250	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1251	3,888888889	0,000778048	0,000778048
1252	5	0,000336453	0,000336453
1253	5	0,000336453	0,000336453
1254	5	0,000336453	0,000336453
1255	5	0,000336453	0,000336453
1256	5	0,000336453	0,000336453
1257	5	0,000336453	0,000336453
1258	5	0,000262854	0,000262854
1259	5	0,000262854	0,000262854
1260	5	0,000262854	0,000262854
1261	5	0,000262854	0,000262854
1262	5	0,000231312	0,000231312
1263	5	0,000231312	0,000231312
1264	4,444444444	0,000231312	0,000231312
1265	4,444444444	0,000231312	0,000231312
1266	4,444444444	0,000231312	0,000231312
1267	4,444444444	0,000231312	0,000231312
1268	4,444444444	0,000357482	0,000357482
1269	4,444444444	0,000357482	0,000357482
1270	3,888888889	0,000357482	0,000357482
1271	3,888888889	0,000357482	0,000357482
1272	3,888888889	0,000357482	0,000357482
1273	3,888888889	0,000357482	0,000357482
1274	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1275	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1276	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1277	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1278	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1279	3,888888889	0,000452109	0,000452109
1280	4,444444444	0,000367996	0,000367996
1281	4,444444444	0,000367996	0,000367996
1282	4,444444444	0,000367996	0,000367996

1283	4,444444444	0,000367996	0,000367996
1284	4,444444444	0,000367996	0,000367996
1285	4,444444444	0,000367996	0,000367996
1286	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1287	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1288	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1289	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1290	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1291	4,444444444	0,000304911	0,000304911
1292	3,888888889	0,000241826	0,000241826
1293	3,888888889	0,000241826	0,000241826
1294	3,888888889	0,000241826	0,000241826
1295	3,888888889	0,000241826	0,000241826
1296	3,888888889	0,000220798	0,000220798
1297	3,888888889	0,000220798	0,000220798
1298	2,222222222	0,000220798	0,000220798
1299	2,222222222	0,000220798	0,000220798
1300	2,222222222	0,000220798	0,000220798
1301	2,222222222	0,000220798	0,000220798
1302	2,222222222	0,000189255	0,000189255
1303	2,222222222	0,000189255	0,000189255
1304	0	0,000189255	0