



Estrategias de eficiencia energética en vehículos livianos del transporte por carretera en Colombia

Energy efficiency strategies for light duty vehicles in Colombia

Juan C. Castillo^{1a}, Álvaro Restrepo^{1b}, Juan E. Tibaquirá^{1c}, Luis F. Quirama^{1d}

¹Grupo de Investigación en Gestión Energética, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correos electrónicos: ^a jccastillo@utp.edu.co, ^b arestrep@utp.edu.co, ^c juantiba@utp.edu.co, ^d luisfelipequirama@utp.edu.co.

Recibido: 28 septiembre, 2018. Aceptado: 2 marzo, 2019. Versión final: 30 abril, 2019.

Resumen

El sector de transporte por carretera en Colombia es el responsable del 44 % del consumo de energéticos. Igualmente, se clasifica como el principal consumidor de los combustibles derivados del petróleo y el sector productivo con mayores pérdidas de energía. En este estudio se presentan estrategias tecnológicas y operacionales que mejoran el rendimiento de los vehículos livianos. Además, se identifican metodologías encaminadas a la medición del consumo energético y emisiones de los vehículos y se evalúa la conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética en Colombia. Como resultado, se implementó la metodología de pruebas basada en la Regulación CFR 40 de los Estados Unidos y COPANT en un laboratorio del país, y se evaluó mediante el aseguramiento metrológico el consumo de combustible en un vehículo liviano de combustión interna. Adicionalmente, empleando conducción eficiente se identificó un aumento en el rendimiento del 15 % y 20 % en pruebas de laboratorio y ruta respectivamente.

Palabras clave: eficiencia; metodología; energéticos; rendimiento; consumo.

Abstract

In Colombia, road transportation consumes 44% of the overall energy available. This sector is considered a great consumer of oil-based-fuels and the least efficient productive sector. It was identified that technological and operational strategies like eco-driving enhance the performance of vehicles. A set of methodologies were implemented based on the measurement of energy consumption and emissions of vehicles, from which theoretical and experimental models have been performed. Besides, the evaluation of eco-driving as an energy efficiency strategy for Light Duty Vehicles in Colombia was carried out by conducting tests in a chassis dynamometer, based on the procedures described by the CFR 40 of the United States of America and COPANT. In addition, fuel consumption of a Light Duty Vehicle was measured and it was possible to identify the potential of eco driving as it was achieved an increase up to 20% in the energy performance of the vehicle.

Keywords: efficiency; methodology; energetics; performance; consumption.

1. Introducción

La creciente demanda en el consumo de energéticos en el mundo ha fomentado el uso racional y eficiente de la

energía. En el sector transporte, el consumo de gasolina y diésel de vehículos que transitan por carretera tiene una tasa de crecimiento más rápida que en otros sectores, y sus emisiones presentan una trayectoria ascendente en un



futuro próximo [1], [2]. Este sector ha sido reconocido mundialmente como uno de los mayores generadores de gases de efecto invernadero (GEI) [3]. Particularmente, en Colombia el transporte por carretera es el responsable del 44 % del consumo energético y el principal consumidor de combustibles derivados del petróleo según la Unidad de Planeación Minero Energética. Además, consume alrededor del 47 % del ACPM (diésel) y un 29 % de las gasolinas de todo el país [4]. Con el fin de reducir este problema, se ha evaluado el consumo energético del sector transporte, y se han aportado soluciones y normativas para mejorar el rendimiento del combustible en los vehículos [5]–[9]. Estas estrategias de eficiencia energética pueden ser tecnológicas u operacionales; entre ellas, se destacan la reducción de viajes en vehículos privados implementando políticas ambientales, energéticas, y urbanas; hacer uso de tecnologías en el vehículo y combustibles más limpios, y establecer niveles máximos de consumo de energía, o mínimos de eficiencia energética en vehículos mediante políticas de etiquetado vehicular, lo que permite que desde la compra de vehículos las personas particulares también puedan aportar hacia un transporte sustentable [10]–[13].

Por otro lado, se ha identificado que la conducción presenta una notable influencia sobre el consumo de energía, la cual, si se realiza de manera eficiente, puede generar un ahorro que oscila entre un 5 % y un 25 %, en función de las condiciones de operación [14]. Se plantea que las medidas de mitigación deberían destacar la conducción eficiente como un potencial de ahorro de combustible y reducción de emisiones, puesto que es aplicable para todas las categorías de vehículos, incluso se podría lograr un transporte por carretera sostenible en vehículos privados, sin comprometer la velocidad del viaje o el confort [15]. Sin embargo, para evaluar la implementación de una estrategia de eficiencia energética se debe medir e identificar los factores que afectan la eficiencia del transporte, tales como el sistema de gestión de flotas, la antigüedad del vehículo, la capacidad de pasajeros o carga, la infraestructura y la topografía vial [16]. Es por eso que Wu *et al.* [17] resaltan que es necesario implementar una metodología de pruebas para la medición del impacto ambiental y de consumo de energía, generado por la ejecución de estrategias de eficiencia energética en el sector transporte, ya que esto puede proporcionar mucha información para la toma de decisiones de quienes buscan mejorar el rendimiento del sector.

En este documento se presentan algunas estrategias tecnológicas y operacionales de eficiencia energética aplicables a vehículos livianos que se han evaluado teórica y experimentalmente alrededor del mundo. En

este sentido, el artículo se considera como punto de partida para identificar estrategias y evaluar su viabilidad de implementación en Colombia. Por otro lado, debido a que en el país aún no se cuenta con una metodología para medir el consumo de combustible en los vehículos por carretera, se adopta la metodología de pruebas basada en la Regulación CFR 40 de los Estados Unidos y la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), y se propone un modelo de cálculo para el método gravimétrico, agregando un aseguramiento metrológico de la medición. Por último, se analiza la conducción eficiente y se realiza su implementación en un vehículo liviano de combustión interna en laboratorio y ruta. El estudio se propone como una alternativa desde el sector transporte para contribuir con las metas de reducción del consumo de energéticos y como consecuencia reducir las emisiones vehiculares en Colombia.

2. Métodos

2.1. Estrategias de eficiencia energética en vehículos livianos

Las implementaciones de tecnologías alternativas se introducen generalmente en dos formas; el cambio de combustible y las estrategias de eficiencia [18]. Se ha encontrado que estas dos opciones de mitigación pueden reducir las emisiones vehiculares de manera diferente. La opción de cambio de combustible podría reducir significativamente la cantidad de emisiones de GEI en un plazo de tiempo relativamente corto, aunque estará limitado por sus recursos de suministro y por la economía de escala de los vehículos que los emplean; mientras que la opción de la eficiencia energética es más eficaz para moderar estas emisiones en el largo plazo [19]. Igualmente, la eficiencia durante la operación es un parámetro para considerar; se ha evaluado que una reducción simultánea del 10 % en la aceleración y la velocidad podría reducir el consumo de combustible en un 8,81 % [20]. Helfand G *et al.* mencionan que los compradores de vehículos están dispuestos a pagar alrededor del 76% del valor de los posibles ahorros futuros en el combustible [21]. A continuación, en la Tabla 1 se presentan algunas de las estrategias de eficiencia energética identificadas, las cuales pueden ser implementadas en vehículos livianos del sector transporte por carretera.

Se puede apreciar que los aumentos en el rendimiento aportados por las estrategias tecnológicas en el motor, la transmisión y el funcionamiento son menores en comparación con la transición tecnológica. Sin embargo, los costos asociados al cambio de la fuente de energía a

diésel o la hibridización son altos y reducen el interés de implementación por parte del consumidor [22].

Es importante destacar que las estrategias de reducción más eficaces incluyen medidas de comportamiento

del mercado automotor de los vehículos livianos, con el fin de determinar la proveniencia de los vehículos comercializados en el país, puesto que las metodologías de pruebas para evaluar el consumo de combustible y las emisiones difieren según su lugar de origen.

Tabla 1. Estrategias de eficiencia energética en vehículos livianos del sector transporte.

| Componente vehicular | Tecnología | Aumento en el rendimiento |
|------------------------|--|---------------------------|
| Motor | Arranque - parada | 3 % - 4 % |
| | Arranque - parada con freno regenerativo | 3 % - 7 % |
| | Válvula de actuación variable | 5 % - 9 % |
| | Mejoras en el sistema de inyección directa | 10 % - 13 % |
| | Tiempo variable de válvula de admisión | 1,5 % - 2,5 % |
| | Reducir la capacidad del motor con turbocargadores o sobrealimentación | 10 % - 15 % |
| | Relación de compresión variable | 4 % - 10 % |
| | Desconexión selectiva de cilindros | 6 % - 8 % |
| | Lubricación de menor viscosidad | 1 % - 5 % |
| Transmisión | Variación en la caja de cambios (4, 5 y 6 velocidades) | 2 % - 6 % |
| | Transmisión variable continua | 3 % - 8 % |
| | Transmisión de doble embrague o <i>clutch</i> | 4 % - 5 % |
| | Transmisiones automáticas | 7 % - 9 % |
| | Reducción de la fricción de componentes mecánicos | 3 % - 5 % |
| Funcionamiento | Mejoras aerodinámicas | 1 % - 2,4 % |
| | Reducción de resistencia a la rodadura | 1 % - 1,5 % |
| | Reducción del 10 % en el peso del vehículo | 4 % - 10 % |
| | Reducción de ralentí | 0,5 % - 8 % |
| Transición tecnológica | Hibridización | 40 % - 58 % |
| | Diésel | 20 % - 35 % |
| En la operación | | |
| Operación | Conducción eficiente | 5 % - 45 % |
| | Gestión de flotas - sistemas inteligentes de transporte | 5 % - 20 % |

Fuente: elaboración propia a partir de [41]–[46].

combinadas con el desarrollo tecnológico. Además, las mejoras en la operación en principio podrían ser implementadas mucho más rápidamente y los aumentos en el rendimiento son de alto impacto [23].

2.2. Metrología en el consumo de combustible

Colombia actualmente no cuenta con una normativa que regule la medición del consumo de combustible de los vehículos bajo pruebas dinámicas, puesto que en la normativa que rige el transporte “Resolución 910 de 2008” [24] únicamente se reglamentan los niveles permisibles de emisiones contaminantes para fuentes móviles en prueba estática y pruebas de homologación bajo la metodología americana o europea. Por tanto, se identifica la necesidad de adoptar una metodología de medición de consumo de combustible bajo pruebas dinámicas aplicable a vehículos livianos del parque automotor colombiano. Para elegir una metodología representativa, es necesario analizar el comportamiento

Posteriormente, se ilustra el comportamiento del mercado automotor de Colombia para el periodo comprendido entre los años 2015 y 2018, se ilustra en la Figura 1.

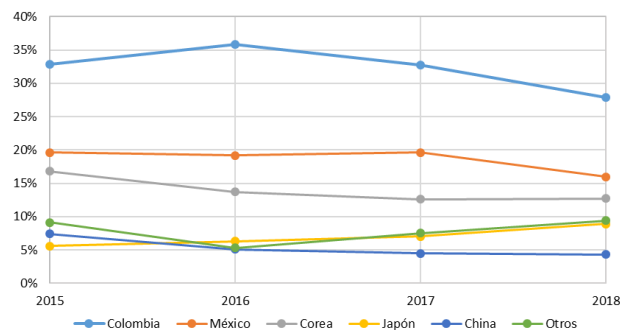


Figura 1. Origen de los vehículos en Colombia 2015 a 2018. Fuente: elaboración propia a partir de [25]–[28].

Entre los países que emplean el método de ensayo de la Comisión Económica Europea están los pertenecientes a la Unión Europea, Argentina, Australia, China, Tailandia e India, entre otros.

Por otro lado, entre los países que emplean el reglamento de los Estados Unidos para la ejecución de pruebas dinámicas automotrices están Estados Unidos, Canadá, Brasil, Corea del sur y México, entre otros [29]. Estos últimos representan el 41 % de los vehículos comercializados en Colombia hasta el 2018. Por tanto, se infiere que la metodología basada en la CFR 40 de los Estados Unidos es la más viable para implementación en el país, puesto que permite la comparación directa de los vehículos en temas de homologación y etiquetado. Igualmente, Colombia hace parte de los países pertenecientes a COPANT, los cuales, con excepción de Argentina, se basan en la CFR 40 de los Estados Unidos y en la norma de Brasil – NBR 7024, bajo el ciclo de conducción FTP-75 para la medición del consumo de combustible y las emisiones.

Adicionalmente, se realiza la implementación de la metodología en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (LPDA), de la Universidad Tecnológica de Pereira, debido a que cuenta con los instrumentos y la infraestructura apropiada para ello. Se escogió el método gravimétrico para la medición del consumo de combustible, puesto que permite obtener la medición

directa de la variable consumo y los resultados de las pruebas se pueden publicar en términos de consumo [l/100km] o rendimiento [km/l]. A continuación, en la Figura 2 se presenta la metodología de pruebas para laboratorio y el modelo de cálculo propuesto para la determinación del consumo de combustible en laboratorio y ruta.

2.3. Medición del consumo de combustible en laboratorio

El ensayo de consumo de combustible consiste en seguir el ciclo de conducción en un dinamómetro de rodillos con el vehículo de prueba y mediante el método gravimétrico medir la cantidad de masa de combustible, antes de iniciar y una vez finalizado el ensayo.

De esta forma, conociendo la distancia recorrida se puede calcular el consumo o el rendimiento del vehículo, según su finalidad. El protocolo de pruebas para ejecutar el ensayo de consumo de combustible en laboratorio, basado en las normativas internacionales, se debe ejecutar de la siguiente manera:

2.4. Cálculo del consumo de combustible en laboratorio

Las normativas internacionales mencionan que los resultados deben ser presentados en términos de

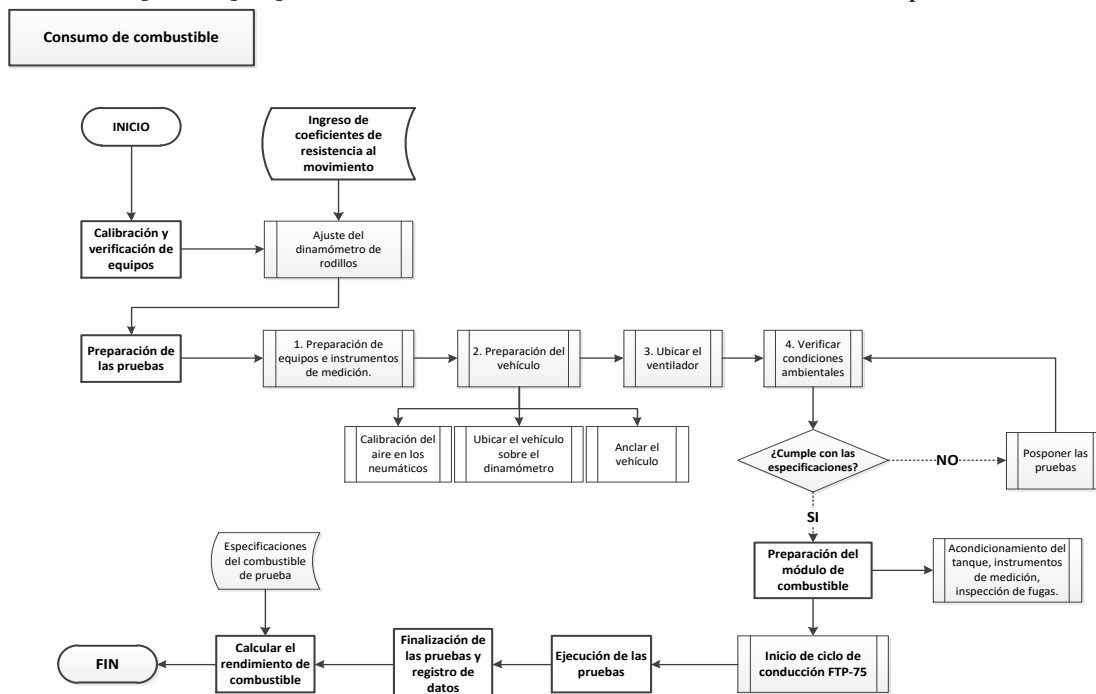


Figura 2. Protocolo de pruebas de consumo de combustible en laboratorio. Fuente: elaboración propia a partir de [30], [31].

rendimiento en kilómetros por litro para vehículos a gasolina, etanol o diésel y en kilómetros por metro cúbico para vehículos a GNV [30].

Por tanto, se propone un modelo de ecuaciones de rendimiento de combustible en laboratorio y ruta, desarrollados con base en los instrumentos y equipos presentes en el laboratorio, siguiendo las recomendaciones del Instituto Nacional de Metrología de Colombia.

El cálculo del rendimiento de combustible en laboratorio se realiza mediante la ecuación (1):

$$R = \frac{\pi \cdot N \cdot D \cdot \rho_{comb}}{m} \pm U(R) \quad (1)$$

Por último, el cálculo del rendimiento de combustible en ruta se realiza mediante la ecuación (2):

$$R = \frac{d \cdot \rho_{comb}}{m} \pm U(R) \quad (2)$$

A continuación, en la Tabla 2 se realiza una descripción de las variables presentadas en las ecuaciones (1) y (2), con su respectiva unidad de medida:

Tabla 2. Variables involucradas en el cálculo del rendimiento de combustible.

| Símbolo | Variable | Unidad |
|---------------|-------------------------------|-------------------|
| R | Rendimiento de combustible | km/l |
| N | Numero de vueltas | - |
| D | Diámetro del rodillo | m |
| ρ_{comb} | Densidad del combustible | kg/m ³ |
| m | Masa de combustible consumida | kg |
| d | Distancia | m |
| $U(R)$ | Incertidumbre expandida | km/l |

Fuente: elaboración propia.

El consumo de combustible es el recíproco del rendimiento, el cual puede ser calculado para las pruebas de laboratorio y ruta mediante la ecuación (3):

$$C = \frac{100}{R} \quad (3)$$

donde C es el consumo de combustible expresado en [l/100 km].

Por otro lado, la incertidumbre expandida puede ser calculada por la ecuación (4):

$$U(R) = k \cdot u(R) \quad (4)$$

donde k es el factor de convergencia.

En este estudio el valor fue tomado como 2 con un nivel de confianza del 95 % [32], y $u(R)$ es la incertidumbre combinada, la cual puede ser calculada como la raíz cuadrada de la varianza, tal como se muestra en la ecuación (5):

$$u(R) = \sqrt{u^2(R)} \quad (5)$$

Mientras que la varianza para pruebas de laboratorio es obtenida mediante la ecuación (6):

$$u(R)^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial N}\right)^2 u(N)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial D}\right)^2 u(D)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}}\right)^2 u(\rho_{comb})^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial m}\right)^2 u(m)^2 + u_r^2 \quad (6)$$

La varianza para pruebas de ruta se puede calcular mediante la ecuación (7):

$$u(R)^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial m}\right)^2 u(m)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}}\right)^2 u(\rho_{comb})^2 + u_r^2 \quad (7)$$

Los términos $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ representan los coeficientes de sensibilidad de cada variable mensurable, tal como se muestra en en la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de sensibilidad.

| Variable | Coefficientes de sensibilidad en laboratorio |
|---------------|---|
| N | $\frac{\partial R}{\partial N} = \frac{D \cdot \rho_{comb}}{m}$ |
| D | $\frac{\partial R}{\partial D} = \frac{N \cdot \rho_{comb}}{m}$ |
| ρ_{comb} | $\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}} = \frac{N \cdot D}{m}$ |
| m | $\frac{\partial R}{\partial m} = \frac{(N \cdot D \cdot \rho_{comb})}{m^2}$ |
| Variable | Coefficientes de sensibilidad en ruta |
| d | $\frac{\partial R}{\partial d} = \frac{\rho_{comb}}{m}$ |
| ρ_{comb} | $\frac{\partial R}{\partial \rho_{comb}} = \frac{d}{m}$ |
| m | $\frac{\partial R}{\partial m} = \frac{(d \cdot \rho_{comb})}{m^2}$ |

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, las incertidumbres asociadas a la medición de cada variable $u(y_i)$ y la calibración de los equipos $u(y_i)_{cal}$ se calculan de la siguiente forma:

$$u(y_i) = \sqrt{u(y_i)_{cal}^2 + u(y_i)_{res}^2} \tag{8}$$

$$u(y_i)_{cal} = \frac{U_{cal}}{K_{cal}} \tag{9}$$

Finalmente, la incertidumbre asociada a la resolución de los instrumentos $u(y_i)_{res}$ puede ser calculada mediante:

$$u(y_i)_{res} = \frac{r_{analogo}}{\sqrt{6}} \tag{10}$$

$$u(y_i)_{res} = \frac{r_{digital}}{2\sqrt{3}} \tag{11}$$

3. Resultados y discusión

3.1. Implementación de metodología de consumo de combustible en laboratorio

La implementación de la metodología de medición del consumo de combustible en laboratorio adaptada para Colombia se realizó sobre un vehículo liviano representativo del parque automotor del país. El análisis permitió establecer que, para el 2016, el 53 % de los vehículos registrados en Colombia son automóviles y un 24,7 % de estos son de marca Chevrolet; además, el 89 % de estos presentan un cilindraje menor a 1800 cm³[33]. Por este motivo, las pruebas de medición de consumo de combustible se realizaron en un vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 con un motor de 1600 cm³. A continuación, en la Figura 3 se presenta el montaje del vehículo para pruebas.



Figura 3. Vehículo en dinamómetro de rodillos (LPDA). Fuente: elaboración propia.

Las pruebas de laboratorio se realizaron con el apoyo de dos conductores siguiendo el protocolo establecido en la metodología. Un resumen de los resultados obtenidos tras su implementación se presenta a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4. Ensayo de consumo de combustible en laboratorio.

| Ensayo | Masa consumida [kg] | Distancia [km] | Rendimiento [km/l] |
|--------|---------------------|----------------|--------------------|
| 1 | 1,086 | 16,872 | 11,39 |
| 2 | 1,022 | 16,828 | 12,14 |
| 3 | 1,053 | 16,915 | 11,82 |
| 4 | 1,112 | 16,910 | 11,20 |
| 5 | 1,078 | 17,002 | 11,62 |
| 6 | 1,082 | 16,833 | 11,44 |

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en la prueba, se realizó una prueba de normalidad, basada en el método de Anderson-Darling, un análisis de varianza por el método ANOVA y el análisis de residuos Tukey.

Las pruebas identifican que los intervalos definidos contienen al cero y se encuentran dentro del nivel de significancia establecido, presentándose una diferencia entre medias reducida, tal como se muestra en la Figura 4.

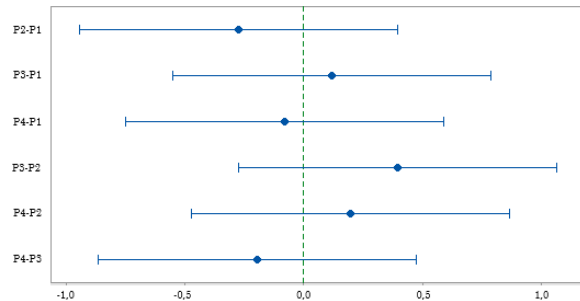


Figura 4. Tukey-Diferencia entre medias. Nivel de confianza del 95 %. Fuente: elaboración propia.

Las pruebas estadísticas permiten concluir que tanto la metodología de medición como el modelo analítico del cálculo del consumo de combustible en vehículos livianos es repetible y reproducible. Esto debido a que todas y cada una de las medias y las varianzas de los ensayos, independientemente de la prueba y de la persona que los ejecutó, se mantuvieron dentro del límite de confiabilidad del 95 %.

Los resultados de las pruebas arrojaron una incertidumbre por repetibilidad u_r igual a 0,06285 km/l, con la cual se obtiene una expandida $U(R)$ equivalente a 0,1410 km/l. De esta forma, se establece que el rendimiento del vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 con motor de 1600 cm³ es $11,40 \leq R [km/l] \leq 11,69$.

Por último, se realiza una comparación de los resultados con la etiqueta energética otorgada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos para el vehículo Chevrolet Aveo modelo 2010 (figura 5) con motor de 1600 cm³, en donde se observa un rendimiento de 27 millas por galón bajo el ciclo FTP-75, valor equivalente a 11,479 km/l. Esto muestra una diferencia de 0,07 km/l, respecto a la media del rendimiento calculado en el presente trabajo; por tanto, se infiere que el modelo matemático se ajusta a los estándares internacionales [34].



Figura 5. Etiquetado energético vehicular de Estados Unidos. Fuente: [34].

3.2. Conducción eficiente como estrategia de eficiencia energética

En el proceso de analizar las estrategias de eficiencia energética tanto tecnológicas como operacionales que han sido estudiadas en los vehículos livianos alrededor del mundo, se determinó que la conducción eficiente es una de las estrategias más viables para implementar en Colombia. Puesto que su implementación está orientada al cambio en el comportamiento, y su vida útil no está ligada a un equipo, sino al conocimiento adquirido durante la capacitación; por tanto, su beneficio-coste tiende a ser alto [22], [35]. 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 % [36]. Además, según Michael Sivak y Brandon Schoettle los factores sobre los que un conductor tiene control puede contribuir a una reducción de hasta un 45 % en el ahorro de combustible por carretera, una magnitud que vale la pena tener en cuenta [37].

Las características de conducción eficiente y segura son generalmente bien definidas y fácilmente caracterizadas. A continuación se presentan algunas de las medidas a

tener en cuenta para ejecutar estas prácticas en vehículos livianos [13], [38]–[40]:

1. Aceleración moderada (con paso de cambio entre 2000 y 2500 revoluciones para aquellos con transmisiones 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 el equipaje (evitar portaequipaje en el techo).

3.3. Implementación de la conducción eficiente

Para la evaluación de la conducción eficiente, inicialmente se estructuró un plan de capacitación para conductores en la alternativa de eficiencia energética a evaluar, la cual incluye temas teóricos como el análisis de potencia, par torsor, consumo específico de combustible, ciclos de conducción, entre otros, y de manera teórico-práctica se enseñan las técnicas de conducción eficiente. Seguido a esto, se realizó la medición del par torsor y consumo específico de combustible del vehículo de pruebas, con el fin de identificar el rango mínimo de consumo en la operación, tal como se muestra a continuación en la figura 6.

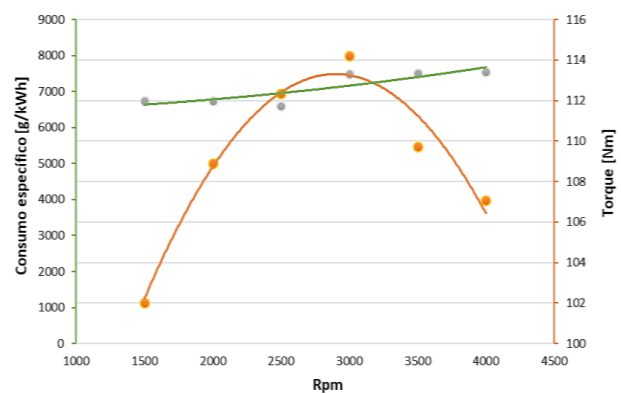


Figura 6. Curvas de consumo específico – torque vs. rpm. Fuente: elaboración propia.

Mediante el análisis de datos, se identifica que un vehículo automóvil con motor 1600 cc debe realizar los cambios de marcha a 2500 rpm para provechar su par

torsor máximo y conducir a revoluciones en el rango de 2000 rpm y 2500 rpm, para operar con bajo consumo de combustible.

Posteriormente, se realizaron pruebas de consumo de combustible en laboratorio con 2 conductores antes de la capacitación de conducción eficiente, y se evaluó la implementación de marchas altas como estrategias de conducción eficiente en laboratorio bajo el ciclo FTP-75. Identificando las revoluciones que permiten operar el vehículo en su máximo rendimiento durante la ejecución del ciclo, de esta forma incorporar los nuevos puntos para el cambio de marcha, en la ejecución del ensayo de consumo de combustible.

Como muestra la Figura 7 las curvas de rendimiento del vehículo en las pruebas realizadas permiten establecer un aumento en el rendimiento de hasta un 15 % tras la implementación de la estrategia.

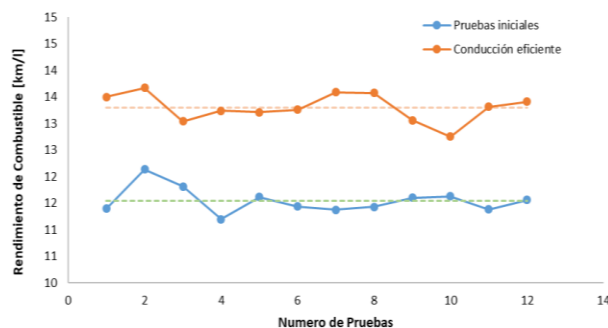


Figura 7. Pruebas de conducción eficiente en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de consumo de combustible en ruta con 4 conductores (tres hombres y una mujer), haciendo un recorrido representativo para el parque automotor pereirano. Dos de los conductores realizaron pruebas en horas pico (7 - 8 a. m.) (12 m. - 2 p. m.) y tres en horas valle (8 a. m. -12 m.) (2 - 6 p. m.) de manera aleatoria, siguiendo los requerimientos de condiciones ambientales y operativas de las normativas internacionales [30], [31].

Finalmente, se implementó la capacitación de conducción eficiente y se ejecutaron de nuevo las pruebas en ruta, con el fin de determinar el potencial de aumento en el rendimiento. En las Figuras 8 y 9 se observa como en las pruebas de ruta realizadas se logró identificar aumentos del rendimiento del vehículo de hasta un 16 % para horas pico y para horas valle respectivamente.

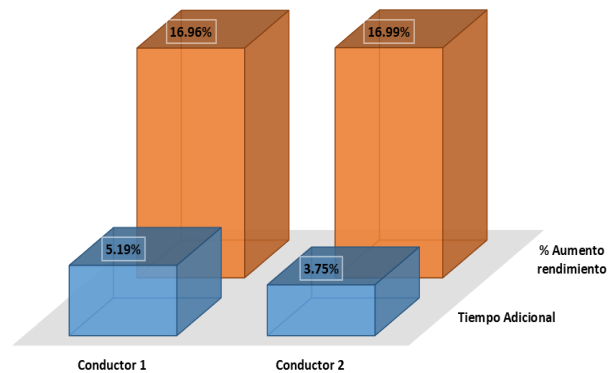


Figura 8. Conducción eficiente en horas pico. Fuente: elaboración propia.

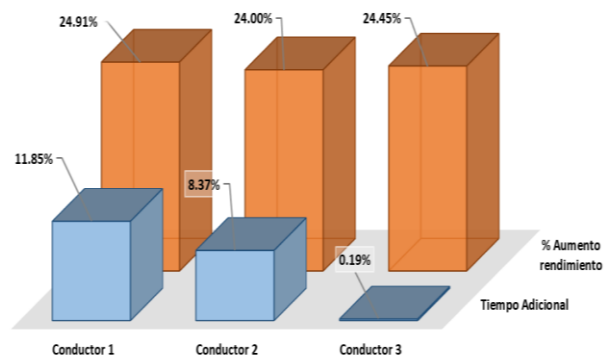


Figura 9. Conducción eficiente en horas valle. Fuente: elaboración propia.

De forma global la reducción del consumo de combustible y las emisiones de CO₂ fue de hasta un 21 %. Igualmente, se puede determinar que aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con la notoria reducción del consumo de combustible; además, se evidencia que el aprovechamiento de las técnicas de conducción va directamente relacionado con la persona que las practica, tal como lo demuestra el conductor 3 en la ejecución de las pruebas en horas valle, el cual obtuvo el mismo porcentaje de aumento del rendimiento sin inversión de tiempo adicional. Por último, en la Figura 10 se presenta el ahorro de dinero que una persona podría alcanzar al emplear técnicas de conducción eficiente y segura, considerando el costo actual de la gasolina, un recorrido diario de 22 kilómetros, los indicadores promedio de distancia recorrida anual y la vida útil de los vehículos.

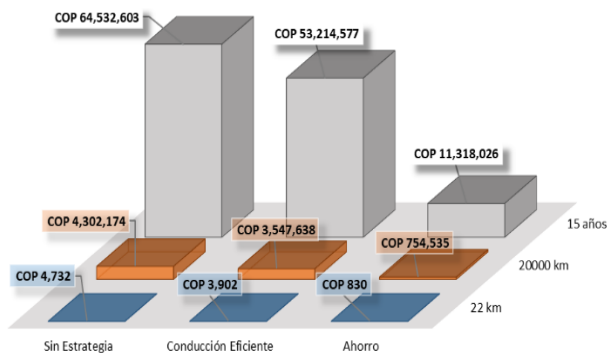


Figura 10. Análisis económico de la conducción eficiente. Fuente: elaboración propia.

La implementación de las tácticas es rentable incluso en recorridos cortos, y se alcanzan así ahorros de hasta 12 millones para una vida útil de 15 años, considerando las condiciones de operación del vehículo de pruebas y las características de los ensayos realizados en ruta. La conducción eficiente no solo presentó reducción en el consumo de combustible; los conductores identificaron en la conducción una reducción en el estrés y mayor seguridad, puesto que podían observar con anticipación los posibles contratiempos y actuar sin tener que disipar energía en los frenados bruscos o paradas repentinas.

4. Conclusiones

Se determinó que la normativa de los Estados Unidos es la más representativa para su implementación en Colombia, debido a que el mercado automotor nacional es dominado por vehículos provenientes de países que utilizan esta normativa como su protocolo oficial de pruebas de etiquetado energético u homologación

Se desarrolló un protocolo de pruebas para llevar a cabo la implementación de la medición del consumo de combustible bajo el método gravimétrico, tomando en consideración las capacidades tecnológicas y de infraestructura de los laboratorios en Colombia, y se obtuvo un 95 % de confiabilidad en el desarrollo de las pruebas. Se identificó la conducción eficiente como una de las estrategias de eficiencia energética más viables para ser implementada en el territorio colombiano, puesto que su implementación está orientada al cambio en el comportamiento y su vida útil no está ligada a un equipo, sino al conocimiento adquirido durante la capacitación; por tanto, su beneficio-coste tiende a ser alto. Además, su evaluación en la ciudad de Pereira, permitió identificar una reducción en el consumo de combustible de hasta un 21 % de manera general, considerando horas pico y valle. Por otro lado, mediante las pruebas de laboratorio se encontró que marchas altas y revoluciones bajas podrían llegar a aumentar un 15 % el rendimiento de un vehículo.

Se encontró que en la realización de ensayos de conducción eficiente existe un aumento promedio de 6,5 % en el tiempo de ejecución de pruebas; sin embargo, aun cuando se debe adicionar un tiempo para realizar conducción eficiente, este es mínimo en comparación con la notoria reducción del consumo de combustible y el costo del transporte inclusive en recorridos cortos.

5. Recomendaciones

Las pruebas de medición de consumo de combustible en ruta y laboratorio se realizaron con base en el método gravimétrico, es importante identificar la diferencia que se presenta al emplear otros métodos e indagar en sus procedimientos de ejecución y variables que influyen en la medición.

Por otro lado, es importante identificar resultados representativos para el parque automotor colombiano, en cuanto a la implementación de la conducción eficiente. Para ello, es necesario realizar pruebas con una muestra más grande tanto en el número de conductores como en la cantidad de vehículos de prueba e identificar regiones con diferentes condiciones topográficas y de infraestructura para realizar la implementación de la estrategia de eficiencia energética.

Referencias

- [1] K. Ben Abdallah, M. Belloumi, and D. De Wolf, "International comparisons of energy and environmental efficiency in the road transport sector," *Energy*, vol. 93, no. 2, pp. 2087–2101, 2015. doi: 10.1016/j.energy.2015.10.090.
- [2] R. K. Bose and V. Srinivasachary, "Policies to reduce energy use and environmental emissions in the transport sector: A case of Delhi city," *Energy Policy*, vol. 25, no. 14–15, pp. 1137–1150, 1997. doi: 10.1016/S0301-4215(97)00106-7.
- [3] L. Michaelis and O. Davidson, "GHG mitigation in the transport sector," *Energy Policy*, vol. 24, no. 10–11, pp. 969–984, 1996. doi: 10.1016/S0301-4215(96)80361-2.
- [4] Á. I. Cadena, O. V. González, O. Báez, UPME, and MinMinas, "Eficiencia Energetica En Colombia Estrategias y metas," Bogotá, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/13554352-Eficiencia-energetica-en-colombia-estrategias-y-metas.html>
- [5] Agencia Chilena de Eficiencia Energética and W. Vidal Geisel, "Guía de Conducción Eficiente," 2013. [En

- línea]. Disponible en: http://conduccioneficiente.cl/conduccion-eficiente/wp-content/uploads/2016/07/Guia_particulares.pdf
- [6] C. Daraio, M. Diana, F. Di Costa, C. Leporelli, G. Matteucci, and A. Nastasi, "Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 248, no. 1, pp. 1–20, 2016. doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.059.
- [7] X. Yan and R. J. Crookes, "Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector," *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 658–668, 2009. doi: 10.1016/j.enpol.2008.10.008.
- [8] G. R. Timilsina and A. Shrestha, "Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4523–4539, 2009. doi: 10.1016/j.enpol.2009.06.009.
- [9] P. Maniatopoulos, J. Andrews, and B. Shabani, "Towards a sustainable strategy for road transportation in Australia: The potential contribution of hydrogen," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 24–34, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.088.
- [10] CTS Embarq México, "Documento base para la elaboración de la Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios" en el tema de ahorro de energía en transporte," 2015.
- [11] J. Barboza Mariano, "Eficiencia Energética en Brasil," Montevideo, Uruguay, 2012.
- [12] C. Gavilán Labra, "Etiquetado vehicular en Chile y otras medidas de eficiencia energética para vehículos particulares," 2013.
- [13] J. N. Barkenbus, "Eco-driving: An overlooked climate change initiative," *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 762–769, 2010. doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.021.
- [14] J. Van Mierlo, G. Maggetto, E. Van de Burgwal, and R. Gense, "Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 218, no. 1, pp. 43–50, Jan. 2004. doi: 10.1243/095440704322829155..
- [15] S.-H. Ho, Y.-D. Wong, and V. W.-C. Chang, "What can eco-driving do for sustainable road transport? Perspectives from a city (Singapore) eco-driving programme," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 14, pp. 82–88, 2015. doi: 10.1016/j.scs.2014.08.002.
- [16] M. Andrejić, N. Bojović, and M. Kilibarda, "A framework for measuring transport efficiency in distribution centers," *Transp. Policy*, vol. 45, pp. 99–106, 2016. doi: 10.1016/j.tranpol.2015.09.013.
- [17] 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," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 48, pp. 460–472, 2016. doi: 10.1016/j.trd.2015.08.001.
- [18] F. Orsi, M. Muratori, M. Rocco, E. Colombo, and G. Rizzoni, "A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO₂ emissions, and economic cost," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 197–209, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.039.
- [19] J. Pongthanaisawan and C. Sorapipatana, "Greenhouse gas emissions from Thailand's transport sector: Trends and mitigation options," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 288–298, 2013. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.09.026.
- [20] M. Ehsani, A. Ahmadi, and D. Fadai, "Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1638–1648, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.062.
- [21] G. Helfand *et al.*, "Searching for hidden costs: A technology-based approach to the energy efficiency gap in light-duty vehicles," *Energy Policy*, vol. 98, pp. 590–606, 2016. doi: 10.1016/j.enpol.2016.09.014.
- [22] 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," *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 940–952, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.068.
- [23] S. Skippon, S. Veeraraghavan, H. Ma, P. Gadd, and N. Tait, "Combining technology development and behaviour change to meet CO₂ cumulative emission budgets for road transport: Case studies for the USA and Europe," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 9, pp. 1405–1423, 2012. doi: 10.1016/j.tra.2012.05.021.
- [24] V. Y. Ministerio De Ambiente And Desarrollo Territorial de Colombia, *Resolución Número 910*. Colombia: <http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/RESOLUCI%C3%93N%20910%20DE%202008.pdf>, 2008.
- [25] Asociación Colombiana de Vehículos Automotores-

ANDEMOS, “Informe Vehículos Diciembre,” 2017.

[26] Asociación Colombiana de Vehículos Automotores-ANDEMOS, “Informe Vehículos Junio,” 2018.

[27] Grupo de Estudios Económicos and Superintendencia de Industria y Comercio, “Estudios de Mercado Estudio del Sector Automotor en Colombia,” 2012 [En línea]. Disponible en: http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/promocion_competencia/Estudios_Economicos/Estudios_Economicos/Estudios_Mercado/Estudiosobreelsectorautomotor.pdf

[28] BBVA-Research, “Situación Automotriz 2018 Colombia,” 2018 [En línea]. Disponible en: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cach e:wsHOtfFJTtCj:https://www.bbvaesearch.com/wp-content/uploads/2018/03/SituacionAutomotriz2018.pdf +&cd=3&hl=es&ct=clnk&gl=co>

[29] DELPHI, “Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty,” 2016.

[30] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível - Método de ensaio*. abntcatalogo.com.br, 2017, p. 15.

[31] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escape*. 2012, p. 49.

[32] BIPM *et al.*, *Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”-propagation of distributions using a Monte Carlo Method*, 1st ed. JCGM, 2008.

[33] ANDI and FENALCO, “Informe Del Sector Automotor A Septiembre De 2015,” 2015.

[34] United States Department of Energy and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Used Car Fuel Economy Label.” [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/UsedCarLabel.jsp>. [Accessed: 30-Jul-2018].

[35] 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,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol.

33, pp. 74–86, 2014. doi: 10.1016/j.trd.2014.08.021.

[36] 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,” in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2014*, 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/EVS.2013.6914843

[37] M. Sivak and B. Schoettle, “Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy,” *Transp. Policy*, vol. 22, pp. 96–99, 2012. doi: 10.1016/j.tranpol.2012.05.010.

[38] 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,” *Therm. Sci.*, vol. 21, p. 160, Jan. 2016. doi: 10.2298/TSCI150219160B.

[39] M. Ruddy, L. Matthews, J. Andrey, and T. Del Matto, “Eco-driver training within the City of Calgary’s municipal fleet: Monitoring the impact,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 24, pp. 44–51, 2013. doi: 10.1016/j.trd.2013.05.006.

[40] IDAE, “Manual de conducción eficiente para conductores de vehículos industriales,” Madrid, 2006.

[41] G. Ombach and J. Junak, “Weight and efficiency optimization of auxiliary drives used in automobile,” in *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010*, 2010, pp. 1–6.

[42] S. Kobayashi, S. Plotkin, and S. K. Ribeiro, “Energy efficiency technologies for road vehicles,” *Energy Effic.*, vol. 2, no. 2, pp. 125–137, 2009. doi: 10.1007/s12053-008-9037-3.

[43] J. King, *The King review of low-carbon cars, Part I: The potential for CO2 reduction*. London: King, 2007.

[44] G. Fontaras and Z. Samaras, “On the way to 130gCO₂/km—Estimating the future characteristics of the average European passenger car,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 4, pp. 1826–1833, 2010. doi: 10.1016/j.enpol.2009.11.059.

[45] J.-C. Pandazis and A. Winder, “Study of Intelligent Transport Systems for reducing CO₂ emissions for passenger cars,” 2015.

[46] European Conference Of Ministers Of Transport Ecmt, “making cars more fuel efficient,” 2005.