

**CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS A GASOLINA.
ESTUDIO A PARTIR DE PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y DESCRIPTIVOS DE
CICLOS DE CONDUCCIÓN**

Ing. JOHAN ANDRÉS GÓMEZ ESPINOZA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2018**

**CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS A GASOLINA.
ESTUDIO A PARTIR DE PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS Y DESCRIPTIVOS DE
CICLOS DE CONDUCCIÓN**

Ing. JOHAN ANDRÉS GÓMEZ ESPINOZA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MÁGISTER EN INGENIERÍA
MECÁNICA

DIRECTOR:
ÁLVARO RESTREPO. Dr.Eng.
Ingeniero Mecánico

CO-DIRECTOR:
LUIS FELIPE QUIRAMA LONDOÑO M.Sc.
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2018**

Nota de aceptación:

Firmas:

Jurado

Jurado

Jurado

A mi esposa Catalina por su apoyo en este proceso y a mis hijos Alejandra y Tomás por ser el motor de mi vida

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por ser mi guía, por concederme el milagro de la vida y brindarme una vida donde cada día está llena aprendizajes y experiencias, muchas han ocurrido durante el desarrollo de este trabajo de maestría, donde no sólo aprendí a ser investigador sino a ser cada día más ser humano.

Seguidamente, quiero agradecer y resaltar la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término.

Debo expresar mi agradecimiento al Laboratorio de Ensayo para Equipos Acondicionadores de Aire – LPEA el cual me abrió el espacio, tiempo, apoyo y recursos para poder llevar a un feliz término este trabajo de grado. A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira en cabeza del señor decano Dr. Juan Esteban Tibaquirá Giraldo y los honorables miembros del Consejo de Facultad por el apoyo brindado durante todo este tiempo especialmente con los recursos económicos para realizar la pasantía internacional en el Tecnológico de Monterrey en Mexico la cual aportó mucho al desarrollo del trabajo de grado. Al grupo de Investigación en Gestión Energética – GENERGETICA por vincularme a los proyectos de investigación en convenio con el Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM ya que con los honorarios pude financiar parte de mis estudios de maestría. A la Maestría en Ingeniería Mecánica por permitirme formarme y apoyo en descuento del valor de la matrícula.

Agradezco de manera especial al Dr. Álvaro Restrepo, por aceptarme para realizar este trabajo de grado bajo su dirección, por su apoyo y confianza en mi trabajo ya que desde el momento que le manifesté que quería hacer la maestría, me ha facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este trabajo de grado y la maestría.

Al grupo de Investigación en Energía y Cambio Climático del Tecnológico de Monterrey, especialmente al DSc. José Ignacio Huertas Cardoso profesor investigador quien me aceptó para realizar la pasantía internacional en su grupo de investigación, la cual bajo su orientación me abrió el panorama para trazar la ruta a seguir en el desarrollo de éste trabajo de grado y poder lograr los

objetivos propuestos, agradezco también a todos sus integrantes Maicol, Jose Niño, Francy, Daniel Prato, Esequiel y otros que se me escapan por su acogida durante mi estancia y valioso aporte con sus críticas constructivas al trabajo que se estaba realizando.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Luis Felipe Quirama Londoño MSc, por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de este proyecto, es de destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia que hizo que nuestras discusiones redundaran benéficamente en la consecución de los objetivos trazados. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Al Ing. Ramón Andrés Valencia MSc, por apoyo, sus palabras de aliento y motivación en los momentos donde más lo necesitaba.

A mis compañeros de batalla Ing. Jhon Diego Quintero, Ing. Godfrey Herrera por ser unos excelentes compañeros de maestría con los cuales he compartido en lo profesional lo que ha llevado a tratar otros temas y forjar una gran amistad.

Finalmente quiero agradecer a mi familia mi esposa Catalina, mis hijos Tomás y Alejandra quienes me han brindado apoyo y sacrificio para que pueda culminar este proyecto. A mi madre y mi hermana por su apoyo incondicional que siempre me han brindado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación y motivación.....	16
1.3 Antecedentes	17
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo general:.....	20
1.4.2 Objetivos específicos:	20
1.5 Contribución del trabajo.....	20
1.6 Estructura del documento.....	21
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Clasificación de los vehículos	22
2.2 Consumo específico de combustible.....	25
2.3 Factores que afectan el consumo específico de combustible	26
2.3.1 Factores relacionados con las características del vehículo	26
2.3.2 Factores relacionados con las condiciones ambientales y del tráfico	30
2.3.3 Factores relacionados con la conducción del vehículo	32
2.4 Métodos para cuantificar el consumo específico de combustible.....	32
2.5 Ciclos de conducción	33
2.5.1 El uso de ciclos de conducción para cuantificar el consumo específico de combustible	35
2.5.2 Ciclos de conducción de Estados Unidos empleados para homologación	36
2.5.3 Ciclos de conducción de Europa para homologación.....	38
2.5.4 Ciclos de conducción de Japón.....	40
2.5.5 Los ciclos de conducción para homologación y el trabajo real	42
2.6 Parámetros para describir ciclos de conducción	43
2.7 Análisis de regresión lineal múltiple en la determinación del consumo específico de combustible	45
3. METODOLOGÍA	47

3.1 Estructura del modelo.....	47
3.2 Desarrollo de los modelos de regresión	50
3.2.1 Parámetros que describen los ciclos de conducción de homologación FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC, NEDC, JC08 y JC10-15	50
3.2.2 Flota de vehículos	51
3.2.3 Reducción de parámetros predictores	52
4. RESULTADOS.....	55
4.1 Modelos de estimación de consumo específico de combustible – <i>SFCpred</i> a partir de parámetros constructivos de los vehículos.....	55
4.2 Modelos de estimación de consumo específico de combustible – <i>SFCpred</i> a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción.....	70
4.3 Resultados de las pruebas de laboratorio.	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

FIGURAS

Figura 2-1 Consumo específico de combustible en un vehículo de pasajeros a gasolina conducido en ciudad y autopista	25
Figura 2-2 Ciclo de conducción artificial.....	34
Figura 2-3 Ciclo de conducción transitorio.....	35
Figura 2-4 Ciclo de conducción “ <i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i> ” UDDS.....	36
Figura 2-5 Ciclo de conducción “ <i>Federal Test Procedure</i> ” FTP-75.	37
Figura 2-6 Ciclo de conducción “ <i>Highway Fuel Economy Driving Schedule</i> ” HWFET.	37
Figura 2-7 Ciclo de conducción “ <i>Elementary Urban Cycle</i> ” ECE.	38
Figura 2-8 Ciclo de conducción “ <i>Extra-Urban Driving Cycle</i> ” EUDC.....	39
Figura 2-9 Ciclo de conducción “ <i>New European Driving Cycle</i> ” NEDC.	39
Figura 2-10 Ciclo de conducción “ <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i> ” WLTC.	40
Figura 2-11 Ciclo de conducción JC08.....	40
Figura 2-12 Ciclo de conducción JC10-15.....	41
Figura 2-13 Ciclo de conducción AMCO M12.....	41
Figura 3-1 Metodología propuesta.	47
Figura 3-2 Modelo de estimación de consumo específico de combustible SFC a partir de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción.....	48
Figura 3-3 Modelo de estimación de consumo específico de combustible SFC a partir de parámetros constructivos de los vehículos.....	49
Figura 4-1 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción FTP-75.	59
Figura 4-2 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción HWFET.	60
Figura 4-3 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción UDDS.	62
Figura 4-4 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción EDC.	63
Figura 4-5 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción EUDC.	65

Figura 4-6 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción NEDC.	66
Figura 4-7 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción JC08.	68
Figura 4-8 Verificación del modelo de predicción de $SFC_{x_{pred}}$ para el ciclo de conducción JC10-15.	69
Figura 4-9 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos hasta 1,6 L de cilindrada.	75
Figura 4-10 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 1,7 L – 2,0 L de cilindrada.	77
Figura 4-11 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 2,1 L – 2,5 L de cilindrada.	78
Figura 4-12 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 2,6 L – 3,0 L de cilindrada.	80
Figura 4-13 Verificación del modelo de predicción de $SFC_{SFC_{pred}}$ para vehículos con cilindrada desde 3,1 L en adelante.	81
Figura 4-14 Comparativo de los valores obtenidos de rendimiento FE_{medido} y FE_{pred}	85
Figura 4-15 Comparativo SFC_h con SFC_{pred} obtenido a partir de parámetros constructivos de los vehículos.	86

TABLAS

Tabla 2-1 Clasificación de los vehículos según la EPA.....	22
Tabla 2-2 Clasificación de vehículos según la Unión Europea.....	23
Tabla 2-3 Clasificación de vehículos por ejes.....	24
Tabla 2-4 Parámetros para descripción de ciclos de conducción.....	44
Tabla 3-1 Rendimiento de combustible (F.E) para una flota de 20 vehículos livianos a gasolina, valores oficiales obtenidos de las bases de datos para varios ciclos de conducción de homologación.	51
Tabla 3-2 Parámetros constructivos de la flota de vehículos.	52
Tabla 4-1 Predictores utilizados en la obtención de los modelos de predicción de <i>SFC</i> a partir de parámetros constructivos de los vehículos.....	55
Tabla 4-2 Grados de libertad y combinaciones de parámetros predictores.....	55
Tabla 4-3 Análisis de los modelos para estimar el SFC de cada uno de los ciclos de conducción a partir del parámetros constructivos de los vehículos.	56
Tabla 4-4 Coeficientes β_i para los modelos de estimación de <i>SFC</i> obtenidos a partir de parámetros constructivos de los vehículos.....	57
Tabla 4-5 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo FTP-75 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	58
Tabla 4-6 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo HWFET e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	60
Tabla 4-7 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo UDDS e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	61
Tabla 4-8 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo EDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	63
Tabla 4-9 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo EUDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	64
Tabla 4-10 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo NEDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	66

Tabla 4-11 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo JC08 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	67
Tabla 4-12 Valores de <i>SFCpred</i> para el ciclo JC10-15 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	69
Tabla 4-13 Coeficientes de determinación <i>R2</i> de los parámetros constructivos de los vehículos para cada variable de respuesta.	71
Tabla 4-14 Consumo específico promedio para cada uno de los ciclos de conducción <i>SFCh</i> en L100 km.....	71
Tabla 4-15 Grados de libertad y combinaciones de parámetros predictores.....	72
Tabla 4-16 Análisis de los modelos para estimar el <i>SFC</i> a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción.....	73
Tabla 4-17 Parámetros descriptivos de los ciclos de conducción empleados en los modelos de predicción de <i>SFCpred</i>	73
Tabla 4-18 Coeficientes β_i para los modelos de estimación de <i>SFC</i> obtenidos a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción.....	74
Tabla 4-19 Valores de <i>SFCpred</i> para vehículos hasta 1,6 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	76
Tabla 4-20 Valores de <i>SFCpred</i> para vehículos desde 1,7 L – 2,0 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	77
Tabla 4-21 Valores de <i>SFCpred</i> para vehículos desde 2,1 L – 2,5 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	79
Tabla 4-22 Valores de <i>SFCpred</i> para vehículos desde 2,6 L – 3,0 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.	80
Tabla 4-23 Valores de <i>SFCpred</i> para vehículos con cilindrada desde 3,1 L en adelante e intervalo de predicción para un 95% de confianza.....	82
Tabla 4-24 Parámetros constructivos del vehículo bajo prueba.....	82
Tabla 4-25 Rendimiento de combustible (FE) del vehículo bajo prueba, valores oficiales obtenidos de las bases de datos para varios ciclos de conducción de homologación.	83
Tabla 4-26 Parámetros que describen los ciclos de conducción empleados en el modelo de <i>SFCpred</i> hasta 1,6 L de cilindrada.	83

Tabla 4-27 Consumo específico de combustible predecido por el modelo de *SFCpred*; hasta 1,6 L, para los ciclos en los cuales se ensayó el vehículo.....83

Tabla 4-28 Rendimiento de combustible *FEmedido* obtenido en las pruebas de laboratorio.84

Tabla 4-29 Consumo específico de combustible *SFCpred* obtenido con el modelos (4-1) al (4-6).
.....86

Tabla B-6-1 Parámetros de los ciclos de conducción. 100

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El calentamiento global es el mayor problema en materia ambiental al cual se encuentra sometido nuestro planeta en la actualidad, estudios científicos demuestran que si la temperatura global de nuestro planeta supera los 2 °C se tendrán consecuencias en materia política, económica, social, cultural y ambiental. Uno de los grandes factores que contribuyen al calentamiento global es la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) los cuales producen gases de efecto invernadero lo que ha ocasionado una distorsión en el sistema climático global gracias al aumento de la temperatura de la tierra causada [1]. Para evitar que se sobrepase el aumento de la temperatura global por encima de los 2 °C la Convención Mundial de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ha acordado en la 21 Conferencia de las Partes - COP21 ahondar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C, para ello trazan objetivos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero teniendo como objetivo a largo plazo abandonar el uso de combustibles fósiles en el 2050 [2].

Para el año 2030, Colombia se ha comprometido en disminuir entre un 25% a un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero – GEI, por lo tanto, los sectores económicos nacionales como: el agropecuario, forestal y otros usos del suelo, energía eléctrica, industria, vivienda, residuos, hidrocarburos, minería y transporte, deberán contribuir a esta meta nacional de reducción de gases de efecto invernadero [3].

El transporte es una actividad del sector terciario, el cual comprende el movimiento de cargas o personas desde un punto de origen a un destino en un medio que utiliza una ruta determinada. El sector transporte se puede clasificar en tres tipos básicos que dependen del medio (tipo de vehículo) y el modo (superficie sobre la cual se movilicen) así: terrestre (carretera, ferrocarril y oleoductos), acuático (fluviales o marítimos), y aire, cada clasificación tiene un conjunto de características logísticas tanto técnicas, como comerciales [4]. El sector transporte es identificado como el mayor consumidor de energía en el mundo, cuya fuente principal son los combustibles de origen fósil, además, en todo el sector transporte, los vehículos que transitan por carretera, son los que presentan mayor participación en la demanda energética. En Colombia los vehículos de transporte por

carretera son responsables del consumo del 88% del combustible diésel y del 98% de la gasolina comercializada en el territorio nacional [5], posicionando al sector transporte por carretera colombiano como el tercer sector que mas contribuye a las emisiones de GEI con una participación del 10% [6]. Dentro de las estrategias planteadas por el gobierno nacional para reducir las emisiones de los GEI en el sector transporte se encuentra “*definir estándares de rendimiento*”, esto está encaminado a fijar parámetros de rendimiento de combustible “*fuel economy*” o también consumo específico de combustible – *SFC* e índice de emisiones de GEI reales, por lo que el Ministerio de Minas y Energía ha adoptado como política expedir un reglamento técnico en el que se incluya el etiquetado energético de vehículos como parte de los subprogramas transversales y sectoriales de protección al consumidor e información, residencial, industrial, comercial y público [7]. Actualmente, los parámetros de consumo y emisiones vehiculares reales no se encuentran establecidos ni regulados, sólo han establecido los límites máximos de emisiones para fuentes móviles mediante prueba estática la cual comprende realizar mediciones de gases de escape en ralentí o marcha mínima y en velocidad de crucero con aceleraciones y desaceleraciones en tiempos establecidos, además se obliga a que los vehículos automotores deben periódicamente certificar sus emisiones de gases mediante prueba estática en Centros de Diagnóstico Automotor – CDA debidamente habilitados. Por otro lado, se han establecidos los límites máximos de emisión permisibles para fuentes móviles en prueba dinámica, la cual es aplicada sólo a los vehículos nuevos que se ensamblen o que ingresen al país, deben cumplir con el certificado de emisiones expedido por la casa fabricante, dicha aprobación deberá contar con la aprobación de la autoridad ambiental competente del país de origen, o de un laboratorio autorizado y reconocido por la EPA, o por la Unión Europea [8][9].

Para medir el consumo específico de combustible y emisiones vehiculares reales, se han desarrollado pruebas dinámicas de homologación o “*type approval test*” y dentro de sus procedimientos utilizan ciclos de conducción “*driving cycles*” las cuales proporcionan una herramienta que permite cuantificar y determinar cuán eficiente y racional es el aprovechamiento de la fuente de energía en un vehículo. Los principales métodos de prueba, fueron desarrollados por países pioneros en materia de transporte como son: la normativa estadounidense *Federal Test Procedure* - FTP-75, la normativa europea *New European Driving Cycle* – NEDC y la normativa japonesa JC08 [10], estas normativas han sido creadas y legisladas por los respectivos gobiernos

al igual que han establecido los valores de emisiones vehiculares admisibles, los ciclos de conducción FTP-75, NEDC y JC08 son empleados a nivel mundial para la certificación de vehículos.

Los ciclos de conducción se crean a partir de estudios estadísticos basados en: a) la tipología de los vehículos (clasificación), b) tipo de servicio al cual se destina (público, carga o pasajeros), c) infraestructura vial, d) topografía y e) flujo vehicular de una región determinada, pudiendo generar un perfil de velocidad contra tiempo el cual se convierte en una herramienta muy útil para la industria automotriz y las entidades reguladoras de emisiones dado que permiten determinar las emisiones generadas por el parque automotor según el tipo de conducción, las curvas que se generan pueden ser utilizadas para realizar pruebas de rendimiento o consumo específico de combustible y emisiones en un laboratorio de pruebas dinámicas automotrices, siendo aplicable a la región donde se desarrolló el ciclo de conducción [11][12]. Los ciclos de conducción utilizados en las pruebas de certificación u homologación de vehículos son de tipo genérico y pueden no ser compatibles con aspectos específicos de la red local de una región particular, como la topografía, topología, el tráfico y el comportamiento del conductor, lo que conlleva a obtener discrepancias significativas de los resultados de consumo específico de combustible y emisiones con respecto a un ciclo típico de la región o un ciclo de trabajo real [13].

Como se estableció en lo anteriormente expuesto, para un vehículo en particular, el valor de consumo específico de combustible es diferente para cada ciclo de conducción empleado en las pruebas dinámicas. Es importante desarrollar un modelo de predicción que permita estimar el consumo específico de combustible de un vehículo automotor, si este estuviese sometido a una prueba dinámica en la cual se emplea un ciclo de conducción específico. El modelo de predicción se construye partiendo de los parámetros característicos de diferentes ciclos de conducción, de los parámetros constructivos de los vehículos y del valor de consumo específico de combustible, permitiendo así, poder predecir el consumo de un vehículo para una región particular sin necesidad de realizar pruebas en el laboratorio.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

Los ciclos de conducción para homologación como lo son el FTP-75, el NEDC, el WLTC, el JC08, y el JC10-15, han sido desarrollados para permitir obtener en el laboratorio empleando un dinamómetro de chasis los valores de emisiones, consumo específico de combustible, y eficiencia energética en diferentes categorías de vehículos con el fin de dar cumplimiento a las legislaciones de varios países a nivel mundial [14]. Dado que cada ciclo de conducción fue desarrollado para simular una condición de manejo en particular, los valores de consumo específico de combustible y los índices de emisiones de gases de escape difieren entre cada uno de los ciclos, al igual también difieren los valores del mundo real “*real world vehicle fuel economy*” [15]. Actualmente se han desarrollado ciclos de conducción típicos en varias regiones del mundo India, Canadá, Italia, China entre otros, en Colombia se han desarrollado varios ciclos de conducción como es el caso del ciclo de conducción para el Área Metropolitana Centro Occidente – AMCO [16] desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira y el ciclo de conducción para la ciudad de Bogotá desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia [17], estos son característicos para las regiones donde fueron desarrollados, están concebidos para permitir obtener los factores de emisión y consumo específico de combustible en diferentes categorías de vehículos que circulan por el Área Metropolitana Centro Occidente y por la ciudad de Bogotá.

Se han desarrollado trabajos de investigación cuyo objetivo ha sido comparar el consumo específico de combustible e índices de emisiones de gases de escape en vehículos usando ciclos de homologación con el trabajo del mundo real del vehículo, para ello han desarrollado ciclos de conducción típicos o característicos de una región en particular encontrándose diferencias en los índices de CO₂ entre un 21% ± 9% más alto en el valor del mundo real empleando un ciclo típico comparado con el valor de certificación [15]. Otras investigaciones se han realizado buscando proveer evidencia de la brecha que existe entre los valores de consumo específico de combustible en el mundo real y los valores de consumo reportados en las pruebas de certificación. U. Tietge *et al.* [18] analizaron los datos de consumo específico de combustible en carretera para vehículos fabricados entre 2001 al 2014, y exploraron la relación entre las diferentes características de los vehículos y el consumo específico de combustible en el mundo real, además, mejora y valida un modelo de regresión lineal para la estimación del consumo específico de combustible en el mundo real basado en las características constructivas de los vehículos, el cual fue desarrollado por Mellios

y Ntziachristos *et al.* [19]. La Agencia Europea de Medio Ambiente emplea el modelo de regresión de Mellios y Ntziachristos para estimar el consumo específico de combustible en el mundo real de los nuevos vehículos de pasajeros europeos, de igual manera, el modelo de regresión se emplea en el modelo COPERT ampliamente utilizado para estimar las emisiones de CO₂ en el mundo real de los automóviles de pasajeros. COPERT es utilizado por la gran mayoría de los estados miembros de la Unión Europea UE para inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y en estudios relevantes para las políticas [20]. Por otro lado, Eva Ericsson [21], realiza un estudio con el fin de encontrar métricas independientes que describan las propiedades de los ciclos de conducción y poder encontrar el efecto principal que estas producen en la emisión y el consumo específico de combustible por kilómetro, para ello emplea un conjunto de 19230 ciclos de conducción de tráfico real y 62 métricas o parámetros que describen los ciclos de conducción, posteriormente ejecuta un análisis factorial para identificar 16 parámetros de mayor influencia y por último mediante un análisis de regresión encuentra 9 parámetros independientes que describen los ciclos de conducción y su relación con las emisiones y el consumo específico de combustible. A pesar de esto, no se han encontrado trabajos donde conociendo los parámetros característicos que describan los ciclos de conducción, y parámetros constructivos de los automóviles se puedan obtener predictores que relacionen el consumo específico de combustible obtenido en un ciclo de conducción conocido y a partir de éste se pueda predecir el valor de consumo específico de combustible que se obtendría empleando otro ciclo de conducción ya previamente caracterizado. Obtener predictores entre ciclos de conducción sería de gran ayuda considerando que, a partir de los valores de consumo específico de combustible obtenidos con un ciclo de conducción de homologación, se podría predecir el valor del consumo específico de combustible del mundo real para una región en particular sin necesidad de realizar pruebas en el laboratorio.

1.3 ANTECEDENTES

Las normas de emisiones para vehículos de transporte por carretera que se encuentran reguladas en Estados Unidos, en la Unión Europea, en Japón y otros países industrializados, son las herramientas con las que se cuenta actualmente para fijar políticas técnicas para mitigar las emisiones de los vehículos automotores. Los procedimientos de prueba de emisiones en los vehículos livianos se basan en un ciclo de manejo que representa el patrón de conducción de una región en particular, actualmente, los ciclos estandarizados para vehículos livianos FTP-75, WLTC, NEDC, JC08 y

JC10-15 se utilizan en el laboratorio para determinar los índices de emisiones de gases de escape vehiculares en vehículos nuevos que van a ser comercializados en los Estados Unidos, la Unión Europea, Japón y China respectivamente. Determinar un ciclo de conducción estándar real para el mundo es un proceso dinámico y complejo ya que depende de muchos factores propios de cada región en particular, durante la década de 1990 se encontró que el ciclo de prueba FTP-75 no cubre más del 15% de las condiciones de conducción y el comportamiento que se produce en la operación real de un vehículo, el desarrollo de un ciclo representativo de conducción real para una región en particular es importante para la gestión energética del transporte, en cuanto a consumo específico de combustible y reducción de emisiones de gases de escape en vehículos [22].

Países como Canadá, India, China, Chile, México, entre otros han desarrollado ciclos de conducción propios para una región en particular, con lo que han podido realizar comparaciones de consumo específico de combustible entre un ciclo de certificación como el FTP-75 y el ciclo de conducción característico, obteniendo parámetros que correlacionan el ciclo de trabajo real y el ciclo de conducción de certificación pudiendo determinar un valor aproximado de las emisiones de escape en los vehículos y así determinar de manera más acertada el impacto en el consumo energético del transporte [23]. Por otro lado, H.Y Tong *et al.* [24] desarrolló para Hanoi – Vietnam el ciclo característico CECDC para vehículos livianos a lo largo de 10 rutas en las áreas urbanas de Hanoi, lo que le permitió encontrar diferencias significativas en el consumo combustible y emisiones empleando el CECDC comparado con el valor calculado mediante el ciclo internacional NEDC que actualmente se utiliza en Hanoi, el desarrollo del CECDC se puede aplicar a la siguiente etapa del programa de pruebas de emisiones y consumo para determinar los factores de emisión en Hanoi, así como para las pruebas de control de las emisiones del gobierno. El CECDC refleja las condiciones de conducción existentes en Hanoi, sin embargo, H.Y Tong *et al.* recomiendan en el futuro realizar una actualización regular de este ciclo de conducción cuando las condiciones del tráfico y conducción en la ciudad cambien de forma significativa.

De acuerdo a M. André *et al.* [25], en su análisis del ciclo de conducción europeo NEDC ha demostrado que los usos del vehículo y las condiciones de manejo difieren significativamente de los datos de consumo específico de combustible y emisiones del mundo real, vehículos de alta potencia experimentaron mayores velocidades y aceleraciones fuertes, justificando el posible uso

de ciclos de conducción característicos para medir las emisiones contaminantes y consumo reales con mayor precisión, es importante destacar que los ciclos de conducción característicos deben ser especialmente diseñados para reproducir estadísticamente y en su diversidad, las condiciones reales de conducción de los vehículos de alta y baja potencia, respectivamente. Sanghpriya H *et al.* [12] desarrolló un ciclo de conducción característico para la ciudad de Pune – India, lo validó y lo comparó con los ciclos de conducción existentes, el consumo específico de combustible y las emisiones estimadas empleando el ciclo característico para la ciudad de Pune claramente difieren en comparación con los ciclos estándar, tales como ECE-15 + EUDC, dado que, no pueden ser una verdadera representación de la condición real del tráfico en la ciudad, en consecuencia, no es razonable esperar que los factores de emisión construidos sobre estos ciclos estándar arrojen estimaciones reales de consumo específico de combustible.

Para el caso de estudio en Hong Kong, W.T. Hung *et al.* [26] desarrolló tres ciclos de conducción (urbano, sub-urbano y de carretera) que describen las condiciones de tráfico de la ciudad, los parámetros de evaluación y comparación de estos ciclos muestran diferencias significativas en comparación con los ciclos de conducción internacionales como el FTP y el ECE, lo que implica la singularidad de las condiciones de conducción de Hong Kong incidiendo directamente en los valores reales de consumo específico de combustible y emisiones contaminantes.

En miras de encontrar una relación entre los datos de certificación obtenidos mediante los ciclos de conducción normalizados y los valores reales de consumo específico de combustible, valores de emisiones y la eficiencia energética del mundo real, Jun Liu *et al.* [27] propone una metodología para personalizar los ciclos de conducción normalizados mediante la incorporación de una colección de casos con algoritmos que tienen la capacidad de revisar, ordenar los casos y finalmente sintetizar una micro ruta en posibles ciclos de conducción candidatos, el algoritmo selecciona un ciclo de conducción definitivo con base en la similitud con las características de conducción y atributos, de esta manera, un ciclo es personalizado para un usuario y representa el rendimiento de conducción en el mundo real. El consumo específico de combustible de un vehículo objetivo se puede estimar aplicando la ecuación para determinar Potencia Específica del Vehículo - VSP para el ciclo de conducción o el uso de pruebas y simulaciones en el dinamómetro. La personalización de ciclos de conducción puede mejorar la precisión y ayudar a la transición de los ciclos de

conducción estándar mediante el aprovechamiento de datos a gran escala y relativamente nuevos y novedosos. Finalmente, H. Achour y A. G. Olabi [23] afirman que cada país tiene un ciclo de conducción único que representa las características de los patrones de conducción y la cantidad real de emisiones de los vehículos, es necesario que las pruebas individuales con ciclos característicos se realicen en cada región.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general:

Estimar el consumo específico de combustible de vehículos livianos a gasolina, a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción, y parámetros constructivos de los vehículos.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Identificar factores que influyen en el consumo específico de combustible de los vehículos de pasajeros.
- Estudiar e identificar parámetros para describir y comparar ciclos de conducción.
- Elaborar modelos de predicción para estimar el consumo específico de combustible, usando el resultado de las pruebas de homologación, parámetros que describen los ciclos de conducción y parámetros característicos de los vehículos.
- Realizar pruebas experimentales para corroborar datos de uno de los modelos de predicción.

1.5 CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO

Los resultados presentados en este trabajo pueden servir como punto de partida para realizar un análisis que se pueda extrapolar hacia todo el parque automotor que circula por la infraestructura vial de una región o país, y así poder estimar los valores de consumo específico de combustible reales del sector transporte por carretera. Se plantean 13 modelos de predicción de consumo específico de combustible 8 basados en las características constructivas de los vehículos y 5 basados en los parámetros descriptivos de los ciclos de conducción, éstos modelos pueden ser aplicados a otras líneas de vehículos y a otras regiones, y así poder estimar un valor de consumo específico de combustible y emisiones cuando un vehículo de pasajeros opera en el mundo real sin realizar pruebas en laboratorio o en ruta.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este documento, el capítulo 2 presenta una revisión bibliográfica donde se analizan conceptos y factores que afectan el consumo específico de combustible en vehículos de pasajeros, al igual, se definen los ciclos de conducción como patrones que han sido desarrollados para medir el índice de emisiones contaminantes atmosféricos y el consumo específico de combustible en automóviles. El capítulo 3 presenta la metodología que se empleó para desarrollar la investigación, como también se muestran los parámetros para descripción de ciclos de conducción de homologación FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC, NEDC, JC08 y JC10-15 y también se dan a conocer los valores de cada uno de los parámetros constructivos de la flota de vehículos empleada con su respectivo valor de rendimiento de combustible. En el capítulo 4 se muestran los resultados alcanzados durante el desarrollo de esta investigación, por otra parte, se dan a conocer los modelos de predicción de consumo específico de combustible y se hace una discusión sobre la significancia estadística y aplicabilidad de cada uno de los modelos.

En este documento se encontrarán algunas definiciones y conceptos en la lengua inglesa, se han presentado así porque no se quiere causar confusiones al traducirlos al castellano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos - EPA, realiza una clasificación para definir los límites de emisiones de gases producidos en la combustión, los cuales son regulados en los automotores de acuerdo al tamaño, peso, uso y tipo de combustible. Esta clasificación es de gran uso en América y otras partes del mundo, para los vehículos automotores y tiene en cuenta factores como la capacidad de acomodación de pasajeros y el peso del vehículo. La Tabla 2-1 presenta la clasificación de los vehículos en los Estados Unidos [28].

Tabla 2-1 Clasificación de los vehículos según la EPA.

Categoría	Subcategoría	Capacidad	Peso neto [kg]	Peso Bruto [kg]	ALVW [kg]	LVW [kg]
LDV	---	≤ 12 Pasajeros	---	---	---	---
LDT	LLDT	LDT1	> 12 Pasajeros	≤ 2722	---	---
		LDT2			≤ 2722	---
	HLDT	LDT3			> 2722	---
		LDT4			> 3856	---
		LHDGE			> 3856	---
HDV	HHDGE	---	> 2722	≤ 6350	---	---
				> 6350	---	---
	LHDDE			> 3856	---	---
				> 8845	---	---
	MHDDE			≥ 8845	---	---
HHDE	≤ 14969	---	---			
	URBAN BUSS			> 14969		

Peso Neto Vehicular: es el peso real del vehículo en condiciones de operación con todo el equipo estándar de fábrica y con combustible a la capacidad nominal del tanque.

Peso Bruto Vehicular: peso máximo de diseño del vehículo cargado, especificado por el fabricante del mismo.

ALVW: *Adjusted Loaded Vehicle Weight*. Promedio numérico del peso neto vehicular y el peso bruto vehicular.

LVW: *Loaded Vehicle Weight*. Peso neto vehicular más 136 kg.

LDV: *Light-Duty Vehicle*. Vehículo de uso liviano.

LDT: *Light-Duty Truck*. Camioneta de uso liviano.

HDV: *Heavy-Duty Vehicle*. Vehículo de uso pesado.

LHDDE: *Light Heavy-Duty Diesel Engines*. Motores Diesel livianos de uso pesado.

MHDDE: *Medium Heavy-Duty Diesel Engines*. Motores Diesel medianos de uso pesado.

HHDE: *Heavy Heavy-Duty Diesel Engines*. Motores Diesel pesados para trabajo pesado.

LHDGE: *Light Heavy-Duty Gasoline Engine*. Motor liviano a gasolina para uso pesado.

HHGE: *Heavy Heavy-Duty Gasoline Engines*. Motores Diesel pesados para trabajo pesado.



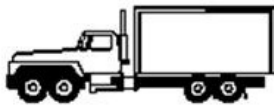


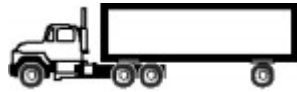


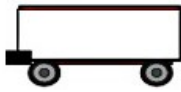

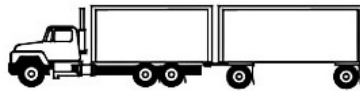

MDPV: *Medium-Duty Passenger Vehicles*. Vehículos de uso medio para pasajeros.

La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas realiza una clasificación de los vehículos automotores discriminados por su capacidad y su peso. La Tabla 2-2, y la Tabla 2-3 presentan la clasificación de los vehículos de la Unión Europea por capacidad y por la disposición de sus ejes respectivamente [29].

Tabla 2-2 Clasificación de vehículos según la Unión Europea

Categoría	Subcategoría	Capacidad	Peso bruto [kg]	RW [kg]
M	M1	≤ 8 Pasajeros	---	---
	M2	8 Pasajeros	≤ 5000	---
	M3	8 Pasajeros	5000	---
N	Clase I	---		1250
	N1	Clase II	≤ 3500	≥ 1250 ≤ 1700
		Clase III	---	1700
	N2	---	> 3500 ≤ 12000	---

Tabla 2-3 Clasificación de vehículos por ejes.

Configuración	Esquema del vehículo	Descripción
C2		Camión rígido de dos ejes. Camión sencillo.
C3		Camión rígido de tres ejes.
C4		Camión rígido de cuatro ejes.
C2S1		Tracto camión de dos ejes con semirremolque de un eje.
C2S2		Tracto camión de dos ejes con semirremolque de dos ejes.
C3S1		Tracto camión de tres ejes, con semirremolque de un eje.
C3S2		Tracto camión de tres ejes, con semirremolque de dos ejes.
C3S3		Tracto camión de tres ejes, con semirremolque de tres ejes.
R2		Remolque.
C2 R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes.
C3 R2		Camión de tres ejes, doble troque, con remolque de tres ejes.
C4 R2		Camión de cuatro ejes, con remolque de dos ejes.

Colombia ha adoptado la clasificación de los vehículos para la medición de emisiones y consumo específico de combustible conforme a los Estados Unidos contenida en la Tabla 2-1 y conforme a la Unión Europea contenida en la Tabla 2-2 [8].

2.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE EN VEHÍCULOS

El transporte por carretera a nivel mundial consume un poco más del 19% del suministro total energía del mundo, y el 95% de esa demanda energética proviene de combustibles fósiles constituyéndose en una demanda del 60% de la producción de petróleo a nivel mundial [30]. El transporte por carretera en Colombia se ha convertido en el mayor consumidor energético del país con un aumento del 6% en los últimos 10 años, de esta demanda energética el 88,4% proviene de combustibles fósiles no renovables, teniendo como participación las gasolinas en un 40% y el ACPM un 37% [31].

Carpenter *et al.* [30], indica que entre el 70% - 80% del uso de energía en el ciclo de vida de un vehículo de transporte por carretera se consume en la fase de servicio o uso, el resto de energía se consume en la fabricación, incluida la producción de los materiales, el suministro del combustible y la disposición final cuando termina su ciclo de vida.



Figura 2-1 Consumo específico de combustible en un vehículo de pasajeros a gasolina conducido en ciudad y autopista [32].

La Figura 2-1 muestra la forma como se distribuye la energía en un automóvil con un motor de combustión interna a gasolina cuando es conducido en ciudad y autopista, un vehículo de transporte

por carretera actual, equipado con un motor de combustión interna aprovecha alrededor de un 11% - 23% [33] de la energía suministrada por el combustible consumido para convertirla en trabajo útil, el cual se emplea para vencer las cargas debidas a la inercia, la resistencia a la rodadura en los neumáticos “*rolling resistance*”, la resistencia al viento “*wind drag*” y soportar las cargas debidas a los accesorios como lo son: el acondicionador de aire, las luces, la radio o equipo de sonido, entre otras. El 85% de la energía del combustible consumido se pierde en forma de calor debida a la fricción, las reacciones químicas debidas a la combustión, ineficiencia del motor y la transmisión, la marcha del motor en vacío o ralentí cuando el vehículo se encuentra encendido.

2.3 FACTORES QUE AFECTAN EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

Son muchos factores los cuales pueden llegar a afectar el consumo específico de combustible en un vehículo de pasajeros a gasolina, el Departamento de Energía de los Estados Unidos [34] indica que la forma de conducción del automóvil “*driving behavior*”, el mantenimiento del vehículo “*vehicle maintenance*”, la variación del combustible “*fuel variations*”, las modificaciones a los vehículos “*vehicle variations*”, y el asentamiento del motor “*engine break-in*” aumentan el consumo específico de combustible en un vehículo de pasajeros. Por otro lado G. Fontaras *et al.* [35], presentan una amplia revisión bibliográfica de publicaciones existentes sobre los factores que afectan el consumo específico de combustible de los automóviles de pasajeros en condiciones reales de conducción y en el laboratorio durante las pruebas de homologación. De acuerdo a G. Fontaras *et al.* los factores que afectan el consumo específico de combustible se pueden agrupar en tres categorías: a) factores relacionados con las características y sistemas del vehículo, b) factores relacionados con las condiciones ambientales y del tráfico, c) factores relacionados con la conducción del vehículo.

2.3.1 Factores relacionados con las características del vehículo

Aquí se agrupan los principales contribuyentes en el consumo de energía, que definen el consumo específico de combustible, como son la masa del vehículo, la aerodinámica, los neumáticos y los sistemas auxiliares.

La masa del vehículo:

Se constituye en uno de los principales factores que influyen en el consumo específico de combustible de un vehículo en condiciones de conducción a baja velocidad, la masa operativa de un vehículo consiste en: a) el vehículo vacío, b) el combustible en el tanque, y c) los pasajeros y la carga. De acuerdo a la dinámica vehicular un aumento en la masa operativa aumenta el consumo específico de combustible, ya que se necesita más potencia para acelerar el vehículo durante la fase inercial, y vencer la resistencia a la rodadura la cual se incrementa proporcionalmente, no existen estudios o enfoques comunes para la medición y cuantificación del impacto de la masa adicional en el consumo específico de combustible y las emisiones de CO₂ de los automóviles de pasajeros. Se ha encontrado una amplia gama de valores con la mayoría de los estudios que convergen en cifras del orden de 5% - 9% para adiciones en masa de 50 kg - 200 kg durante varios ciclos y condiciones de operación [36].

Resistencia aerodinámica “wind drag”

La resistencia aerodinámica del vehículo es otro de los principales factores que influyen en el consumo específico de combustible en condiciones de conducción de alta velocidad, es función del cuadrado de la velocidad del vehículo y proporcional al producto del coeficiente aerodinámico de arrastre C_d , el área frontal A , y la densidad del aire ρ . El coeficiente de arrastre aerodinámico del vehículo es afectado por el diseño del automóvil.

Aumentos del arrastre aerodinámico el cual es el producto coeficiente aerodinámico de arrastre por el área frontal ($C_d \times A$), inducidos ya sea por cambios en el tamaño del vehículo o en su forma y diseño aerodinámico, se traducen directamente en una mayor resistencia aerodinámica, por lo tanto, en un mayor consumo específico de combustible y mayores emisiones de CO₂. La resistencia aerodinámica bajo condiciones de manejo del mundo real también se ve afectada por varios elementos del vehículo y diferentes configuraciones de forma, los cuales no se reflejan en los procedimientos de certificación de vehículos, incluso pequeñas modificaciones realizadas para personalizar el automóvil pueden aumentar la resistencia aerodinámica y provocar cambios medibles en el consumo específico de combustible, se estima que un aumento del orden de 10% - 20% en el arrastre aerodinámico puede dar como resultado un consumo específico de combustible adicional de 2% - 4% cuando el automóvil opera en autopista [37].

Resistencia a la rodadura “rolling resistance”

La resistencia a la rodadura se refiere a la pérdida de energía que ocurre en el neumático debido a la deformación del área de contacto causada por las propiedades del caucho, la resistencia en el movimiento del vehículo inducida por la deformación del neumático es proporcional a la fuerza vertical aplicada sobre el neumático debido al peso del vehículo y al coeficiente de resistencia a la rodadura [38].

El coeficiente de resistencia a la rodadura f_r es una cantidad adimensional que se considera constante o proporcional a la velocidad del vehículo, muchos factores influyen en las propiedades de la resistencia a la rodadura de los neumáticos, como la velocidad del vehículo, la temperatura, el tipo de neumático y el tamaño. Los neumáticos se constituyen en un elemento de influencia para el consumo específico de combustible debido a que en cuanto más ancho sea mayor será su resistencia a la rodadura, la variación del f_r debido al empleo de un neumático más ancho puede alcanzar hasta el 90% comparado con el de un neumático más angosto, donde tal diferencia de f_r podría resultar en un aumento del consumo de 7,5 % [39].

Además de los anteriormente descritos, existen otros factores cuyo efecto sobre el consumo específico de combustible puede atribuirse a más de un elemento, a saber, los cambios en la masa y las cargas en el rodamiento. Además, su contribución al consumo específico de combustible del mundo real no se puede cuantificar fácilmente con simples informes o pruebas de consumo específico de combustible como las que se utilizan para homologación de vehículos, por lo tanto, se debe esperar una amplia variación en las condiciones de prueba y, finalmente, los impactos informados sobre el consumo específico de combustible. Estos factores son: el enganchamiento de un tráiler, la adición de una rejilla de techo o una canasta porta maletas sobre el techo, y complementos de techo como son letreros o señales que aumenten el área frontal del automóvil.

Sistemas auxiliares

Estos sistemas dentro de un automóvil forman parte de los elementos que mejoran la comodidad y la seguridad del vehículo, sin embargo, para que puedan operar se debe suministrar energía eléctrica o mecánica que a su vez causa un aumento en el consumo específico de combustible. Los

principales sistemas auxiliares son: a) sistemas de asistencia en la dirección, b) sistemas de acondicionamiento de aire, c) sistemas de calefacción, d) otros sistemas como calefacción en los asientos y en el volante, luces, limpia brisas, equipo de entretenimiento, entre otros.

De acuerdo a C. Ernest *et al.* [40], se estima que el consumo específico de combustible adicional inducido por los sistemas auxiliares en condiciones del mundo real es del orden del 3 %, sin tener en cuenta el efecto del acondicionador de aire. El efecto del acondicionador de aire en el consumo específico de combustible depende principalmente de la temperatura interior deseada y las condiciones ambientales (temperatura, humedad del aire y radiación solar) y, en menor medida, de otros aspectos como la velocidad y los patrones de conducción [41]. Los sistemas de asistencia a la dirección contribuyen a la seguridad y la comodidad de conducción, pero también requieren un suministro de energía adicional que se traduce en un mayor consumo específico de combustible entre un 2 % - 3 % dependiendo del tipo de tecnología empleado en la dirección asistida, en viajes típicos por carretera, el sistema de dirección asistida puede permanecer inactivo durante aproximadamente el 76 % del tiempo.

Fricción

De acuerdo a K. Holmberg *et al.*[42], un vehículo se consume hasta el 25% de la energía de combustible para superar la fricción en el motor, la transmisión y el frenado, un automóvil de pasajeros consume en promedio 340 L de combustible anualmente para superar la fricción en un kilometraje promedio de 13000 km. La opción tecnológica más común para reducir la fricción en las partes mecánicas del vehículo es el uso de lubricantes de baja viscosidad, esta película de lubricación debe tener las propiedades apropiadas para soportar las cargas y presiones que ocurren entre las superficies. El uso de un lubricante inadecuado podría provocar un mayor arrastre y fricción, lo que provocaría temperaturas de funcionamiento y un consumo de energía más altos.

Mantenimiento y otros factores

La desalineación de las ruedas, mantenimiento del sistema de suspensión, obstrucción del filtro de aire, el envejecimiento, presión y desgaste de los neumáticos, el tiempo de servicio del vehículo y su ajuste se constituyen en factores relacionados con el mantenimiento y la condición del vehículo

que también pueden afectar el consumo específico de combustible en condiciones reales de conducción.

2.3.2 Factores relacionados con las condiciones ambientales y del tráfico

En esta categoría son incluidos elementos como las condiciones climáticas, la morfología de la carretera, las condiciones del tráfico y el nivel de servicio de las carreteras - *LoS* “*level of service*”. Fontaras *et al.* [35], los clasifica en cuatro grupos: a) las condiciones climáticas o meteorológicas, b) la altitud, c) la carretera, y, d) las condiciones de tráfico y congestión.

Condiciones climáticas o meteorológicas

Se refieren a todos los factores asociados a los fenómenos meteorológicos que pueden tener una influencia directa o indirecta en el consumo específico de combustible del vehículo. Según R. Karlsson *et al.* [43], tres elementos tienen el mayor impacto en el consumo específico de combustible y las emisiones de CO₂ en los vehículos de pasajeros: viento, temperatura y altitud. Por otro lado, condiciones climáticas como lluvia, nieve o niebla también pueden afectar el consumo específico de combustible puesto que altera los parámetros de conducción del vehículo, teniendo gran influencia en la resistencia aerodinámica, el coeficiente de rodadura, el funcionamiento de las unidades auxiliares o el motor. Las condiciones ambientales no son estables y pueden variar según la ubicación geográfica, el patrón climático y las estaciones anuales [44].

La temperatura ambiente influye en la dinámica del vehículo alterando todo tipo de resistencias externas. La baja temperatura ambiente da como resultado una mayor densidad del aire y una mayor resistencia aerodinámica, mientras que el aumento de la temperatura del aire disminuye la resistencia aerodinámica [43], la condición del neumático también se ve afectada por el aumento de la temperatura, puesto que la presión del aire contenido, la rigidez y la deformación del caucho cambian, lo que resulta en una menor resistencia a la rodadura [45].

Altitud

Cuando un automóvil opera a mayores alturas sobre el nivel del mar se espera que haya una disminución en el consumo específico de combustible puesto que la presión atmosférica es más baja, obteniéndose una menor densidad del aire generando una menor resistencia aerodinámica, la

disminución resultante en la resistencia del aire puede conducir a una reducción del 2% - 3% en la reducción del consumo específico de combustible. Sin embargo, en ciertos vehículos se puede presentar un aumento en el consumo específico de combustible hasta del 6,2% cuando es conducido en autopista dado que los vehículos podrían funcionar cerca de condiciones de carga completa, en este caso, se generaría reducción de la potencia del motor debido a la menor eficiencia volumétrica dando lugar a un enriquecimiento de combustible introducido para compensar el déficit de energía aumentando el consumo específico de combustible en el caso de motores de aspiración natural [46].

Carretera

En este grupo se encuentran las características de la carretera, como la morfología, la superficie de la carretera y la forma de la carretera, estos elementos tienen impacto en el consumo específico de combustible y las emisiones de CO₂ del mundo real. La morfología del camino se refiere a las características geomorfológicas de la carretera. Las características que tienen un efecto en el consumo específico de combustible son la altitud, la forma del camino, la superficie de la carretera y el grado o pendiente de inclinación. La condición estructural de la superficie de la carretera se describe por la rugosidad y la textura, mientras que los materiales de construcción utilizados para la superficie de la carretera incluyen asfalto y cemento [35].

Condiciones de tráfico y congestión

El aumento del tráfico afecta el consumo específico de combustible de varias maneras: reduce la velocidad promedio y máxima del viaje, aumenta la operación transitoria (aceleraciones-desaceleraciones) y puede generar condiciones de congestión que se caracterizan por bajas velocidades del vehículo, paradas del vehículo y un aumento de la marcha en vacío del motor (ralentí). El impacto del tráfico en el consumo específico de combustible del vehículo no es uniforme y depende de las características del parque automotor y el área geográfica donde se conduce el vehículo. El intenso tráfico y la congestión puede llevar a un aumento en el consumo específico de combustible al afectar la forma en que los conductores conducen, porque causa retrasos y aumenta el estrés de los conductores, en un esfuerzo por compensar tales retrasos, los conductores pueden adoptar un estilo de conducción más agresivo en comparación con la forma en que normalmente conducirían durante el resto de su viaje [47].

2.3.3 Factores relacionados con la conducción del vehículo

Estos factores están referidos a la forma y el perfil de conducción que se tiene cuando un vehículo es conducido en condiciones del mundo real, según Fontaras *et al.* [35], se encuentran factores como: a) la forma de conducción del vehículo, b) la conducción con las ventanas abiertas, c) la tasa de ocupación, y, d) el tipo de combustible.

2.4 MÉTODOS PARA CUANTIFICAR EL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

Cuantificar exactamente el consumo específico de combustible de un vehículo de pasajeros cuando opera en el mundo real es una labor complicada. La existencia de múltiples factores que son complicados de medir y predecir como lo son las cargas de viento, variación energética del combustible los cambios meteorológicos en el clima, la morfología de la carretera u autopista, la forma de la conducción del vehículo, las condiciones del tráfico, entre otros, hace que cambien las condiciones de operación de un automóvil y por ende su consumo específico de combustible. A pesar de lo expuesto anteriormente, modelar el consumo específico de combustible, y el índice de emisiones en vehículos de transporte por carretera es un tema muy importante que ha llamado la atención de la comunidad científica y personas del común a nivel mundial debido a la alta tasa de generación de GEI, y el alza en el precio de los combustibles.

Lo anteriormente mencionado, ha hecho que se desarrollen varios métodos para cuantificar el consumo específico de combustible SFC en $\frac{L}{100 \text{ km}}$, las cuales van desde una medición empírica realizada por los operadores y dueños de automóviles, hasta implementar modelos teóricos experimentales desarrollados para predecir el consumo específico de combustible en vehículos bajo diversas condiciones [48].

Actualmente se puede estimar el consumo específico de combustible empleando alguno de los siguientes procedimientos:

Mediciones hechas por el usuario: es un tipo de medición no muy confiable que carece de repetibilidad y reproducibilidad, es realizado por muchos de los conductores o dueños de automóviles con el fin de estimar el consumo específico de combustible de su vehículo. Consiste

en llevar un registro estimado del consumo específico de combustible por kilómetros recorridos entre tanqueadas consecutivas.

Siguiendo ciclos de conducción: esta metodología ha sido desarrollada por investigadores, es una medición confiable ya que permite la repetibilidad y reproducibilidad como también fijar parámetros para comparación. Los ciclos de conducción se desarrollan para ser realizados en campo (autopista y ciudad) o en un laboratorio empleando un dinamómetro de rodillos siendo empleados en las pruebas de homologación de vehículos [49].

Modelos teórico experimentales: consiste en desarrollar un modelo estadístico mediante parámetros de demanda de energía, parámetros constructivos del vehículo, modelamientos mecánicos, entre otros. Estos modelos son obtenidos mediante datos experimentales empleando ciclos de conducción y son de gran ayuda porque se implementan en los software de simulación y modelamiento de vehículos [48][50].

Otras metodologías: varias investigaciones realizadas se han encaminado a proponer otro tipo de metodologías para la estimación de combustible. Roura y Oliu [51], proponen realizar experimentos sencillos encaminados a determinar la eficiencia térmica del motor, el coeficiente de arrastre y la resistencia a la rodadura, y mediante el empleo de ecuaciones de la dinámica vehicular y balance energético determinan el consumo específico de combustible *SFC* de un vehículo.

2.5 CICLOS DE CONDUCCIÓN

Un ciclo de conducción se define como un patrón o una serie de puntos de datos que representan la velocidad frente al tiempo, velocidad frente a distancia o tiempo frente al gradiente, velocidad y selección de marcha como función del tiempo, que provienen de información estadísticamente representativa en una región específica o una parte de un segmento de carretera [52]. Los ciclos de conducción se utilizan para muchos fines, como la estimación de la ingeniería de tráfico, la estimación de emisiones contaminantes atmosféricos y la estimación del consumo específico de combustible [53]. Por esta razón, es fundamental que los ciclos de conducción representen las condiciones de circulación reales de los vehículos.

Los ciclos de conducción son desarrollados para representar los patrones de manejo un segmento de carretera o área específica, la dinámica de conducción se relaciona con la forma como se conduce un vehículo incluyendo elementos como la cantidad y duración de las paradas que se efectúan, la velocidad y aceleración promedio del recorrido, la cantidad de tiempo en que el vehículo está detenido y en movimiento, y los distintos niveles de aceleración y velocidad que el conductor produce al conducir, los elementos anteriores tienen una elevada influencia en las emisiones y el consumo específico de combustible de un vehículo, independientemente de su nivel tecnología y de mantenimiento [48].

Los ciclos de conducción se basan en datos generados a partir de variables de operación del vehículo y debe ser representativo para un área, región o tramo de carretera determinado, debe reflejar los patrones de manejo que tiene una población en un área específica o región teniendo en cuenta que la velocidad, aceleración, estados de operación (ralentí, crucero, aceleración y desaceleración), deben ser representativos.

Existen dos tipos de ciclos de conducción; los artificiales que son desarrollados bajo patrones de manejo artificiales con secuencias controladas de velocidad, aceleración y carga, un ejemplo de este tipo de ciclos se muestra en la Figura 2-2, y los ciclos de conducción transitorios que han sido construidos a partir de datos de operación reales y representan condiciones dinámicas de manejo, un ejemplo de este tipo de ciclos es mostrado en la Figura 2-3 [54].

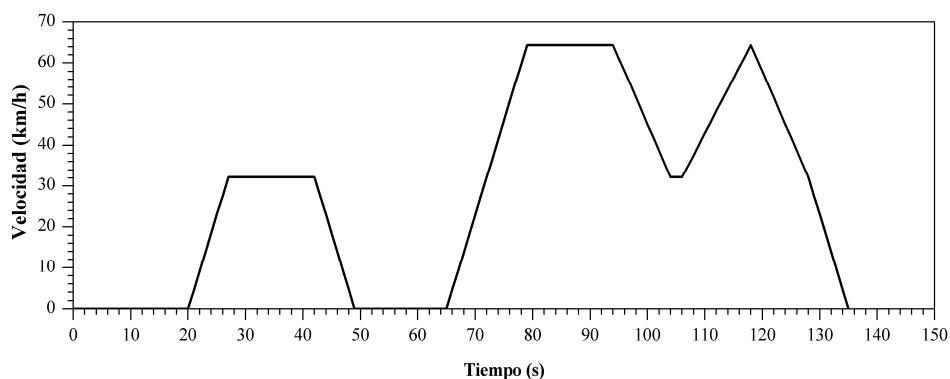


Figura 2-2 Ciclo de conducción artificial.

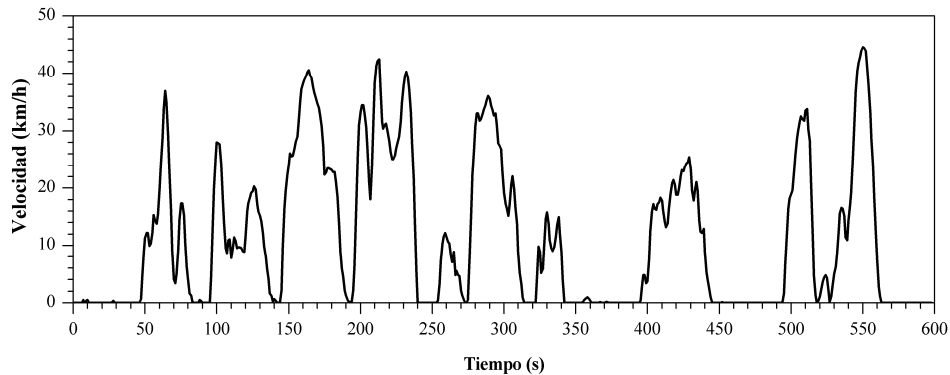


Figura 2-3 Ciclo de conducción transitorio.

Actualmente se han desarrollado una gran cantidad de ciclos de conducción los cuales intentan representar las condiciones de conducción para una ciudad, una región o un área específica en el mundo [52], dentro de estos ciclos de conducción se encuentran los ciclos de homologación los cuales son empleados para demostrar el cumplimiento con los estándares de emisión establecidos en el Código de Regulaciones Federales para el caso de Estados Unidos, para el caso de la Unión Europea los estándares de emisiones están definidos por las directivas y reglamentos establecidos por el Parlamento Europeo, para Japón se encuentran establecidos en las Normas Técnicas de la Asociación Japonesa de Seguridad Industrial y Salud (JISHA) [55].

2.5.1 El uso de ciclos de conducción para cuantificar el consumo específico de combustible

Para la estimación del consumo específico de combustible y las emisiones contaminantes atmosféricas, los vehículos se prueban en un laboratorio bajo condiciones controladas usando dinamómetros de chasis con respecto a un ciclo de conducción determinado [11]. El consumo específico de combustible se obtiene indirectamente con la obtención de la tasa de emisiones mediante el análisis continuo de los gases de escape de los vehículos que se conducen en el dinamómetro de chasis. La emisión instantánea o la tasa de consumo específico de combustible se correlaciona con la velocidad y la aceleración del vehículo y, posteriormente, con la potencia del vehículo [56]. El consumo específico de combustible también se puede estimar de forma gravimétrica pesando el combustible antes y al finalizar el ciclo de conducción, con la diferencia de pesos y la densidad del combustible se obtiene el volumen que se consumió durante el ciclo,

también se provee al rodillo del dinamómetro de un dispositivo cuenta vueltas con el cual se determina la distancia recorrida [57].

Cuando se siguen ciclos de conducción en carretera o ruta al vehículo se le instalan equipos de medición portátiles de emisiones (PEMS por sus siglas en inglés), al igual que en el laboratorio el consumo específico de combustible se estima mediante el análisis continuo de los gases de escape y el balance de carbono. Es de anotar que el método de balance de carbono no se puede emplear en vehículos que operan con hidrógeno, celdas de combustible o eléctricos [58].

2.5.2 Ciclos de conducción de Estados Unidos empleados para homologación

La ley Federal de los estados unidos ha establecido varios ciclos de conducción los cuales deben ser empleados por el Laboratorio Nacional de Vehículos y Emisiones de Combustibles para confirmar los resultados de emisiones declaradas por los fabricantes de vehículos con el fin de dar cumplimiento a la legislación en materia de emisiones contaminantes [57]. Dentro del conjunto de ciclos que se emplean se encuentran:

El UDDS (“Urban Dynamometer Driving Schedule”)

También conocido como el LA14 o “*The City Test*”, representa las condiciones de conducción de la ciudad, se utiliza para pruebas de vehículos ligeros con el fin de verificar las emisiones después de un arranque en frío del vehículo. La Figura 2-4 muestra el perfil de velocidad vs tiempo.

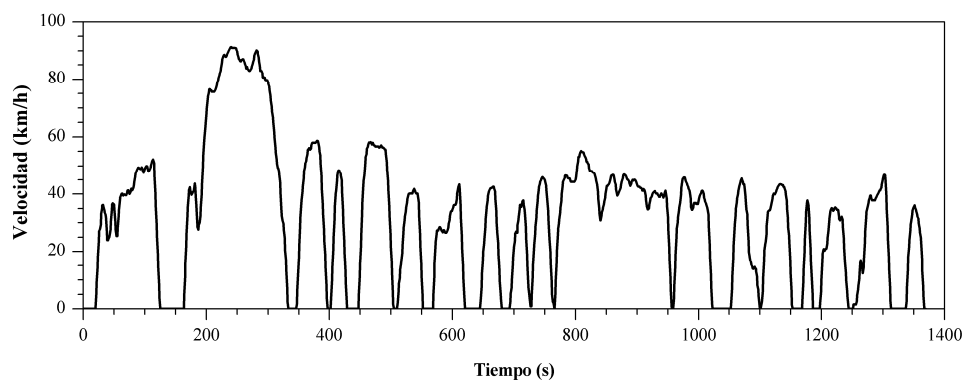


Figura 2-4 Ciclo de conducción “*Urban Dynamometer Driving Schedule*” UDDS [55].

El FTP-75 (“Federal Test Procedure”)

Este ciclo está compuesto por los primeros 505 s del UDDS el cual representa la fase de arranque en frío, el resto de tiempo representa la fase transitoria y la fase de arranque en caliente. Este ciclo es empleado para determinar el consumo específico de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos cuando el vehículo opera en la ciudad. La Figura 2-5 muestra el perfil de velocidad vs tiempo del FTP-75.

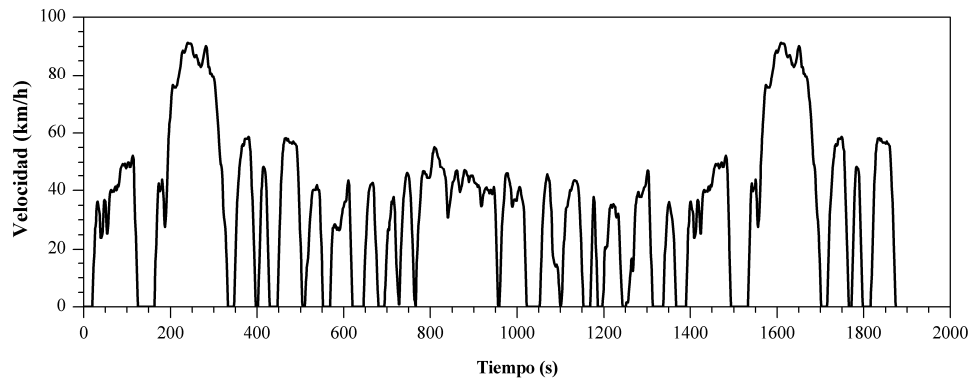


Figura 2-5 Ciclo de conducción “Federal Test Procedure” FTP-75 [55].

El HWFET (“Highway Fuel Economy Driving Schedule”)

El HWFET ha sido desarrollado para cuantificar el consumo específico de combustible y emisiones contaminantes en vehículos livianos simulando condiciones de manejo en autopista con velocidades por debajo de los $96 \frac{km}{h}$. La Figura 2-6 muestra el patrón de velocidad vs tiempo.

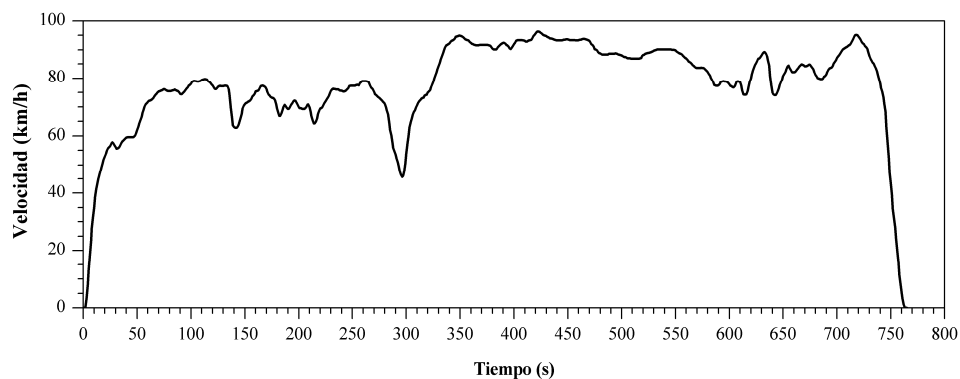


Figura 2-6 Ciclo de conducción “Highway Fuel Economy Driving Schedule” HWFET [55].

Adicionalmente existen dos ciclos de homologación en Estados Unidos con los cuales deben testearse los vehículos, estos procedimientos de prueba federales suplementarios (SFTP) han sido

diseñados para solucionar las deficiencias con el FTP-75 en lo que respecta al modo de conducción agresiva a alta velocidad y el uso del acondicionador de aire para ello se emplean los ciclos US06 y SC03 respectivamente.

2.5.3 Ciclos de conducción de Europa para homologación

En Europa existen tres ciclos de conducción para homologación, la particularidad de estos ciclos es que siendo ciclos representativos son de estado estable por lo que no representan una condición real de manejo. Actualmente se está armonizando el empleo del ciclo de conducción WLTC “*World Wide Harmonized Light Duty Test Cycle*” para homologación, este ciclo es transitorio por lo que representa con mayor precisión las condiciones reales de operación de los vehículos y a partir de este proceso obtener resultados de emisiones y consumo específico de combustible más cercanos a los que se podrían producir en el mundo real [59].

Ciclo ECE (“Elementary Urban Cycle”)

Este ciclo de manejo ha sido desarrollado para representar las condiciones de conducción de un vehículo cuando opera en la ciudad, la Figura 2-7 muestra el perfil de velocidad vs tiempo del ciclo.

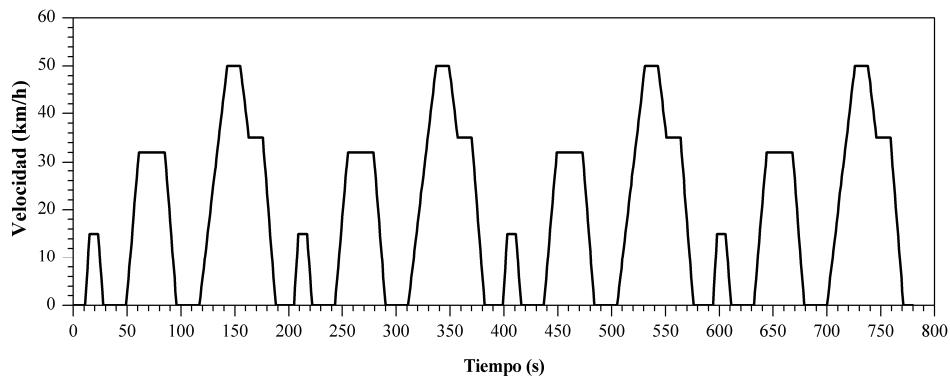


Figura 2-7 Ciclo de conducción “*Elementary Urban Cycle*” ECE [55].

El EUDC (“Extra-Urban Driving Cycle”)

El segmento EUDC complementa el ciclo de ECE para tener en cuenta modos de conducción más agresivos y de alta velocidad. La velocidad máxima del ciclo EUDC es de $120 \frac{km}{h}$. También se ha definido un ciclo alternativo de EUDC para vehículos de baja potencia con una velocidad máxima limitada a $90 \frac{km}{h}$. La Figura 2-8 muestra el patrón velocidad vs tiempo del ciclo.

armonizados a nivel mundial. (WLTP). La Figura 2-10 muestra el perfil velocidad vs tiempo para el WLTC Class3a.

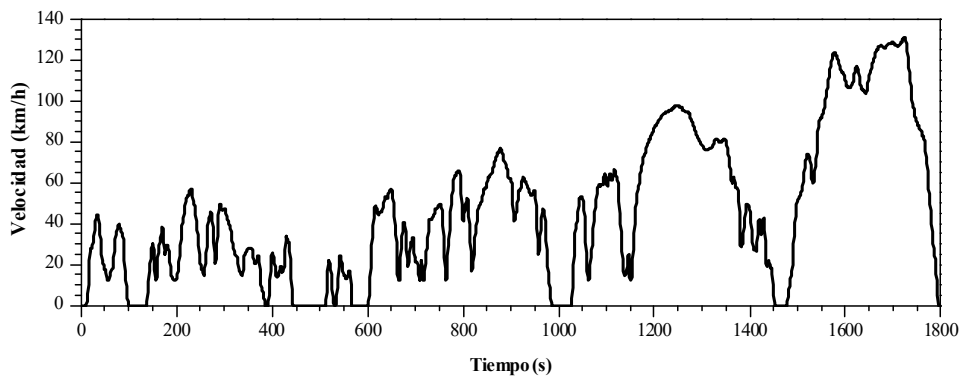


Figura 2-10 Ciclo de conducción “Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle” WLTC [60].

2.5.4 Ciclos de conducción de Japón

La legislación japonesa sobre emisiones a partir del año 2005 introdujo el ciclo de prueba para dinamómetro de chasis conocido como JC08, se emplea en vehículos livianos menores a 3500 kg. El perfil de conducción del JC08 se muestra en la Figura 2-11, representa la conducción en el tráfico urbano congestionado, incluidos los períodos de ralentí, de aceleración y desaceleración con frecuencia alterna. La medición se realiza dos veces, con un arranque en frío y con un inicio cálido. la prueba se utiliza para la medición de emisiones y la determinación del consumo específico de combustible, para vehículos a gasolina y diésel.

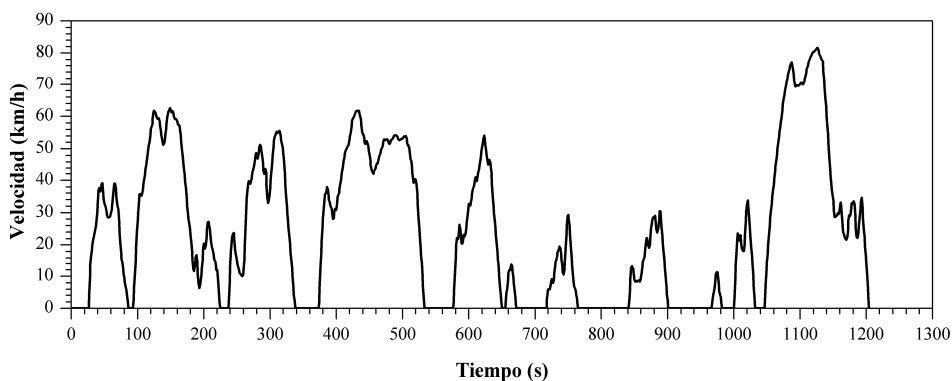


Figura 2-11 Ciclo de conducción JC08 [55].

A pesar de que el JC08 reemplazó por completo a partir del 2011 el ciclo de conducción urbano para la certificación de emisiones y la determinación de economía de combustible de vehículos

ligeros JC10-15 este último ciclo aún es empleado en la actualidad para certificar vehículos que son producidos en Japón para ser comercializados en china [61]. En la Figura 2-12 se muestra el perfil de velocidad vs tiempo para el JC10-15.

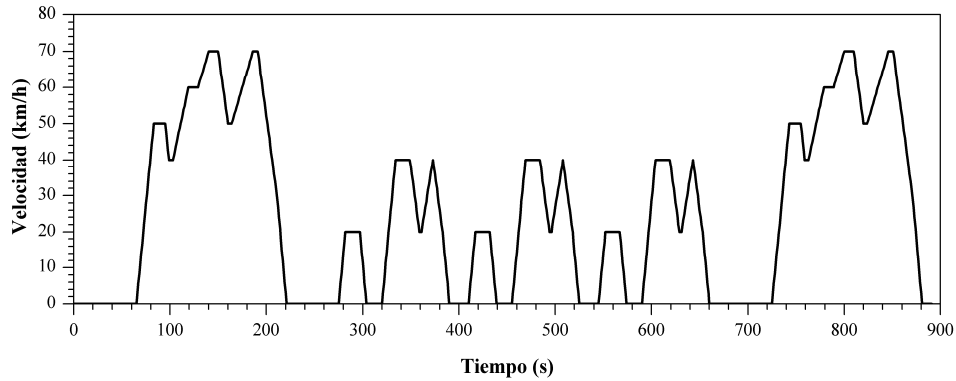


Figura 2-12 Ciclo de conducción JC10-15 [55].

EL ciclo de conducción AMCO

Este ciclo fue desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira, representa el patrón de conducción para el Área Metropolitana Centro Occidente – AMCO que comprende los municipios de Pereira, Dosquebradas y La Virginia, en el Departamento de Risaralda. Consta de 4 ciclos: dos combinados (urbano y autopista) como lo son el AMCO Virginia 8 am (AMCO V8) y el AMCO Virginia 12 m (AMCO V12), y dos urbanos como lo son AMCO Mercasa 8 am (AMCO M8) y el AMCO Mercasa 12 m (AMCO M12). La Figura 2-13 muestra el perfil velocidad vs tiempo para el AMCO M12.

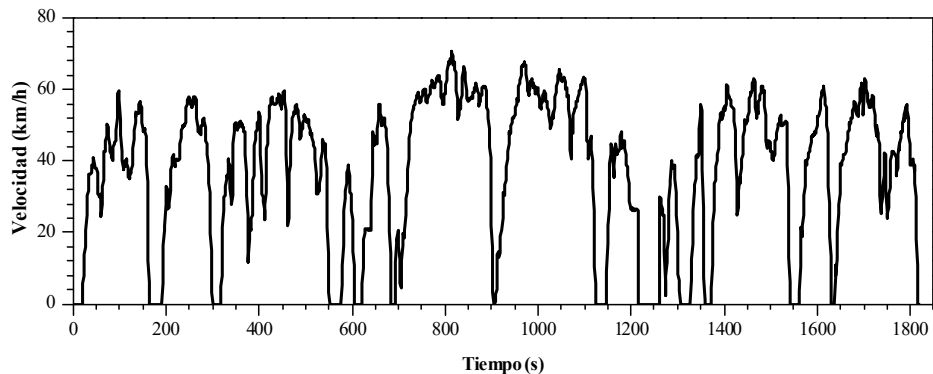


Figura 2-13 Ciclo de conducción AMCO M12 [16].

2.5.5 Los ciclos de conducción para homologación y el trabajo real

Los valores oficiales de consumo específico de combustible y emisiones contaminantes atmosféricas obtenidos en pruebas de laboratorio empleando los ciclos de conducción para homologación arrojan valores bajos en el consumo promedio de combustible y las emisiones de CO₂. Investigaciones realizadas evidencian que los valores de CO₂ y de consumo específico de combustible declarados oficialmente no reflejan el rendimiento real de los vehículos en la carretera encontrándose discrepancias del 30% - 40% entre los valores oficiales y el consumo en el mundo real, y año tras año ha estado aumentando continuamente ocasionado hoy en día que los resultados oficiales de las pruebas de homologación estén perdiendo credibilidad puesto que la brecha con el rendimiento en el mundo real es hoy en día un abismo [62].

Hay muchos factores a los que se les puede atribuir la discrepancia en los resultados de consumo específico de combustible y emisiones oficiales con los del mundo real, unos están relacionado directamente con los ciclos de conducción establecidos para homologación ya que éstos fueron concebidos bajo una dinámica de conducción que fue válida en su momento pero que actualmente ha variado de forma significativa, estudios han mostrado que en el año 2001 el 14% de los conductores podría igualar los resultados de las pruebas oficiales de consumo específico de combustible, pero en el año 2014, prácticamente nadie podría conducir su automóvil de esta manera. En el otro extremo del espectro, los “conductores menos económicos” ahora informan que usan el doble de combustible del valor declarado en cifras oficiales [63].

En la actualidad factores relacionados con el tráfico y las condiciones ambientales han venido cambiando comparadas con las condiciones cuando fueron desarrollados ciclos para homologación, el tráfico ha ido en aumento, las carreteras urbanas y autopistas incluyendo el grado de inclinación han ido evolucionando ocasionando que se altere el comportamiento en la conducción, se debe de tener en cuenta que estos factores son altamente influyentes en el consumo específico de combustible. Existen factores como lo son las cargas de viento, la temperatura ambiente, la altura sobre el nivel del mar, la masa de operación del vehículo, el tipo de combustible, el sistema para calefacción y acondicionamiento del vehículo, la tasa de ocupación, entre otras, que son parcialmente tenidos en cuenta en el momento de realizar las pruebas en el laboratorio o incluso

algunos no se tienen en cuenta lo que se refleja en un menor valor de consumo específico de combustible comparados con los valores obtenidos en el mundo real [45].

2.6 Parámetros para describir ciclos de conducción

Investigaciones que se han encaminado en la línea de desarrollo de ciclos de conducción ya sea para cuantificar el consumo específico de combustible de un vehículo, medir las emisiones de gases contaminantes atmosféricos o diseño de automóviles, han fijado parámetros o medidas para caracterizar y comparar los ciclos de conducción. Estos parámetros se relacionan principalmente con diferentes estadísticas del ciclo de conducción como lo son la velocidad media, desviación estándar de aceleración, aceleración positiva media y proporción de tiempo invertido en diferentes modos de la conducción de un vehículo, como aceleración, crucero, desaceleración y ralentí [64]. Los parámetros para describir los ciclos de conducción que se han propuesto y desarrollado, reflejan sólo los patrones del ciclo y no tienen nada que ver con el desempeño del vehículo que testea, ya sea en ruta o en el laboratorio.

H.Y. Tong *et al.* [65], manejaron en su estudio un conjunto de 12 parámetros como lo son:

- a) Velocidad promedio de todo el ciclo de manejo,
- b) Velocidad de funcionamiento promedio,
- c) Aceleración promedio de todas las fases de aceleración,
- d) Desaceleración promedio de todas las fases de desaceleración,
- e) La duración media de un período de conducción,
- f) Proporciones de tiempo de los modos de conducción en ralentí,
- g) Proporciones de tiempo de los modos de conducción en crucero,
- h) Proporciones de tiempo de los modos de conducción en aceleración,
- i) Proporciones de tiempo de los modos de conducción en deceleración,
- j) Promedio de cambios de aceleración y desaceleración (y viceversa) dentro de un período de conducción,
- k) Aceleración cuadrada media cuadrada,
- l) Energía cinética de aceleración positiva e PKE.

Por otro lado, Lorenzo Berzi *et al.* [66], en su trabajo distingue seis categorías principales de parámetros para describir ciclos de conducción dependiendo de su dimensión física.

En la mayoría de las referencias consultadas, solo se ha considerado un subconjunto de dichos parámetros, al observar en la literatura, la descripción o comparación de ciclos de conducción puede basarse en un conjunto reducido de indicadores, por ejemplo, Hung *et al.* [26] emplea 22 parámetros, y Kumar *et al.* [62] utiliza 13. Eva Ericsson [21] en su trabajo de investigación trabaja con un total de 62 parámetros en la descripción de los ciclos de conducción y mediante un análisis factorial hace una reducción a 16 parámetros independientes.

T. J. Barlow *et al.* [52] en su reporte para el departamento de transporte del Reino Unido realiza una lista completa de los parámetros utilizados en la descripción de los ciclos de conducción en la cual incluye 42 elementos clasificados en 6 grupos : parámetros relacionados con la distancia, parámetros relacionados al tiempo, parámetros relacionados con la velocidad, parámetros relacionados con la aceleración, parámetros relacionados con la parada y parámetros relacionados con la dinámica, estos parámetros son listados en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Parámetros para descripción de ciclos de conducción.

Los parámetros fueron tomados de la referencia [52].

Parámetro	Unidad	Parámetro	Unidad
Distancia total ($dist$)	m	Aceleración media negativa (a_{neg_av})	m/s ²
Tiempo total (T_{total})	s	Desviación estándar de la aceleración (a_{sd})	m/s ²
Tiempo de conducción dedicado acelerar (T_{acc})	s	Desviación estándar de la aceleración positiva (a_{pos_sd})	m/s ²
Tiempo de conducción dedicado a desacelerar (T_{dec})	s	Aceleración: 75° – 25° percentil	m/s ²
Tiempo dedicado a frenar (T_{break})	s	Número de aceleraciones (acc_{nr})	-
Tiempo en cruceo (T_{cruise})	s	Aceleraciones por kilómetro recorrido (acc_{rate})	1/km
Tiempo en detención (T_{stop})	s	Número de paradas ($stop_{nr}$)	-
Tiempo de conducción (T_{drive})	s	Paradas por kilómetro ($stop_{rate}$)	1/km
% de tiempo en conducción	%	Duración media de parada (\bar{T}_{stop})	s
% de tiempo en cruceo	%	Distancia media entre paradas	m
% de tiempo acelerando	%	Aceleración relativa positiva (RPA)	m/s ²
% de tiempo desacelerando	%	Energía cinética positiva (PKE)	m/s ²
% de tiempo frenando	%	Velocidad relativa positiva	-
% de tiempo detenido	%	Velocidad real relativa	-
Velocidad media (trip) (\bar{v}_{trip})	km/h	Velocidad cuadrática relativa	m/s
Velocidad media de conducción (\bar{v}_{drive})	km/h	Velocidad cuadrática relativa positiva ($RPSS$)	m/s

Parámetro	Unidad	Parámetro	Unidad
Desviación estándar de la velocidad (v_{sd})	km/h	Velocidad cuadrática relativa real	m/s
Velocidad: 75° – 25° percentil	km/h	Velocidad cúbica relativa	m ² /s ²
Velocidad máxima	km/h	Velocidad cúbica relativa positiva	m ² /s ²
Aceleración media (a_{av})	m/s ²	Velocidad cúbica relativa real	m ² /s ²
Aceleración media positiva (a_{pos_av})	m/s ²	Raíz media cuadrática de la aceleración	m/s ²

2.7 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE EN LA DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE

El análisis de regresión lineal es una herramienta que ha sido empleada en varios trabajos de investigación para estimar los índices de emisiones de gases contaminantes provenientes de los vehículos y el consumo específico de combustible, es así, como se han desarrollado modelos como COPERT, HBFA, VERSIT+ y otros. Los modelos COPERT y HBFEA fueron creados mediante las combinaciones lineales de las variables masa del vehículo, capacidad del motor, potencia nominal, relación potencia/masa, adicionalmente, el consumo específico de combustible de homologación fue utilizado como variable independiente y, en algunos casos, el tipo de transmisión (manual o automática) y el concepto de emisión del vehículo “Euro Standard” también fueron empleadas como variables independientes para la obtención de los modelos [19].

El modelo VERSIT+ es un modelo desarrollado para predecir las emisiones de los vehículos livianos en cualquier situación particular de tráfico, consiste en un conjunto de modelos estadísticos para categorías detalladas de vehículos que se han construido utilizando análisis de regresión lineal múltiple. El objetivo de esta investigación fue encontrar relaciones empíricas entre los factores de emisión medios, incluidos los intervalos de confianza, y un número limitado de perfiles de velocidad y variables relacionadas con el vehículo. En comparación con COPERT, los algoritmos de velocidad promedio VERSIT+ proporcionan una mayor precisión con respecto a la predicción de emisiones en situaciones de tráfico específicas [67].

Según L. Ntziachristos *et al.* [68] existen varios enfoques que pueden servir como base y utilizarse para desarrollar modelos de regresión lineal múltiple que permitan estimar el consumo específico de combustible en vehículos. Un enfoque es crear modelos detallados los cuales emplean como predictores las especificaciones exactas del vehículo, teniendo en cuenta la eficiencia del motor, el

coeficiente de rodadura del vehículo, su resistencia aerodinámica y los patrones de operación, sin embargo, dichos modelos necesitan datos detallados que rara vez están disponibles para una flota de vehículos. Para desarrollar un modelo lo más preciso posible que esté basado en datos que puedan estar disponibles, L. Ntziachristos *et al.* consideraron usar los valores que están disponibles en la base de datos de monitoreo de CO₂ del Área Económica Europea - EEA como parámetros de entrada para el modelo propuesto, en esta base de datos se obtienen valores del número de vehículos matriculados por modelo en Europa, el valor de CO₂ de homologación, que es proporcional a los valores de consumo específico de combustible de homologación, la capacidad del motor, peso y la potencia, como resultado proponen dos modelos de predicción de consumo específico de combustible y emisiones de CO₂ uno para vehículos a gasolina y otros para diésel tomando como predictores la masa, la capacidad y adicionalmente el valor de consumo específico de combustible reportado en las pruebas de homologación. Otros trabajos como el de Uwe Tietge *et al.* [18] se han enfocado a mejorar los modelos propuestos por L. Ntziachristos *et al.* validando los modelos y aplicando factores de corrección a los modelos de regresión para mejorar el valor de la predicción acorde a los desarrollos tecnológicos de los vehículos.

Es de resaltar que los modelos de predicción propuestos en las diversas investigaciones han sido desarrollados con base en los parámetros constructivos de los vehículos, en la actualidad no se han obtenido modelos de predicción de emisiones y consumo específico de combustible empleado los parámetros que describen los ciclos de conducción, aunque cabe anotar, que Eva Ericsson [21], en su trabajo emplea un análisis de regresión para encontrar la relación entre nueve factores de los ciclos de conducción, el consumo específico de combustible y las emisiones contaminantes.

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta consta de 4 pasos y es descrita en el flujograma mostrado en la Figura 3-1.

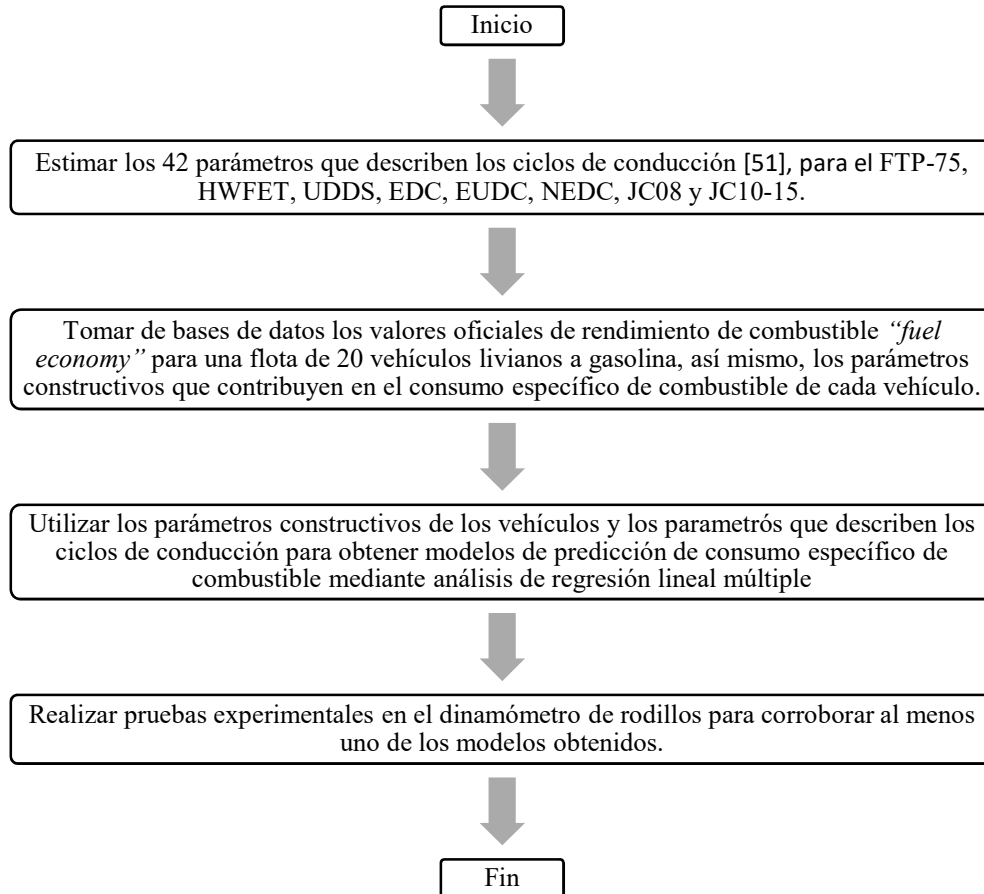


Figura 3-1 Metodología propuesta.

3.1 ESTRUCTURA DEL MODELO

El modelo para estimar el consumo específico de combustible es un modelo logrado a partir de un análisis de regresión lineal múltiple, y presenta la siguiente forma:

$$SFC_{pred} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad \left[\frac{L}{100 \text{ km}} \right] \quad (3-1)$$

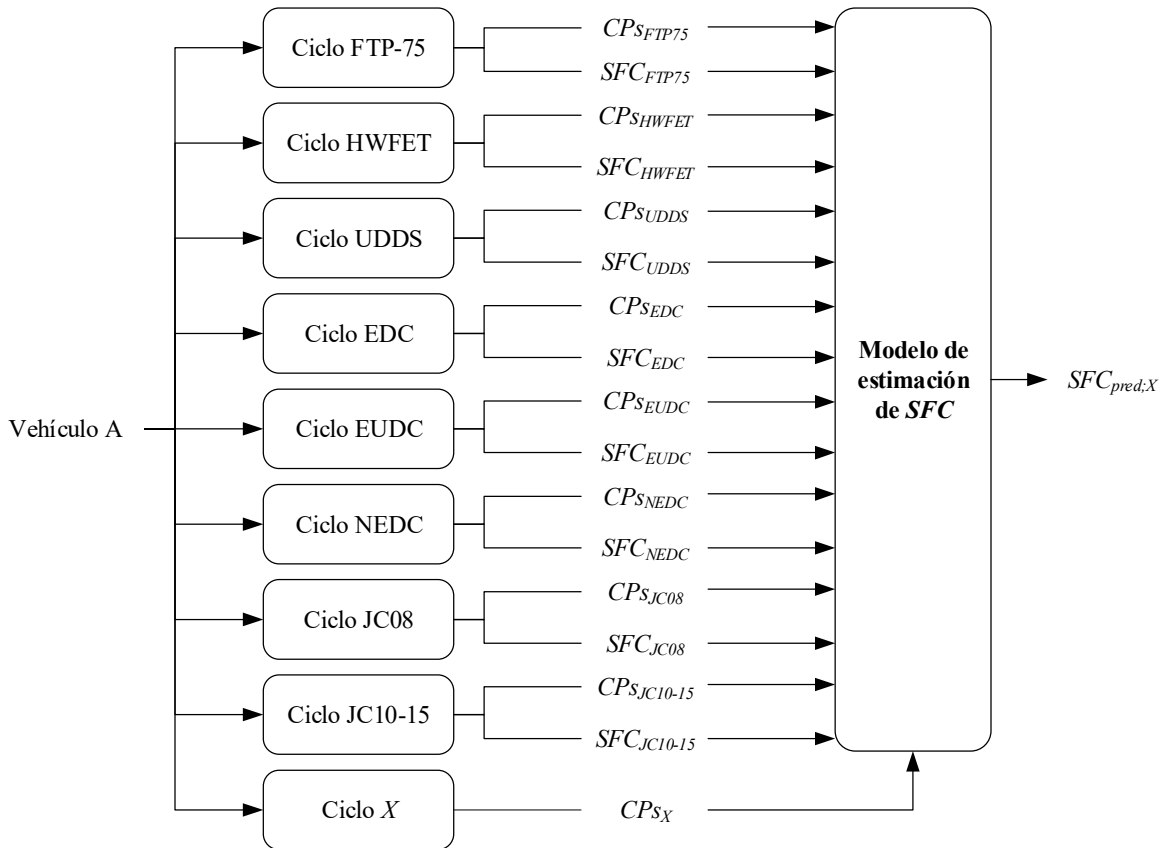
donde,

β_0 es el intercepto, valor constante,

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ son los coeficientes de cada uno de los predictores que describen el modelo, y,

X_1, X_2, \dots, X_n son cada uno de los predictores que describen el modelo.

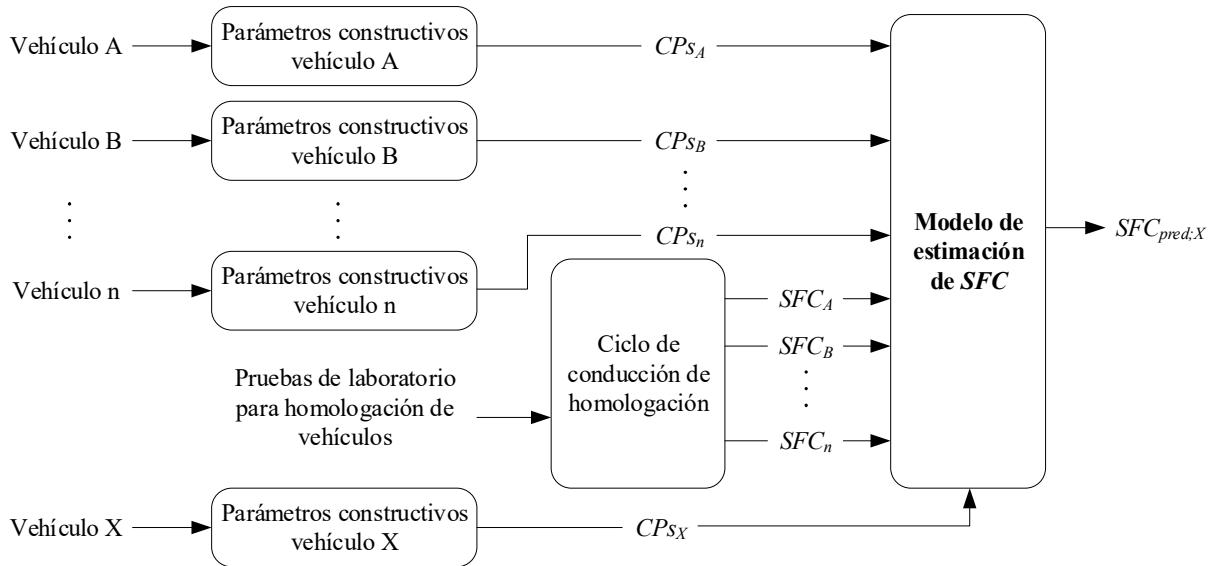
Un modelo de regresión lineal simplificado se puede utilizar para predecir el consumo específico de combustible a partir de los datos disponibles públicamente, obtener un único modelo para la estimación de consumo específico de combustible mediante regresión lineal múltiple donde se involucren como predictores el conjunto de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción y parámetros constructivos de los vehículos no es posible, ya que cuando se realizan pruebas en el laboratorio a un mismo vehículo bajo diferentes ciclos de conducción los parámetros constructivos del vehículo permanecen constantes, mientras que los parámetros descriptivos de los ciclos de conducción son distintos entre cada uno de los ciclos, la Figura 3-2 muestra claramente lo anteriormente expuesto e ilustra la forma como interactúa un modelo de estimación de consumo específico de combustible a partir de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción.



CPs : parámetros que describen los ciclos de conducción (regresores).
 SFC : consumo específico de combustible (L/100 km) "Specific fuel consumption".

Figura 3-2 Modelo de estimación de consumo específico de combustible SFC a partir de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción.

Por otra parte, en la Figura 3-3 se muestra un modelo de estimación a partir de los parámetros constructivos de los vehículos, como se observa varios vehículos son ensayados bajo el mismo ciclo de conducción lo que ocasiona que los parámetros descriptivos del ciclo de conducción sean constantes para cada vehículo, mientras que los parámetros constructivos de los vehículos son distintos para cada uno de ellos.



CPs: parámetros constructivos de los vehículos (regresores).
SFC: consumo específico de combustible (L/100 km) “*Specific fuel consumption*”.

Figura 3-3 Modelo de estimación de consumo específico de combustible *SFC* a partir de parámetros constructivos de los vehículos.

Para lograr el objetivo propuesto es necesario plantear varios modelos de estimación de *SFC*, unos, desarrollados con base en los parámetros constructivos de los vehículos para los diferentes ciclos de homologación bajo estudio, y otros, desarrollados con base en los parámetros descriptivos de los diferentes ciclos de conducción para todos los vehículos de la flota bajo estudio.

De lo anterior, se obtendrán un total de 8 modelos de regresión para estimar el *SFC* teniendo como predictores los parámetros constructivos de los vehículos un modelo por cada ciclo de conducción de homologación. Por otro lado, se obtendrían un total de *n* modelos de regresión para estimar el *SFC* teniendo como predictores los parámetros descriptivos de los ciclos de conducción, un modelo por cada vehículo de la flota o quizás un modelo pueda llegar a servir para varios vehículos siempre

y cuando estos tengan parámetros constructivos muy similares o idénticos, este hecho llevaría a tener tantos modelos de regresión como vehículos existan, lo que es poco práctico. Para desarrollar modelos de regresión que estimen el SFC a partir de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción y que se puedan aplicar para conjuntos de vehículos se hace necesario agrupar por clases los vehículos de la flota bajo estudio, el criterio para realizar la agrupación por clases será el parámetro constructivo de los vehículos que mejor describa el SFC mediante un análisis de regresión lineal para cada uno de los ciclos de conducción bajo estudio, con el fin de tener un número razonable de modelos se decide realizar la agrupación en 5 clases.

3.2 DESARROLLO DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

Con el fin de desarrollar los modelos de regresión que permitan predecir el consumo específico de combustible de una manera precisa basados en parámetros constructivos de los vehículos y en parámetros que describen los ciclos de conducción, se optó por seguir el enfoque propuesto por L. Ntziachristos *et al.* [68], el cual permite crear modelos de regresión lineal simplificados empleando la información disponible en la literatura y en las bases de datos.

Los valores tanto de las variables predictoras en este caso los parámetros que describen los ciclos de conducción y los parámetros constructivos de los vehículos, como la variable de respuesta el consumo específico de combustible de homologación - SFC_h fueron obtenidos del documento [52], de las bases de datos de las páginas WWW.SPRITMONITOR.DE y WWW.KM77.COM, del Departamento de Energía de los Estados Unidos, del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, y del Ministerio de Tierras, Infraestructura y Transporte, Sección de Política Ambiental de la Oficina del Automóvil de Japón. A continuación, se dan a conocer los valores de los predictores y del SFC_h empleados en el desarrollo de los modelos.

3.2.1 Parámetros que describen los ciclos de conducción de homologación FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC, NEDC, JC08 y JC10-15

Se calcularon 42 parámetros que describen los ciclos de conducción empleados en este trabajo. En la Tabla B-6-1 del ANEXO B se presentan los valores de los parámetros característicos correspondiente a cada uno de los ciclos de conducción empleados en este trabajo, el valor de cada

parámetro se estimó de acuerdo a las definiciones dadas por T J Barlow et al. [52], en el ANEXO A se encuentran las definiciones correspondientes a cada parámetro.

3.2.2 Flota de vehículos

De las bases de datos publicadas por los gobiernos de Japón [61], Chile [69] y Estados Unidos [70] se obtuvieron los valores de consumo específico de combustible oficiales para la homologación de vehículos SFC_h . Independientemente de los fabricantes y la línea del vehículo, se seleccionaron veinte automóviles livianos a gasolina para el desarrollo del presente trabajo, se cubrió una amplia gama de capacidades del motor y tamaños de vehículos con el fin de capturar la diversidad de automóviles en la mejor medida posible (ver Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Rendimiento de combustible ($F.E$) para una flota de 20 vehículos livianos a gasolina, valores oficiales obtenidos de las bases de datos para varios ciclos de conducción de homologación.

Vehículo			Año	Rendimiento de combustible $F.E$							
				(MPG)			(km·L ⁻¹)				
			FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15	
1	Susuki	Kiszashi	2014	23	30	26	8,6	15,1	11,9	11,8	13
2	Mazda	CX-5	2017	23	29	26	10,8	15,5	13,3	14,8	10,5
3	Mazda	3	2014	29	40	33	11,4	19,5	15,5	17,2	13,6
4	Mazda	5	2010	22	28	24	9,1	15,2	12,2	14,4	10,5
5	Volswagen	Golf GTI	2017	24	34	28	9,3	18,2	13,5	16	13
6	Volswagen	Golf R	2014	23	30	25	11,6	16,7	14,3	14,4	12,4
7	Volswagen	Touareg	2017	17	23	19	10,1	19	13,3	9,8	9,5
8	Mitsubishi	Outlander	2015	24	29	26	9,7	14,9	12,5	14,6	10,7
9	Nissan	Juke	2016	28	32	30	13,7	20	17,1	13,4	11,8
10	Nissan	GT-R	2016	16	22	19	8,8	17	11,8	8,8	8,4
11	Subaru	Impreza	2017	24	32	27	10,9	17,5	14,3	16,8	13,6
12	Subaru	Legacy	2017	23	34	29	9,2	14,5	12	14,8	11,9
13	Subaru	WRX	2015	20	27	23	7,9	13,9	10,9	13,2	10
14	Mini	Cooper Paceman	2015	27	34	30	12	18,2	15,4	16,7	13
15	Mini	Cooper S	2015	26	35	29	14,3	21,7	18,2	19	15,2
16	BMW	640i Convertible	2017	20	29	23	9,3	16,4	12,8	12,2	8,9
17	Mercedes Benz	AMG CLA45 4Matic	2017	23	30	26	10,9	17,6	13,9	13,2	11,2
18	Jaguar	F-Type Coupe	2016	19	28	22	7	14,5	10,4	12,2	8,9
19	Jaguar	XJ	2016	15	23	18	5,5	11,5	8,3	11,1	8,9
20	Audi	A4 Avant 2.0	2017	25	33	28	13,3	19,6	16,9	18,4	14,4

Los parámetros constructivos de los vehículos se obtuvieron de las bases de datos *spritmonitor.de* [71] y *km77.com* [72]. Las características constructivas promedio del conjunto de vehículos seleccionados se asemejan a las que se pueden encontrar en un parque automotor de países como Estados Unidos, México, la Unión Europea, Colombia, entre otros. El año de fabricación de los vehículos está entre 2010 – 2017, la masa promedio de flota es de 1548 kg, la capacidad promedio del motor es 2400 cc, y la potencia máxima promedio del motor es de 178 kW (238 hp). La Tabla 3-2 muestra en detalle las características constructivas de los 20 vehículos empleados en este trabajo.

Tabla 3-2 Parámetros constructivos de la flota de vehículos.

Vehículo No.	Cilindrada (L)	No. Cilindros	Aceleración (0 – 100) km/h (s)	Masa (kg)	C_d	f_r	Área frontal (m ²)	Potencia máx. (kW)	No. Pasajeros	Capacidad Tanque (L)
1	2,4	4	7,8	1495	-	-	-	131	5	63
2	2,5	4	9,2	1515	0,3	0,9	2,6	141	5	58
3	2	4	8,9	1280	0,3	0,6	2,26	88	5	51
4	2	4	11	1485	0,3	0,7	2,46	111	7	60
5	2	4	6,9	1370	0,3	0,7	2,1	164	5	55
6	2	4	5,2	1384	0,3	0,6	2,15	218	5	55
7	3,6	6	8,6	2130	0,4	1	2,83	206	5	100
8	2,4	4	11,7	1505	-	-	-	110	7	63
9	1,6	4	10,8	1311	0,4	0,8	2,31	85	5	46
10	3,6	6	2,8	1827	0,3	-	-	419	4	74
11	2	4	10,1	1349	0,3	-	-	112	5	50
12	2,5	4	9,8	1574	0,3	0,6	2,13	129	5	65
13	2	4	5,2	1602	-	-	-	197	5	60
14	1,6	4	6,9	1295	0,3	0,7	2,09	141	5	44
15	1,6	4	6,7	1250	0,3	0,7	2,09	141	4	44
16	3	6	5,4	1965	0,3	0,7	2,23	235	4	70
17	2	4	4,6	1585	0,3	0,6	2,19	265	5	56
18	3	6	5,3	1577	-	-	-	250	2	70
19	5	8	5,7	1835	0,3	0,7	2,3	283	5	82
20	2	4	8,5	1635	0,3	0,6	2,2	125	5	25

3.2.3 Reducción de parámetros predictores

Para generar la regresión lineal múltiple y con el fin de obtener las ecuaciones normales, se requiere tener un número máximo variables independientes k o predictores ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_k$) igual a $n - 1$ observaciones. En la Tabla 3-2 se muestran 10 parámetros constructivos de vehículos

utilizados para crear los modelos de regresión lineal múltiple que estimen el *SFC*, de igual forma, la Tabla B-6-1 da a conocer los 42 parámetros que describen 8 ciclos de conducción con los cuales se emplearon para crear los modelos de regresión lineal que estimen el *SFC* a partir de estos parámetros, y en la Tabla 3-1 se tienen los valores oficiales del rendimiento de combustible de homologación $F.E_h$ para 8 ciclos de conducción de la flota de 20 vehículos seleccionada, es de observarse que para crear los modelos de predicción a partir de parámetros constructivos de los vehículos se tienen $k = 10$ predictores y $n = 20$ observaciones independientes del rendimiento de combustible $F.E_h$, mientras que para desarrollar los modelos de predicción a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción se tienen $k = 42$ predictores y $n = 8$ observaciones independientes de rendimiento de combustible $F.E_h$ para cada uno de los 20 vehículos de la flota bajo estudio lo que implica hacer una reducción a máximo 7 parámetros descriptivos de los ciclos de conducción que mejor expliquen el consumo específico de combustible.

Con el fin de obtener modelos sencillos y ajustados que estimen el *SFC*, y que realicen predicciones con buena precisión se tuvo en cuenta las siguientes condiciones:

- a) Reducir el número de variables predictoras, para obtener como mínimo $n - k - 1 = 2$ grados de libertad en el error, permitiendo que el coeficiente de determinación ajustado R_{ajus}^2 favorezca al modelo reducido (sencillo) sobre modelos que contengan hasta $n - 1$ predictores.
- b) Garantizar independencia entre predictores, la multicolinealidad entre el conjunto de predictores se evaluó calculando el valor de inflación de la varianza *VIF*, se aceptaron los conjuntos de predictores que fueran medianamente independientes $1 \leq VIF \leq 5$. Se buscó que el conjunto de predictores del modelo tuviera el menor *VIF*.
- c) Evaluar la significancia de cada predictor del conjunto, aplicando la prueba de hipótesis para una distribución *t*, teniendo un $\alpha = 0,05$, $(n - k - 1)$ grados de libertad, y calculando el valor *P* del predictor, si un predictor del conjunto es significativo su valor *P* o también conocido como *P_value* debe de ser menor que α para éste caso ($P < 0,05$).
- d) Hacer un análisis del coeficiente de determinación ajustado R_{ajus}^2 del modelo, se tomó como valor aceptable un $R_{ajus}^2 \geq 80\%$.

Finalmente, para cumplir con lo anteriormente expuesto se vio la necesidad de realizar un análisis de todas las combinaciones posibles de conjuntos de parámetros predictores, teniendo desde $k = 1$ predictor hasta $k = n - 3$ predictores, para encontrar la combinación de predictores que mejor expliquen el *SFC* y obtener un modelo de regresión lineal múltiple sencillo y ajustado, para esto se realizó un algoritmo computacional en *MATLAB* el cual arrojó los posibles subconjuntos de predictores, y con ayuda del software estadístico *MINITAB* y el solver de *EXCEL* se corroboraron los resultados y se seleccionaron los mejores modelos.

4. RESULTADOS

4.1 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE – SFC_{pred} A PARTIR DE PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS DE LOS VEHÍCULOS.

Con base en lo expuesto en el numeral 3.1 se desarrollaron 8 modelos (uno por cada ciclo de conducción) para predecir el consumo específico de combustible – SFC_{pred} a partir de los parámetros constructivos de los vehículos. La Tabla 4-1 muestra el nombre de cada parámetro y la variable X_i a la que fue asociada, los valores de cada parámetro están reportados en la Tabla 3-2 para la flota de 20 vehículos seleccionada.

Tabla 4-1 Predictores utilizados en la obtención de los modelos de predicción de SFC a partir de parámetros constructivos de los vehículos

Variable	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
Predictor	Cilindrada (L)	No. Cilindros	Aceleración (0 - 100) (s)	Masa (kg)	C_d	f_r	Área frontal (m ²)	Potencia máx. (kW)	No. Pasajeros	Capacidad Tanque (L)

Empleando el algoritmo computacional desarrollado en *MATLAB* se realizaron combinaciones sin repetición tomando conjuntos con $k = 1$ hasta $k = 10$ de parámetros constructivos de los vehículos para así obtener el conjunto predictores que mejor ajusten el modelo de SFC . En la Tabla 4-2 se muestra el número de combinaciones y grados de libertad para cada una de las combinaciones de parámetros constructivos, nótese que sólo se tienen 10 parámetros constructivos por lo tanto, el número mínimo de grados de libertad del error es $\nu = 9$ cumpliendo con 3.2.3.a).

Tabla 4-2 Grados de libertad y combinaciones de parámetros predictores

Conjunto de predictores k	Grados de libertad del error ν	Combinaciones sin repetición
10	9	1
9	10	10
8	11	45
7	12	120
6	13	210
5	14	252
4	15	210
3	16	120
2	17	45
1	18	10

$$SFC_{pred;FTP-75} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_8 \cdot X_8 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-1)$$

$$SFC_{pred;HWFET} = \beta_0 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_6 \cdot X_6 + \beta_8 \cdot X_8 + \beta_9 \cdot X_9 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-2)$$

$$SFC_{pred;UDDS} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_8 \cdot X_8 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-3)$$

$$SFC_{pred;EDC} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_7 \cdot X_7 + \beta_9 \cdot X_9 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-4)$$

$$SFC_{pred;EUDC} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_7 \cdot X_7 + \beta_9 \cdot X_9 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-5)$$

$$SFC_{pred;NEDC} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_7 \cdot X_7 + \beta_9 \cdot X_9 \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-6)$$

$$SFC_{pred;JC08} = \beta_0 + \beta_8 \cdot X_8 + \beta_{10} \cdot X_{10} \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-7)$$

$$SFC_{pred;JC10-15} = \beta_0 + \beta_8 \cdot X_8 + \beta_{10} \cdot X_{10} \quad \left[\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right] \quad (4-8)$$

donde,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{10}$: son cada uno de los coeficientes asociados a los predictores del SFC_{pred} para los ciclos de conducción. La Tabla 4-4 muestra los valores obtenidos.

X_1, X_2, \dots, X_{10} : representan cada uno de los predictores que tienen significancia y aportan en el modelo (ver Tabla 4-1).

Tabla 4-4 Coeficientes β_i para los modelos de estimación de SFC obtenidos a partir de parámetros constructivos de los vehículos.

Coeficiente	FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
β_0	5,134	-2,680	5,180	7,360	4,570	4,697	2,441	4,209
β_1	1,651		1,240	3,190	1,080	1,795		
β_2		0,436						
β_3								
β_4								
β_5								
β_6		5,506						
β_7				-5,750	-2,160	-2,861		
β_8	0,009	0,010	0,010				0,009	0,009
β_9		0,596		1,590	0,740	0,982		
β_{10}							0,056	0,055

Desde la Tabla 4-5 a la Tabla 4-12 se muestran los datos de SFC_{pred} , derivados a partir de cada uno de los modelos de predicción de consumo específico de combustible a partir de parámetros

constructivos de los vehículos, en estas tablas, también se muestra el intervalo de confianza con una probabilidad del 95 %.

Con el fin de determinar la confiabilidad de cada uno de los modelos de predicción y tener seguridad que los valores estimados son realmente buenos, para cada uno de los modelos se calculó el coeficiente de determinación, el coeficiente de correlación, el intervalo de confianza del valor medio de SFC para un 95%, y el intervalo de predicción para cada valor particular de SFC de cada vehículo de la flota con una confianza del 95%.

Dado que los modelos presentan más de una variable independiente, la significancia de cada uno de ellos se obtuvo mediante la prueba F, bajo los siguientes criterios: $F_{cal} > F_{crit}$, con un valor de $\alpha = 0,01$, con un grado de libertad en el numerador y con 17 grados de libertad en el denominador se tiene un $F_{crit} = 8,4$.

Tabla 4-5 Valores de SFC_{pred} para el ciclo FTP-75 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
1	10,2	10,26	±0,32	±1,42
2	10,2	10,51	±0,32	±1,42
3	8,1	9,21	±0,51	±1,48
4	10,6	9,42	±0,31	±1,42
5	9,8	9,89	±0,34	±1,43
6	10,2	10,37	±0,32	±1,42
7	13,9	12,90	±0,58	±1,51
8	9,8	10,07	±0,34	±1,43
9	8,4	8,53	±0,48	±1,47
10	14,7	14,79	±0,69	±1,55
11	9,8	9,43	±0,34	±1,43
12	10,2	10,40	±0,32	±1,42
13	11,8	10,18	±0,35	±1,43
14	8,7	9,02	±0,44	±1,46
15	9,0	9,02	±0,41	±1,45
16	11,8	12,17	±0,35	±1,43
17	10,2	10,78	±0,32	±1,42
18	12,3	12,30	±0,39	±1,44
19	15,6	15,90	±0,82	±1,61
20	9,4	9,54	±0,37	±1,44

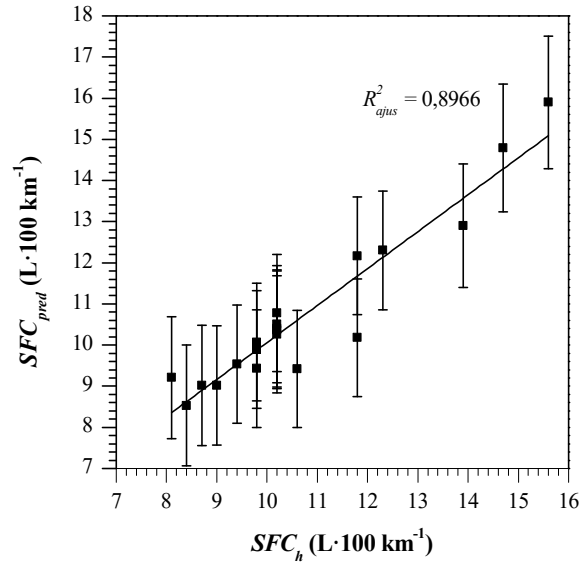


Figura 4-1 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción FTP-75.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción FTP-75 se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 90,75\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9526$, con lo que se puede concluir que el 90,75% de los valores de SFC para el ciclo de conducción FTP-75 son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una fuerte asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 83,36$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-1 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,61 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su cilindrada y su potencia máxima, el SFC_{pred} para el FTP-75 se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,61 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-5.

Tabla 4-6 Valores de SFC_{pred} para el ciclo HWFET e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
2	8,1	8,13	±0,18	±0,68
3	5,9	6,36	±0,17	±0,68
4	8,4	8,37	±0,18	±0,68
5	6,9	7,19	±0,17	±0,68
6	7,8	7,55	±0,18	±0,68
7	10,2	10,18	±0,16	±0,68
9	7,4	7,32	±0,18	±0,68
12	6,9	6,69	±0,17	±0,68
14	6,9	7,08	±0,17	±0,68
15	6,7	6,38	±0,17	±0,68
16	8,1	8,37	±0,18	±0,68
17	7,8	7,94	±0,18	±0,68
19	10,2	10,08	±0,16	±0,68
20	7,1	6,77	±0,17	±0,68

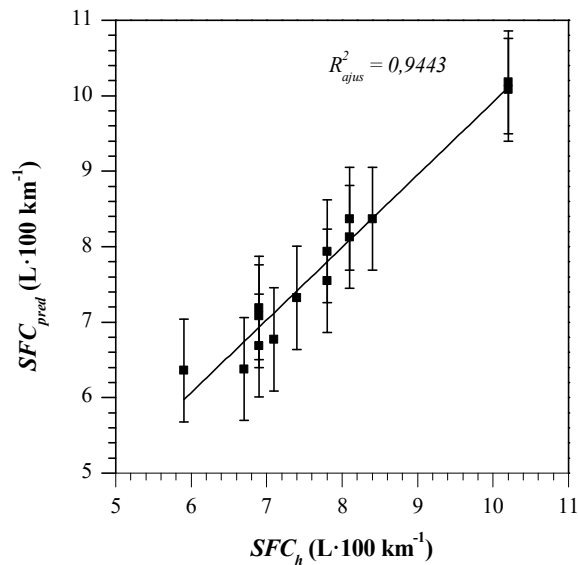


Figura 4-2 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción HWFET.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción HWFET se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 96,14\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9805$, con lo que se

puede concluir que el 96,14% de los valores de SFC para el ciclo de conducción HWFET son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una fuerte asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 56,10$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-2 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 0,68 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su número de cilindros, su coeficiente de resistencia a la rodadura f_r , su potencia máxima y el número de pasajeros, el SFC_{pred} para el HWFET se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 0,68 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-6.

Tabla 4-7 Valores de SFC_{pred} para el ciclo UDDS e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
1	9,0	9,04	$\pm 0,34$	$\pm 1,51$
2	9,0	9,24	$\pm 0,34$	$\pm 1,51$
3	7,1	8,26	$\pm 0,59$	$\pm 1,59$
4	9,8	8,41	$\pm 0,34$	$\pm 1,51$
5	8,4	8,77	$\pm 0,39$	$\pm 1,53$
6	9,4	9,14	$\pm 0,33$	$\pm 1,51$
7	12,3	11,04	$\pm 0,69$	$\pm 1,63$
8	9,0	8,90	$\pm 0,34$	$\pm 1,51$
9	7,8	7,74	$\pm 0,47$	$\pm 1,55$
10	12,3	12,49	$\pm 0,69$	$\pm 1,63$
11	8,7	8,42	$\pm 0,36$	$\pm 1,52$
12	8,1	9,15	$\pm 0,43$	$\pm 1,54$
13	10,2	9,00	$\pm 0,37$	$\pm 1,52$
14	7,8	8,12	$\pm 0,47$	$\pm 1,55$
15	8,1	8,12	$\pm 0,43$	$\pm 1,54$
16	10,2	10,50	$\pm 0,37$	$\pm 1,52$
17	9,0	9,46	$\pm 0,34$	$\pm 1,51$
18	10,6	10,60	$\pm 0,41$	$\pm 1,53$
19	13,0	13,30	$\pm 0,82$	$\pm 1,69$
20	8,4	8,51	$\pm 0,39$	$\pm 1,53$

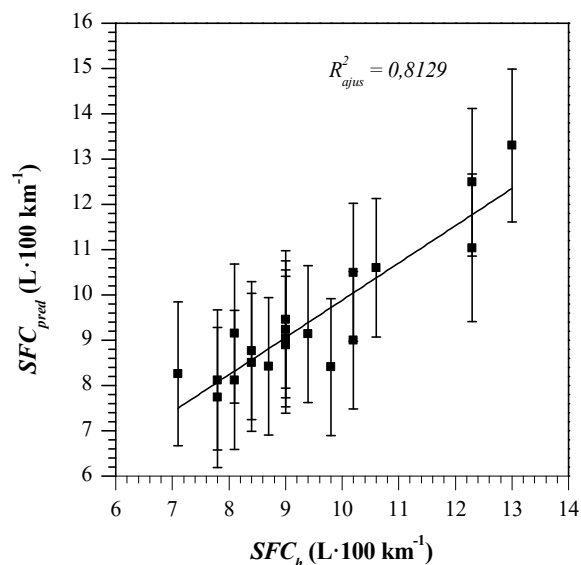


Figura 4-3 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción UDDS.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción UDDS se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 83,26\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9125$, con lo que se puede concluir que el 83,26% de los valores de SFC para el ciclo de conducción UDDS son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una mediana asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 42,27$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-3 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,69 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su cilindrada y su potencia máxima, el SFC_{pred} para el UDDS se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,69 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-7.

Tabla 4-8 Valores de SFC_{pred} para el ciclo EDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
2	9,3	8,36	±0,45	±1,78
3	8,8	8,72	±0,45	±1,78
4	11,0	10,76	±0,46	±1,78
5	10,8	9,64	±0,46	±1,78
6	8,6	9,35	±0,45	±1,77
7	9,9	10,55	±0,46	±1,78
9	7,3	7,16	±0,42	±1,77
12	10,9	11,06	±0,46	±1,78
14	8,3	8,42	±0,44	±1,77
15	7,0	6,83	±0,41	±1,77
16	10,8	10,49	±0,46	±1,78
17	9,2	9,12	±0,45	±1,78
19	18,2	18,06	±0,14	±1,71
20	7,5	9,07	±0,42	±1,77

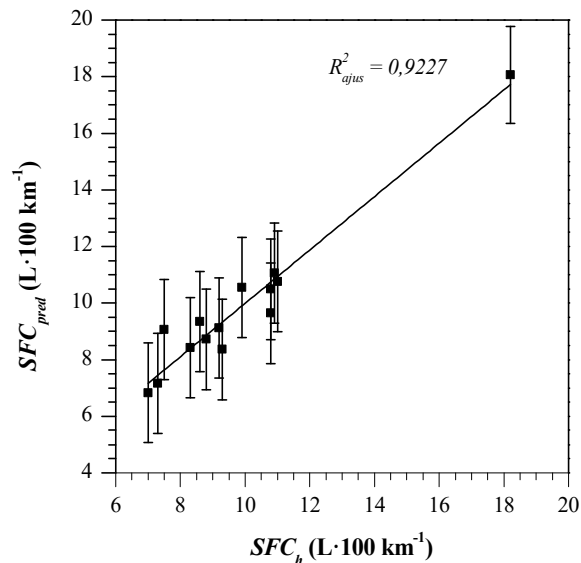


Figura 4-4 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción EDC.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción EDC se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 94,05\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9698$, con lo que se puede concluir que el 94,45% de los valores de SFC para el ciclo de conducción EDC son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una fuerte asociación lineal positiva

entre las variables. El $F_{calc} = 52,70$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-4 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,77 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su cilindrada, su área frontal y el número de pasajeros, el SFC_{pred} para el EDC se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,77 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-8.

Tabla 4-9 Valores de SFC_{pred} para el ciclo EUDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
2	6,5	5,33	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
3	5,1	5,53	$\pm 0,31$	$\pm 1,25$
4	6,6	6,58	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
5	5,5	5,88	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
6	6,0	5,77	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
7	5,3	6,02	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
9	5,0	4,99	$\pm 0,31$	$\pm 1,24$
12	6,9	6,35	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
14	5,5	5,47	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
15	4,6	4,73	$\pm 0,31$	$\pm 1,24$
16	6,1	5,93	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
17	5,7	5,68	$\pm 0,32$	$\pm 1,25$
19	8,7	8,67	$\pm 0,27$	$\pm 1,23$
20	5,1	5,66	$\pm 0,31$	$\pm 1,25$

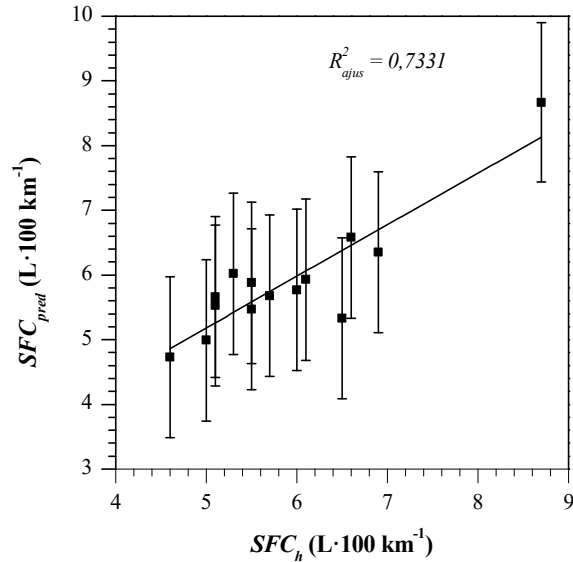


Figura 4-5 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción EUDC.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción EUDC se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 79,47\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,8914$, con lo que se puede concluir que el 79,47% de los valores de SFC para el ciclo de conducción EUDC son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una buena asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 12,90$ valor que es mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-5 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,25 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su cilindrada, su área frontal y el número de pasajeros, el SFC_{pred} para el EUDC se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,25 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-9.

Tabla 4-10 Valores de SFC_{pred} para el ciclo NEDC e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
2	7,5	6,66	±0,28	±1,09
3	6,5	6,73	±0,28	±1,09
4	8,2	8,13	±0,28	±1,09
5	7,4	7,19	±0,28	±1,09
6	7,0	7,05	±0,28	±1,09
7	7,5	7,97	±0,28	±1,09
9	5,8	5,87	±0,27	±1,09
12	8,3	8	±0,28	±1,09
14	6,5	6,5	±0,28	±1,09
15	5,5	5,52	±0,26	±1,09
16	7,8	7,63	±0,28	±1,09
17	7,2	6,93	±0,28	±1,09
19	12,0	12	±0,19	±1,07
20	5,9	6,9	±0,27	±1,09

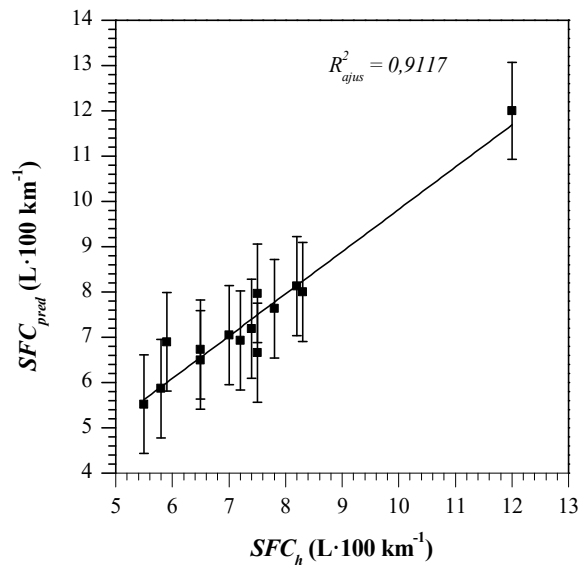


Figura 4-6 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción NEDC.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción NEDC se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 93,21\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9654$, con lo que se

puede concluir que el 93,21% de los valores de SFC para el ciclo de conducción NEDC son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una fuerte asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 45,72$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-6 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,09 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su cilindrada, su área frontal y el número de pasajeros, el SFC_{pred} para el NEDC se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,09 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-10.

Tabla 4-11 Valores de SFC_{pred} para el ciclo JC08 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
1	8,5	7,15	$\pm 0,43$	$\pm 1,58$
2	6,8	6,95	$\pm 0,36$	$\pm 1,57$
3	5,8	6,09	$\pm 0,49$	$\pm 1,60$
4	6,9	6,80	$\pm 0,36$	$\pm 1,57$
5	6,3	6,98	$\pm 0,41$	$\pm 1,58$
6	6,9	7,46	$\pm 0,36$	$\pm 1,57$
7	10,2	9,89	$\pm 0,72$	$\pm 1,69$
8	6,8	6,96	$\pm 0,36$	$\pm 1,57$
9	7,5	5,78	$\pm 0,34$	$\pm 1,56$
10	11,4	10,29	$\pm 0,96$	$\pm 1,80$
11	6,0	6,25	$\pm 0,46$	$\pm 1,59$
12	6,8	7,24	$\pm 0,36$	$\pm 1,57$
13	7,6	7,56	$\pm 0,35$	$\pm 1,56$
14	6,0	6,16	$\pm 0,46$	$\pm 1,59$
15	5,3	6,16	$\pm 0,57$	$\pm 1,63$
16	8,2	8,45	$\pm 0,39$	$\pm 1,57$
17	7,6	7,93	$\pm 0,35$	$\pm 1,56$
18	8,2	8,59	$\pm 0,39$	$\pm 1,57$
19	9,0	9,55	$\pm 0,50$	$\pm 1,60$
20	5,4	4,95	$\pm 0,55$	$\pm 1,62$

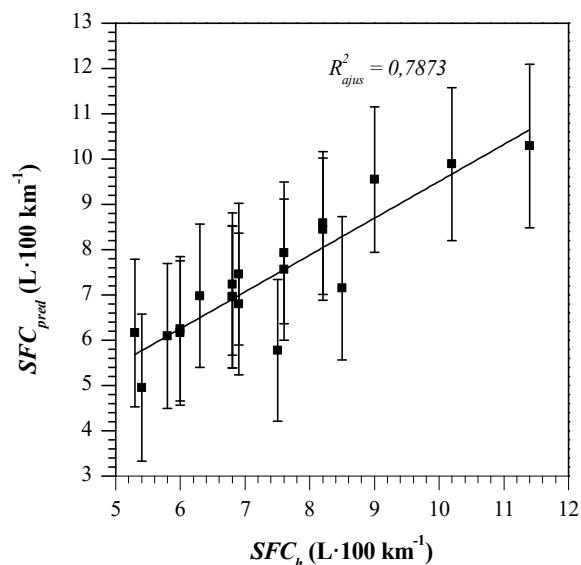


Figura 4-7 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción JC08.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción JC08 se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 80,96\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,8998$, con lo que se puede concluir que el 80,96% de los valores de SFC para el ciclo de conducción JC08 son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una mediana asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 36,15$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-7 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,8 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su potencia máxima y la capacidad del tanque, el SFC_{pred} para el JC08 se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,8 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-11.

Tabla 4-12 Valores de SFC_{pred} para el ciclo JC10-15 e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Vehículo	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
1	7,7	8,77	±0,53	±1,92
2	9,5	8,58	±0,44	±1,90
3	7,4	7,75	±0,59	±1,94
4	9,5	8,44	±0,44	±1,90
5	7,7	8,62	±0,53	±1,92
6	8,1	9,07	±0,47	±1,91
7	10,5	11,44	±0,58	±1,94
8	9,3	8,59	±0,42	±1,90
9	8,5	7,45	±0,43	±1,90
10	11,9	11,82	±0,88	±2,05
11	7,4	7,90	±0,59	±1,94
12	8,4	8,87	±0,44	±1,90
13	10,0	9,17	±0,49	±1,91
14	7,7	7,82	±0,53	±1,92
15	6,6	7,82	±0,75	±2,00
16	11,2	10,04	±0,72	±1,98
17	8,9	9,53	±0,41	±1,89
18	11,2	10,17	±0,72	±1,98
19	11,2	11,11	±0,72	±1,98
20	6,9	6,64	±0,69	±1,97

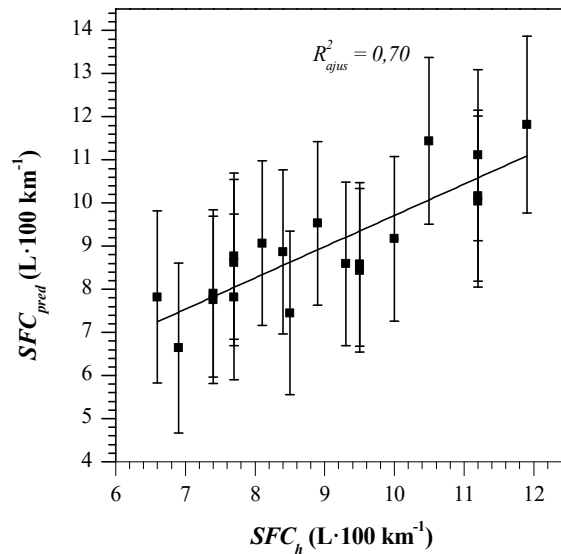


Figura 4-8 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para el ciclo de conducción JC10-15.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para cada vehículo de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo el ciclo de conducción JC10-15 se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 73,14\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,8552$, con lo que se puede concluir que el 73,14% de los valores de SFC para el ciclo de conducción JC10-15 son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una moderada asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 23,15$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-8 muestra la verificación del modelo.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 2,05 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$. Entonces, con una confianza del 95% se puede decir que para un vehículo determinado donde se conozca su potencia máxima y la capacidad del tanque, el SFC_{pre} para el JC10-15 se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 2,05 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores mostrados en la Tabla 4-12.

4.2 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE – SFC_{pred} A PARTIR DE LOS PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LOS CICLOS DE CONDUCCIÓN.

Con base en lo expuesto en el numeral 3.1 se desarrollaron 5 modelos para predecir el consumo específico de combustible – SFC_{pred} a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción. En la Tabla B-6-1 se mostró cada uno de los 42 parámetros con su correspondiente valor para los 8 ciclos de conducción de homologación, con el fin de facilitar e identificar un parámetro específico en el análisis de regresión lineal y posterior obtención del modelo de predicción a éstos les fue asignado un número, por lo que en este aparte se hace referencia al número de cada parámetro “Parámetro No.”.

Los modelos estimación de SFC que se desarrollaron a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción, predicen el valor medio estimado de consumo SFC_{pred} para grupos de vehículos que se clasificaron por su cilindrada. Se seleccionó la cilindrada de los vehículos como parámetro para clasificar la flota de vehículos porque en el análisis de regresión lineal de los parámetros

constructivos de los vehículos se encontró que este parámetro es el que mejor describe el SFC para la flota de vehículos bajo estudio, en la Tabla 4-13 se presentan los coeficientes de determinación R^2 por parámetro constructivo para cada variable de respuesta en este caso el consumo específico de combustible de cada ciclo de conducción, nótese que la cilindrada presenta el coeficiente de correlación más alto en comparación con los demás parámetros.

Tabla 4-13 Coeficientes de determinación R^2 de los parámetros constructivos de los vehículos para cada variable de respuesta.

Parámetro	Coeficiente de determinación R^2							
	SFC_{FTP-75}	SFC_{HWFET}	SFC_{UDDS}	SFC_{EDC}	SFC_{EUDC}	SFC_{NEDC}	SFC_{JC08}	$SFC_{JC10-15}$
Cilindrada	0,8327	0,6355	0,7619	0,6044	0,3814	0,6102	0,6541	0,5909
Cilindros	0,7704	0,5497	0,7261	0,5350	0,2423	0,4851	0,4849	0,5894
Aceleración (0 - 100)	0,2517	0,1342	0,2117	0,1069	0,0163	0,0923	0,1984	0,1603
Peso	0,6700	0,6036	0,6615	0,2151	0,1136	0,2437	0,5713	0,5678
C_d	0,0079	0,0051	0,0000	0,0747	0,0606	0,0674	0,0093	0,0018
f_r	0,0804	0,2828	0,1379	0,0065	0,0098	0,0014	0,3014	0,1911
Área frontal	0,2242	0,4494	0,3037	0,0180	0,0133	0,0374	0,4051	0,3194
Potencia máx.	0,6368	0,5300	0,5877	0,2407	0,0886	0,2569	0,5758	0,5201
No. Pasajeros	0,0652	0,0049	0,0364	0,0303	0,0062	0,0095	0,0590	0,0623
Capacidad Tanque	0,6465	0,5905	0,6387	0,3920	0,2348	0,4327	0,5472	0,5749

La flota de vehículos fue agrupada en cinco clases: hasta 1,6L; 1,7 L – 2,0 L; 2,1 L – 2,5 L; 2,6 L – 3,0 L; y desde 3,1 L en adelante. Para todas las clases se promedió el consumo específico combustible de la flota de vehículos obtenido en las bases de datos oficiales, en la Tabla 4-14 se presenta el valor medio de SFC_h de cada ciclo de conducción por grupo de vehículos de acuerdo a su cilindrada, estos valores son la variable de respuesta para obtener los modelos de predicción.

Tabla 4-14 Consumo específico promedio para cada uno de los ciclos de conducción SFC_h en $\frac{L}{100 km}$.

Ciclo de conducción	Cilindrada del vehículo (L)				
	hasta 1,6	1,7 - 2,0	2,1 - 2,5	2,6 - 3,0	3,1 en adelante
FTP-75	8,7	9,9	10,1	12,0	14,6
HWFET	7,0	7,5	7,7	8,2	10,3
UDDS	7,9	8,8	8,8	10,4	12,5
EDC	7,5	9,7	10,5	12,6	13,2
EUDC	5,0	5,9	6,7	6,5	6,6
NEDC	5,9	7,3	8,1	8,7	9,3
JC08	6,3	6,6	7,2	8,2	10,2
JC10-15	7,6	8,2	8,7	11,2	11,2

Cómo se tienen $k = 42$ parámetros predictores y $n = 8$ observaciones una por cada ciclo de conducción se empleó el algoritmo computacional desarrollado en *MATLAB* para reducir y encontrar el conjunto más pequeño de parámetros que ajusten los modelos de regresión de *SFC*, para ello se realizaron combinaciones sin repetición tomando conjuntos con $k = 1$ hasta $k = 6$ de parámetros descriptivos de los ciclos de conducción. En la Tabla 4-15 se muestra el número de combinaciones y grados de libertad para cada una de las combinaciones de parámetros, nótese que sólo se tienen grupos de hasta un máximo 6 parámetros descriptivos por lo tanto, el número mínimo de grados de libertad del error es $\nu = 1$.

Tabla 4-15 Grados de libertad y combinaciones de parámetros predictores

Conjunto de predictores k	Grados de libertad ν	Combinaciones
6	1	5245786
5	2	850668
4	3	111930
3	4	11480
2	5	111930
1	6	11480

Para todos los modelos de predicción de *SFC* se encontraron combinaciones de hasta 6 parámetros predictores que ajustan el modelo de regresión, para cumplir con las condiciones y consideraciones expuestas en 3.2.3.a), se eligieron sólo combinaciones de 5 parámetros de predicción. En la Tabla 4-16 se muestran los resultados del análisis realizado con el algoritmo de *MATLAB* para cada uno de los 5 grupos en los cuales se clasificaron los vehículos, puede observarse que cada una de las variables predictoras involucradas en los modelos de regresión son moderadamente independientes $3,86 \leq VIF \leq 1,40$ y significativas valores de $P \leq 0,029$ obteniéndose coeficientes de determinación ajustado $R_{ajus}^2 \geq 99,13\%$. Además, se encontró que el parámetro No. 19 “*Maximun speed*” está presente en los 5 modelos, seguido de los parámetros No. 1, 27, 30, 42 están presentes en 3 de los 5 modelos, mientras que los parámetros No. 21, 25, 31, y 35 sólo están presentes en 1 de los 5 modelos. En la Tabla 4-17 se muestran los predictores con los cuales se construyeron los modelos de predicción de *SFC* a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción.

Tabla 4-16 Análisis de los modelos para estimar el SFC a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción.

Cilindrada (L)	R^2_{ajus}	Valor de P P_value						VIF					Parámetro No.				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	
Hasta 1,6	99,57%	0,001	0,002	0,001	0,003	0,018	0,010	2,74	2,14	3,78	3,86	2,20	6	19	25	27	42
1,7 - 2,0	97,90%	0,005	0,005	0,003	0,012	0,019	0,010	2,54	2,33	2,62	1,40	2,48	6	19	30	31	34
2,1 - 2,5	99,57%	0,001	0,002	0,002	0,001	0,026	0,018	1,74	1,63	1,59	1,75	2,03	1	19	21	27	30
2,6 - 3,0	99,13%	0,004	0,013	0,003	0,006	0,029	0,007	2,82	1,67	2,18	3,20	2,27	1	19	27	35	42
3,1 en adelante	99,68%	0,001	0,002	0,001	0,027	0,008	0,002	1,61	1,55	2,31	2,44	1,66	1	19	30	34	42

Tabla 4-17 Parámetros descriptivos de los ciclos de conducción empleados en los modelos de predicción de SFC_{pred} .

No.	Parámetro	Unidad	FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
1	Distancia total ($dist$)	km	17,77	16,51	11,99	3,98	6,96	10,93	8,16	6,34
6	Tiempo en crucero (T_{cruise})	s	293	326	212	227	214	442	99	185
19	Velocidad máxima	km·h ⁻¹	91	96	91	50	120	120	82	70
21	Aceleración media positiva (a_{pos_av})	m·s ⁻²	0,511	0,194	0,505	0,642	0,378	0,541	0,417	0,525
25	Aceleración: 75° – 25° percentil	m·s ⁻²	0,402	0,224	0,402	0	0,222	0	0,401	0,25
27	Aceleraciones por kilómetro recorrido (acc_{rate})	km ⁻¹	5,68	2,3	6,26	3,02	1,01	1,74	7,72	2,68
30	Duración media de parada (\bar{T}_{stop})	s	17,7	5	16,1	20,1	0,1	21,6	34,7	35,4
31	Distancia media entre paradas	km	0,94	16,51	0,8	0,33	0,04	0,84	0,82	0,79
34	Velocidad relativa positiva	-	0,419	0,301	0,426	0,257	0,296	0,282	0,471	0,391
35	Velocidad real relativa	-	0,821	0,993	0,823	0,691	0,898	0,762	0,712	0,682
42	Raíz media cuadrática de la aceleración	m·s ⁻²	0,631	0,299	0,625	0,448	0,377	0,425	0,458	0,421

Las ecuaciones (4-9) a la (4-13) representan la forma del modelo de regresión lineal múltiple ajustado para estimar el consumo específico de combustible – SFC_{pred} en $\frac{L}{100 \text{ km}}$ que podría llegarse a obtener si el vehículo fuese testeado bajo un ciclo de conducción específico donde se conozcan sus parámetros descriptivos.

$$SFC_{pred; hasta\ 1,6\ L} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (6) + \beta_2 \cdot (19) + \beta_3 \cdot (25) + \beta_4 \cdot (27) + \beta_5 \cdot (42) \quad (4-9)$$

$$SFC_{pred; 1,7\ L-2,0\ L} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (6) + \beta_2 \cdot (19) + \beta_3 \cdot (30) + \beta_4 \cdot (31) + \beta_5 \cdot (34) \quad (4-10)$$

$$SFC_{pred;2,1 L-2,5 L} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1) + \beta_2 \cdot (19) + \beta_3 \cdot (21) + \beta_4 \cdot (27) + \beta_5 \cdot (30) \quad (4-11)$$

$$SFC_{pred;2,6 L-3,0 L} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1) + \beta_2 \cdot (19) + \beta_3 \cdot (27) + \beta_4 \cdot (35) + \beta_5 \cdot (42) \quad (4-12)$$

$$SFC_{pred;desde 3,1 L} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1) + \beta_2 \cdot (19) + \beta_3 \cdot (30) + \beta_4 \cdot (34) + \beta_5 \cdot (42) \quad (4-13)$$

donde,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$: son cada uno de los coeficientes asociados a los predictores del SFC_{pred} para las categorías de vehículos. La Tabla 4-18 muestra los valores obtenidos.

(k): representa el número del parámetro descriptivo que tiene significancia y aporta en el modelo (ver Tabla 4-17).

Tabla 4-18 Coeficientes β_i para los modelos de estimación de SFC obtenidos a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción.

Coeficiente	Cilindrada del vehículo				
	Hasta 1,6 L	1,7 L – 2,0 L	2,1 L – 2,5 L	2,6 L – 3,0 L	3,1 L en adelante
β_0	6,869	8,392	7,663	16,818	12,247
β_1	0,010	0,017	2,E-04	2,E-04	3,E-04
β_2	-0,055	-0,089	-0,044	-0,076	-0,077
β_3	6,400	-0,090	8,009	-0,568	0,040
β_4	-0,178	0,000	-0,109	-7,197	-11,315
β_5	3,904	15,402	-0,027	11,677	12,768

Desde la Tabla 4-19 a la Tabla 4-23 se muestran los datos de SFC_{pred} , derivados a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción, en estas tablas, también se muestra el intervalo de confianza con una probabilidad del 95 %.

Con el fin de determinar la confiabilidad de cada uno de los modelos de predicción y tener seguridad que los valores estimados son realmente buenos, para cada uno de los modelos se calculó el coeficiente de determinación, el coeficiente de correlación, el intervalo de confianza del valor medio de SFC para un 95%, y el intervalo de predicción para cada valor particular de SFC de cada ciclo de conducción en cada uno de los rangos de cilindrada con una confianza del 95%.

Dado que los modelos presentan más de una variable independiente, la significancia de cada uno de ellos se obtuvo mediante la prueba F, bajo los siguientes criterios: $F_{cal} > F_{crit}$, con un valor de

$\alpha = 0,01$, con un grado de libertad en el numerador y con 2 grados de libertad en el denominador se tiene un $F_{crit} = 9,93$.

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo un ciclo de conducción y cuya cilindrada sea hasta 1,6 L se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 99,87\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9993$, con lo que se puede concluir que el 99,87% de los valores de SFC de vehículos cuya cilindrada es hasta 1,6 L son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una muy alta asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 299,01$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-9 muestra la verificación del modelo puede observarse que el modelo se ajusta adecuadamente al conjunto de datos en el que se basa y sus predicciones se comparan directamente con las observaciones originales.

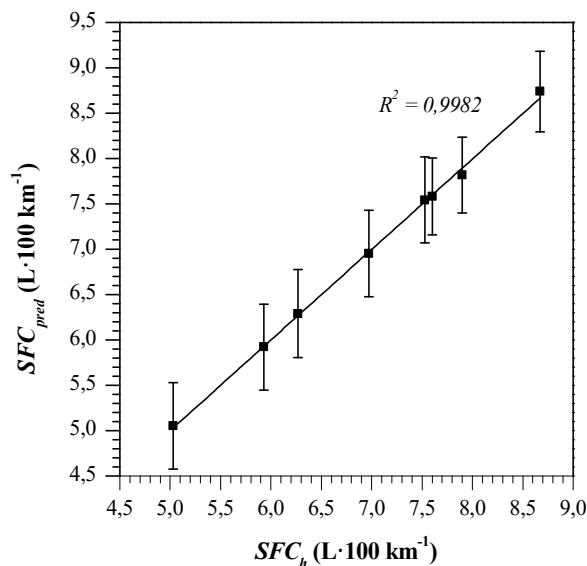


Figura 4-9 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos hasta 1,6 L de cilindrada.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para vehículos con cilindrada hasta 1,6 L de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 0,49 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$, con una confianza del 95% se puede decir que para un ciclo de conducción específico donde se conozca el tiempo en crucero, la velocidad máxima, la aceleración entre el 75 – 25 percentil, el número de aceleraciones por km

recorrido y la raíz cuadrática media de la aceleración, el pronóstico de SFC_{pred} para vehículos cuya cilindrada no supere 1,6 L se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 0,49 \left(\frac{L}{100 \text{ km}}\right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores indicados en la Tabla 4-19.

Tabla 4-19 Valores de SFC_{pred} para vehículos hasta 1,6 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Ciclo de conducción	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error	%Error	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	8,67	8,74	-0,07	0,79%	$\pm 0,28$	$\pm 0,45$
HWFET	6,97	6,95	0,02	0,25%	$\pm 0,32$	$\pm 0,47$
UDDS	7,90	7,82	0,08	1,04%	$\pm 0,23$	$\pm 0,42$
EDC	7,53	7,54	-0,01	0,17%	$\pm 0,32$	$\pm 0,47$
EUDC	5,03	5,05	-0,02	0,45%	$\pm 0,33$	$\pm 0,48$
NEDC	5,93	5,92	0,01	0,14%	$\pm 0,32$	$\pm 0,48$
JC08	6,27	6,29	-0,02	0,33%	$\pm 0,34$	$\pm 0,49$
JC10-15	7,60	7,58	0,02	0,23%	$\pm 0,25$	$\pm 0,43$

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo un ciclo de conducción y cuya cilindrada este entre 1,7 L – 2,0 L se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 99,14\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9957$, con lo que se puede concluir que el 99,14% de los valores de SFC de vehículos cuya cilindrada se encuentre entre 1,7 L – 2,0 L son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una muy alta asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 47,23$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-10 muestra la verificación del modelo puede observarse que el modelo se ajusta adecuadamente al conjunto de datos en el que se basa y sus predicciones se comparan directamente con las observaciones originales.

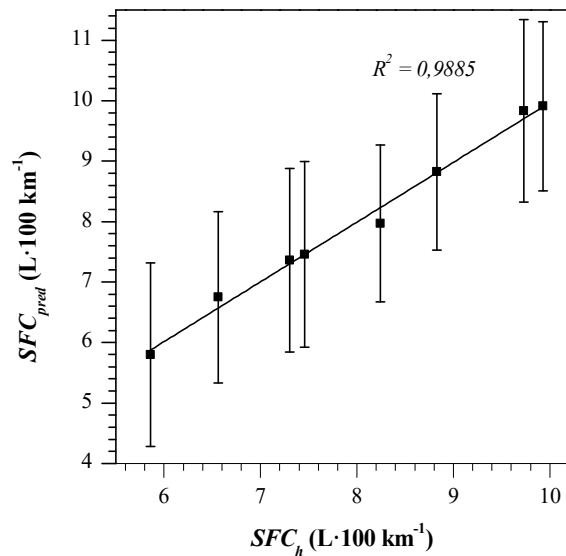


Figura 4-10 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 1,7 L – 2,0 L de cilindrada.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para vehículos con cilindrada entre 1,7 L – 2,0 L de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,54 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$, con una confianza del 95% se puede decir que para un ciclo de conducción específico donde se conozca el tiempo en crucero, la velocidad máxima, el tiempo medio en detención, la distancia media entre paradas y velocidad relativa positiva, el pronóstico de SFC_{pred} para vehículos cuya cilindrada oscile entre 1,7 L – 2,0 L se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,54 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores indicados en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20 Valores de SFC_{pred} para vehículos desde 1,7 L – 2,0 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Ciclo de conducción	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error	%Error	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	9,93	9,91	0,02	0,19%	$\pm 0,88$	$\pm 1,40$
HWFET	7,46	7,46	0,00	0,00%	$\pm 1,09$	$\pm 1,54$
UDDS	8,83	8,82	0,01	0,06%	$\pm 0,70$	$\pm 1,29$
EDC	9,73	9,83	-0,10	1,01%	$\pm 1,04$	$\pm 1,51$
EUDC	5,86	5,80	0,06	1,02%	$\pm 1,06$	$\pm 1,52$
NEDC	7,30	7,36	-0,06	0,86%	$\pm 1,06$	$\pm 1,52$
JC08	6,56	6,75	-0,19	2,84%	$\pm 0,90$	$\pm 1,41$
JC10-15	8,24	7,97	0,27	3,40%	$\pm 0,71$	$\pm 1,30$

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo un ciclo de conducción y cuya cilindrada este entre 2,1 L – 2,5 L se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 99,87\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9993$, con lo que se puede concluir que el 99,87% de los valores de SFC de vehículos cuya cilindrada se encuentre entre 2,0 L – 2,5 L son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una muy alta asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 300,53$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-11 muestra la verificación del modelo puede observarse que el modelo se ajusta adecuadamente al conjunto de datos en el que se basa y sus predicciones se comparan directamente con las observaciones originales.

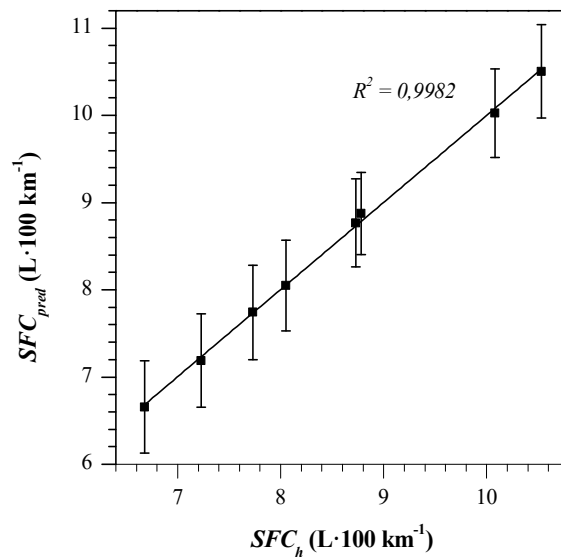


Figura 4-11 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 2,1 L – 2,5 L de cilindrada.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para vehículos con cilindrada entre 2,1 L – 2,5 L de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 0,54 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$, con una confianza del 95% se puede decir que para un ciclo de conducción específico donde se conozca la distancia total, la velocidad máxima, la aceleración media positiva, el número de aceleraciones por kilómetro recorrido y el tiempo medio en detención, el pronóstico de SFC_{pred} para vehículos cuya cilindrada

oscile entre 2,1 L – 2,5 L se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 0,54 \left(\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores indicados en la Tabla 4-21.

Tabla 4-21 Valores de SFC_{pred} para vehículos desde 2,1 L – 2,5 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Ciclo de conducción	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error	%Error	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	10,08	10,03	0,05	0,55%	$\pm 0,32$	$\pm 0,51$
HWFET	7,73	7,74	-0,01	0,15%	$\pm 0,38$	$\pm 0,54$
UDDS	8,78	8,88	-0,10	1,08%	$\pm 0,26$	$\pm 0,47$
EDC	10,53	10,51	0,02	0,24%	$\pm 0,36$	$\pm 0,53$
EUDC	6,68	6,66	0,02	0,35%	$\pm 0,35$	$\pm 0,53$
NEDC	8,05	8,05	0,00	0,00%	$\pm 0,34$	$\pm 0,52$
JC08	7,23	7,19	0,04	0,57%	$\pm 0,36$	$\pm 0,54$
JC10-15	8,73	8,77	-0,04	0,42%	$\pm 0,32$	$\pm 0,50$

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo un ciclo de conducción y cuya cilindrada este entre 2,6 L – 3,0 L se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 99,77\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9988$, con lo que se puede concluir que el 99,77% de los valores de SFC de vehículos cuya cilindrada se encuentre entre 2,6 L – 3,0 L son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una muy alta asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 170,35$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-12 muestra la verificación del modelo puede observarse que el modelo se ajusta adecuadamente al conjunto de datos en el que se basa y sus predicciones se comparan directamente con las observaciones originales.

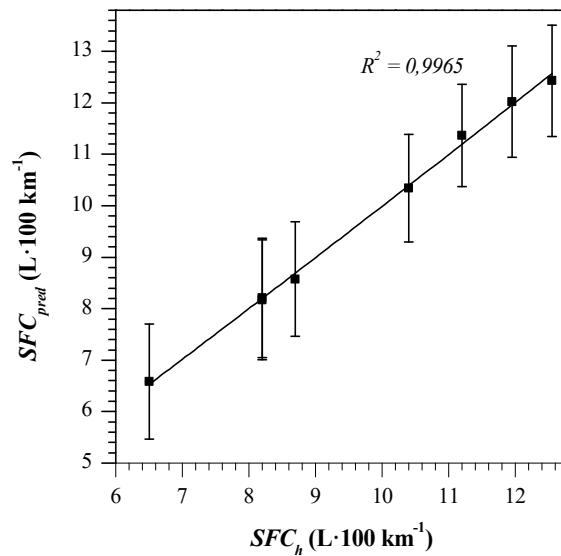


Figura 4-12 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos desde 2,6 L – 3,0 L de cilindrada.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para vehículos con cilindrada entre 2,6 L – 3,0 L de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 1,16 \left(\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right)$, con una confianza del 95% se puede decir que para un ciclo de conducción específico donde se conozca la distancia total, la velocidad máxima, el número de aceleraciones por kilómetro recorrido, la velocidad relativa real y la raíz cuadrática media de la aceleración, el pronóstico de SFC_{pred} para vehículos cuya cilindrada oscile entre 2,6 L – 3,0 L se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 1,16 \left(\frac{\text{L}}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores indicados en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22 Valores de SFC_{pred} para vehículos desde 2,6 L – 3,0 L de cilindrada e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Ciclo de conducción	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error	%Error	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	11,95	12,02	-0,07	0,60%	$\pm 0,69$	$\pm 1,08$
HWFET	8,20	8,17	0,03	0,35%	$\pm 0,81$	$\pm 1,16$
UDDS	10,40	10,34	0,06	0,55%	$\pm 0,64$	$\pm 1,05$
EDC	12,55	12,43	0,12	0,97%	$\pm 0,70$	$\pm 1,08$
EUDC	6,50	6,58	-0,08	1,24%	$\pm 0,75$	$\pm 1,12$
NEDC	8,70	8,58	0,12	1,44%	$\pm 0,74$	$\pm 1,11$
JC08	8,20	8,21	-0,01	0,09%	$\pm 0,81$	$\pm 1,16$
JC10-15	11,20	11,37	-0,17	1,48%	$\pm 0,55$	$\pm 0,99$

Para el modelo de predicción del consumo específico de combustible que se podría llegar a obtener probando la flota de vehículos bajo un ciclo de conducción y cuya cilindrada sea desde 3,1 L en adelante se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 99,93\%$, un coeficiente de correlación múltiple $R = 0,9996$, con lo que se puede concluir que el 99,93% de los valores de SFC de vehículos cuya cilindrada se encuentre desde 3,1 L son explicados por medio del modelo de regresión encontrado, con una muy alta asociación lineal positiva entre las variables. El $F_{calc} = 566,99$ valor que es mucho mayor al F_{crit} , y se puede asegurar que a un nivel de significancia de 0,01, ninguno de los $\beta_i = 0$. La Figura 4-13 muestra la verificación del modelo puede observarse que el modelo se ajusta adecuadamente al conjunto de datos en el que se basa y sus predicciones se comparan directamente con las observaciones originales.

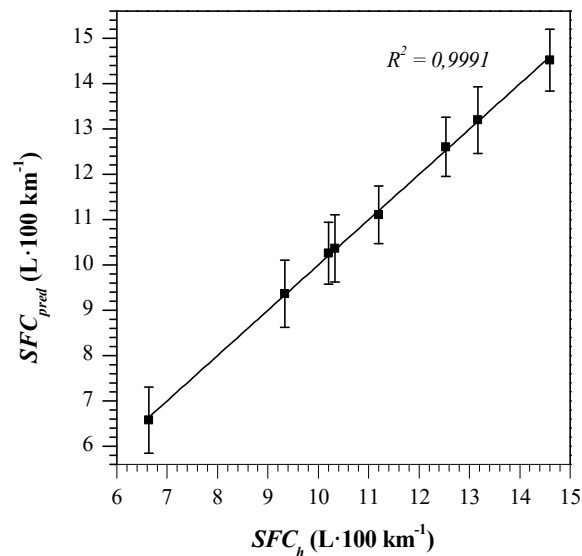


Figura 4-13 Verificación del modelo de predicción de SFC_{pred} para vehículos con cilindrada desde 3,1 L en adelante.

Nota: un punto representa el valor medio de SFC_{pred} pronosticado y el SFC_h de homologación para vehículos con cilindrada desde 3,1 L en adelante de la flota bajo estudio, se muestran intervalos de predicción con una confianza del 95%.

Se encontró un intervalo de predicción máximo de $\pm 0,74 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$, con una confianza del 95% se puede decir que para un ciclo de conducción específico donde se conozca la distancia total, la velocidad máxima, el tiempo medio en detención, la velocidad relativa positiva y la raíz cuadrática media de la aceleración, el pronóstico de SFC_{pred} para vehículos cuya cilindrada oscile entre 2,6

L – 3,0 L se encontrará dentro de un intervalo de $\pm 0,74 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)$ del valor estimado, esto se puede evidenciar observando los valores indicados en la Tabla 4-23.

Tabla 4-23 Valores de SFC_{pred} para vehículos con cilindrada desde 3,1 L en adelante e intervalo de predicción para un 95% de confianza.

Ciclo de conducción	SFC (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error	%Error	Intervalo de confianza del 95%	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	14,60	14,52	0,08	0,55%	$\pm 0,43$	$\pm 0,68$
HWFET	10,33	10,36	-0,03	0,30%	$\pm 0,52$	$\pm 0,74$
UDDS	12,53	12,60	-0,07	0,58%	$\pm 0,38$	$\pm 0,65$
EDC	13,17	13,20	-0,03	0,20%	$\pm 0,51$	$\pm 0,74$
EUDC	6,63	6,58	0,05	0,82%	$\pm 0,50$	$\pm 0,73$
NEDC	9,33	9,37	-0,04	0,39%	$\pm 0,52$	$\pm 0,74$
JC08	10,20	10,26	-0,06	0,59%	$\pm 0,43$	$\pm 0,68$
JC10-15	11,20	11,11	0,09	0,86%	$\pm 0,36$	$\pm 0,64$

4.3 Resultados de las pruebas de laboratorio.

Con el fin de corroborar los resultados de al menos uno de los modelos de predicción de consumo específico de combustible SFC_{pred} se realizaron pruebas dinámicas para medición de consumo específico de combustible en el dinamómetro de chasis del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices – LPDA perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Se realizaron pruebas para comprobar el modelo de predicción de consumo $SFC_{pred; hast 1,6 L}$ mostrado en la ecuación (4-9). Las pruebas de consumo se realizaron a un vehículo liviano de pasajeros categoría LDV. En la Tabla 4-24 se muestran los parámetros constructivos del vehículo, estos parámetros constructivos fueron obtenidos de [71], [72], en la Tabla 4-25 se muestran los valores oficiales de rendimiento de combustible para homologación, valores obtenidos de [69], [70].

Tabla 4-24 Parámetros constructivos del vehículo bajo prueba.

Vehículo	Cilindrada (L)	No. Cilindros	Aceleración (0 - 100) (s)	Masa (kg)	C_d	f_r	Área frontal (m ²)	Potencia máx. (kW)	No. Pasajeros	Capacidad Tanque (L)
Chevrolet AVEO	1,598	4	12,04	1155	0,33	0,7	2,14	77	5	45

Tabla 4-25 Rendimiento de combustible (FE) del vehículo bajo prueba, valores oficiales obtenidos de las bases de datos para varios ciclos de conducción de homologación.

Vehículo		Rendimiento FE_h ($\text{km}\cdot\text{L}^{-1}$)							
		FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
Chevrolet	AVEO	11,5	14,9	12,8	10,3	15,8	13,2	-	-

Para la comprobación del modelo de SFC el vehículo se ensayó en tres ciclos de conducción diferentes, dos ciclos de homologación como lo son el FTP-75 y el WLTC, y un ciclo experimental AMCO M12 que fue desarrollado para representar la conducción en el Área Metropolitana Centro Occidente por el grupo de investigación GENERGÉTICA perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. En la Tabla 4-26 se muestran los valores de los parámetros que describen los ciclos de conducción empleados como predictores en el modelo de estimación de SFC_{pred} para la categoría de vehículos hasta 1,6 L.

Tabla 4-26 Parámetros que describen los ciclos de conducción empleados en el modelo de SFC_{pred} hasta 1,6 L de cilindrada.

Ciclo de conducción	Tiempo en cruce (s)	Velocidad máxima ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	Aceleración: 75° – 25° percentil ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Aceleraciones por kilómetro (km^{-1})	Raíz media cuadrática de la aceleración ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
FTP-75	293	91,00	0,402	5,680	0,631
AMCO M12	150	70,52	0,413	10,12	0,674
WLTC, class 3a	254	131,30	0,417	2,59	0,500

La Tabla 4-27 muestra los valores medios de la predicción de consumo específico de combustible SFC_{pred} , rendimiento FE_{pred} , y sus respectivos intervalos de predicción con una confianza del 95%, resultados que se obtienen al aplicar el modelo descrito en la ecuación (4-9).

Tabla 4-27 Consumo específico de combustible predecido por el modelo de SFC_{pred} ; hasta 1,6 L, para los ciclos en los cuales se ensayó el vehículo

Ciclo de conducción	SFC_{pred} ($\text{L}/100 \text{ km}$)	Rendimiento FE_{pred} ($\text{km}\cdot\text{L}^{-1}$)	IP de 95% SFC_{pred} ($\text{L}/100 \text{ km}$)	IP de 95% FE_{pred} ($\text{km}\cdot\text{L}^{-1}$)
FTP-75	8,7	11,4	0,5	0,6
AMCO M12	7,9	12,6	0,5	0,9
WLTC, class 3a	6,3	16,0	0,5	1,3

El combustible empleado fue E10 (mezcla de 10% de alcohol y 90% de gasolina) con un octanaje de 87 octanos aproximadamente, es de aclarar que el valor de octanaje no fue medido se toma el valor de referencia para Colombia puesto que el combustible empleado fue adquirido en una estación de servicio, los ensayos se realizaron a temperatura ambiente $T = 23,8 \text{ °C} \pm 3,8 \text{ °C}$, para la medición del rendimiento de combustible FE se siguió método gravimétrico desarrollado y validado por el Laboratorio de pruebas dinámicas automotrices – LPDA de la Universidad Tecnológica de Pereira en un proyecto de investigación conjunto con el Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM, también se siguieron las recomendaciones para la aplicación del WLTC class 3a dadas en el documento normativo ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2013/13.

En la Tabla 4-28 se muestran los resultados de la medición del rendimiento de combustible en las pruebas de laboratorio, igualmente, se reporta el error relativo entre el valor de la predicción y el valor medido en el laboratorio.

Tabla 4-28 Rendimiento de combustible FE_{medido} obtenido en las pruebas de laboratorio.

Item	FE_{WLTC} (km/L)	FE_{FTP75} (km/L)	$FE_{AMCO:M12}$ (km/L)
Rendimiento medido $F. E_{medido}$	15,41	13,50	13,55
Intervalo de confianza 95%	15,19 - 15,63	13,14 - 13,85	13,29 - 13,80
Rendimiento predecido $F. E_{pred}$	15,9	11,4	12,7
Error relativo	3,4%	15,2%	6,6%

La Figura 4-14 muestra la comparación entre los valores de rendimiento de combustible arrojados por el modelo de predicción y el rendimiento de combustible medido en el laboratorio, se puede observar que para el ciclo FTP-75 la desviación entre el FE_{pred} y el FE_{medido} es mucho más alta comparándola con los otros dos ciclos el AMCO M12 y e WLTC; class 3a, de la Tabla 4-28 se observa que esta desviación es del orden del 15,2% ($2,1 \text{ km} \cdot \text{L}^{-1}$), mientras que para el AMCO M12 se obtuvo una desviación el 6,6% y para el WLTC; class 3a se encontró una desviación del 3,4% con lo que se puede confirmar que el modelo de $SFC_{pred; hasta 1,6 L}$ entrega predicciones confiables.

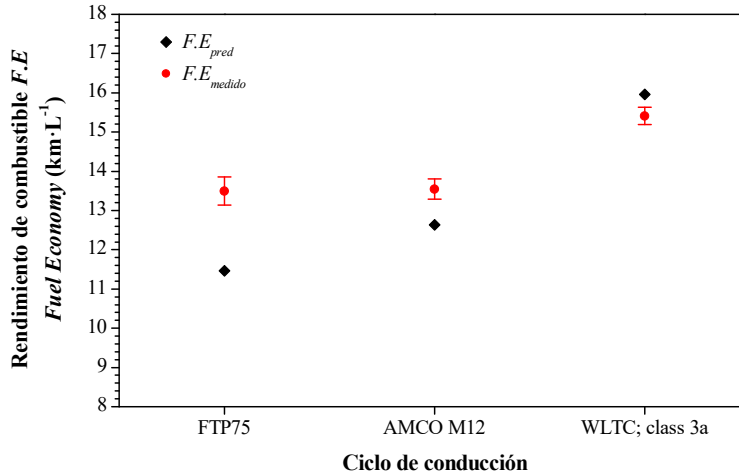


Figura 4-14 Comparativo de los valores obtenidos de rendimiento FE_{medido} y FE_{pred}

A pesar de que para el FTP-75 la desviación sea del 15,2% y aparenta ser muy alta, en la realidad sigue siendo buena, si se compara el valor de rendimiento oficial FE_h para este ciclo de conducción el cual esta reportado en la Tabla 4-25, se observa que $FE_h = 11,4 \text{ km}\cdot\text{L}^{-1}$ y el $FE_{pred} = 11,5 \text{ km}\cdot\text{L}^{-1}$ obteniéndose una desviación tan sólo de $0,1 \text{ km}\cdot\text{L}^{-1}$, aproximadamente un error relativo de 0,5% con respecto al dato oficial de homologación lo que muestra la buena precisión del modelo.

La desviación entre el rendimiento de combustible medido y el rendimiento de combustible predicho por el modelo para ciclo FTP-75 y en general para los demás ciclos se puede atribuir a varios factores considerados por Fontaras *et al.* [35]: las pruebas para medir consumo específico de combustible en el laboratorio son repetibles, pero entre los valores de varios ensayos realizados al mismo vehículo, en el mismo laboratorio y bajo las mismas condiciones controladas pueden observarse desviaciones hasta de un 15% debido a las flexibilidades del protocolo de prueba, donde, un 6% se origina a partir de los ajustes realizados al vehículo de certificación en comparación con los vehículos de producción, se debe resaltar que el vehículo empleado en las pruebas fue un vehículo de línea de producción y no fue ajustado para pruebas de certificación, otro 5% se puede atribuir al diseño del método de medición y sus límites previstos, y finalmente, un 4% es la tolerancia de homologación fija permitida. Por otro lado, la calidad de combustible que se emplea en las pruebas de homologación no es la misma que se empleó en las pruebas de laboratorio. Finalmente, considerando lo anteriormente expuesto y habiendo realizando la comparación de los resultados experimentales con los pronosticados por el modelo se puede decir

que el modelo de SFC_{pred} explicado por la ecuación (4-9) es un modelo ajustado que permite predecir el consumo específico de combustible de manera confiable y precisa.

Para el chevrolet AVEO utilizado en las pruebas dinámicas en la Tabla 4-29 y en la Figura 2-1 se muestran los resultados de la predicción de consumo específico de combustible empleando los modelos construidos a partir de los parámetros constructivos de los vehículos ecuaciones (4-1) a (4-6), se comparan con el consumo específico de combustible reportado en las pruebas de homologación con el valor de la predicción, igualmente, se reporta el error relativo entre el valor de la predicción y el intervalo de predicción con una confianza del 95%.

Tabla 4-29 Consumo específico de combustible SFC_{pred} obtenido con el modelos (4-1) al (4-6).

Ciclo de conducción	SFC_h (L/100 km)	SFC_{pred} (L/100 km)	Error relativo %	Intervalo de predicción del 95%
FTP-75	8,7	8,5	2,9%	1,5
HWFET	6,7	6,6	1,1%	0,7
UDDS	7,8	7,7	1,7%	1,5
EDC	7,9	8,1	2,8%	1,8
EUDC	4,7	5,4	12,3%	1,2
NEDC	5,9	6,4	7,1%	1,1

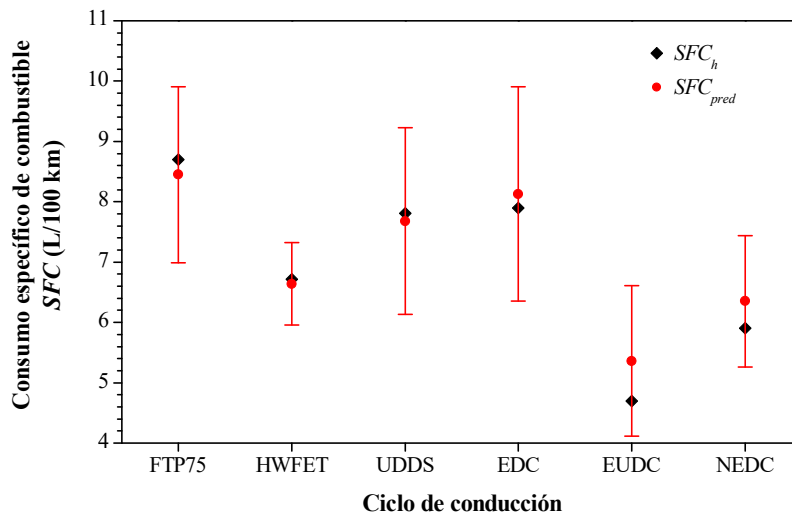


Figura 4-15 Comparativo SFC_h con SFC_{pred} obtenido a partir de parámetros constructivos de los vehículos

En la Figura 4-15 un punto representa el valor medio de SFC_{pred} y el SFC_h de homologación para el chevrolet AVEO, empleando en las pruebas dinámicas de medición de consumo de combustible

los ciclos de conducción FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC y NEDC, se puede observar que el consumo específico de combustible predicho por los modelos (4-1) a (4-6) se encuentran dentro del intervalo de predicción con una confianza del 95%. Habiendo realizando la comparación de los resultados de homologación con los pronosticados por los modelos se puede decir que el modelo de SFC_{pred} explicado por las ecuaciones (4-1) a (4-6) son modelos ajustados que permiten predecir el consumo específico de combustible de manera confiable y precisa.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es posible obtener modelos estadísticos ajustados y precisos mediante regresión lineal múltiple para estimar el consumo específico de combustible utilizando los parámetros que se emplean para describir los ciclos de conducción con un error relativo medio del 15,2%. Pese a que el error relativo medio de la estimación parece ser bastante alto, los resultados arrojados por el modelo de predicción resultan ser confiables, puesto que se encontraron diferencias del orden de $2,1 \text{ km}\cdot\text{L}^{-1}$ con respecto a los valores declarados en las pruebas para homologación, además, se debe tener en cuenta que los valores de consumo reales de operación de un vehículo tienen una diferencia entre el 40% - 60% con respecto a los valores obtenidos en las pruebas de homologación.
- Los modelos de predicción construidos a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción no sólo son aplicables a ciclos de conducción como lo son el FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC, NEDC, JC08 y JC10-15 sino que también pueden ser aplicados otros ciclos de conducción ya sean típicos o representativos de una región en particular o experimentales tal como se pudo comprobar en las pruebas dinámicas realizadas al Chevrolet AVEO donde se emplearon los ciclos de conducción $\text{WLTC}_{\text{class},3\text{a}}$ obteniéndose una diferencia del 3,4% en el valor medido con respecto al valor de la predicción y el AMCO M12 el cual obtuvo una diferencia del 6,6%, se debe tener en cuenta al emplear los modelos que el ciclo de conducción debe ser transitorio y se debe limitar a vehículos livianos que utilizan combustible gasolina.
- Se establecieron 8 modelos de predicción de consumo específico de combustible a partir de parámetros constructivos de los vehículos los cuales permiten realizar la estimación de manera precisa y ajustada si se conocen parámetros como la cilindrada del vehículo, la potencia máxima, el número de pasajeros, el área frontal, la capacidad del tanque, el número de cilindros y el coeficiente de rodadura.
- Se encontró que parámetros como la cilindrada del vehículo, la potencia máxima, y el número de pasajeros tienen influencia en el consumo específico de combustible de un vehículo en las pruebas de homologación, a diferencia de los modelos de predicción de

consumo propuestos por L. Ntziachristos *et al.* [68], donde encontró que los parámetros de influencia en el consumo específico de combustible real de un vehículo son la masa y la capacidad (número de pasajeros).

- Con los resultados de este trabajo se propone una metodología que permitió desarrollar 5 modelos de estimación de consumo de combustible a partir de los parámetros que describen los ciclos de conducción lo cual no ha sido explorado por otras investigaciones.
- Con el desarrollo de los modelos de predicción a partir de parámetros que describen los ciclos de conducción, es posible estimar de manera confiable el consumo específico de combustible o el rendimiento de un vehículo para un ciclo de conducción en particular, sin necesidad de realizar pruebas en el laboratorio.
- Los resultados de este trabajo abren el panorama para seguir explorando los modelos de predicción de consumo específico de combustible, a futuro se pueden incluir más parámetros que afectan el consumo específico de combustible en los automóviles como lo son la altitud, las condiciones climáticas y meteorológicas, el uso de equipos auxiliares como lo son la calefacción y el aire acondicionado, el sistema de entretenimiento, entre otras. Por otro lado, se debe de ampliar el tamaño y la diversidad de la flota bajo estudio vehículos de otras categorías, tecnologías y que operen con otros tipos de combustible ya que en este trabajo sólo se utilizaron 20 vehículos livianos a gasolina, lo que mejoraría la precisión y ampliaría el espectro de predicción.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Greenpeace, “Cambio Climático | Greenpeace Colombia,” 2010. [Online]. Available: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/cambio-climatico/>.
- [2] Naciones Unidas and Conferencia de las Partes 21er período de sesiones, Convención Marco sobre el Cambio Climático - Acuerdo COP21. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>, 2015, p. 40.
- [3] MINAMBIENTE, “Colombia se compromete a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030,” 2015. [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1913-colombia-se-compromete-a-reducir-el-20-de-sus-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-para-el-ano-2030>.
- [4] R. Weisbrod, “The Geography of Transport Systems,” *Journal of Urban Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 99–101, 2011.
- [5] UPME (Unidad de Planeación Minero Energética/Ministerio de Minas y Energía), “CADENA DEL PETRÓLEO 2013,” 2013.
- [6] C. García Arbeláez, X. Barrera, R. Gómez, and R. Suárez Castaño, “EL ABC DE LOS COMPROMISOS DE COLOMBIA PARA LA COP21.” *WWW-Colombia*, Bogota D.C, p. 32, 2015.
- [7] O. F. Prias Caicedo and (Ministerio de Minas y Energía - MINMINAS), “Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales – PROURE Plan de acción al 2015 con visión al 2025,” 2010.
- [8] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial de Colombia, “Resolución 910 de 2008.” Bogota D.C, p. 33, 2008.
- [9] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial de Colombia, “Decreto 948 de 1995.” Santafé de Bogotá, p. 57, 1995.
- [10] H. Steven, “Homologation test cycles worldwide - Status of the WLTP,” in *Green Global NCAP labelling / green scoring Workshop*, 2013, pp. 1–35.
- [11] M. Osses and D. Rojas, “Determinación experimental de ciclos de conducción de vehículos livianos para la ciudad de Santiago,” pp. 55–66.

- [12] S. H. Kamble, T. V. Mathew, and G. K. Sharma, "Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14, no. 2, pp. 132–140, 2009.
- [13] P. Seers, G. Nachin, and M. Glaus, "Development of two driving cycles for utility vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 41, pp. 377–385, Dec. 2015.
- [14] O. US EPA, OAR, "Dynamometer Drive Schedules." [Online]. Available: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>. [Accessed: 20-Nov-2017].
- [15] G. O. Duarte, G. A. Gonçalves, P. C. Baptista, and T. L. Farias, "Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption - A Vehicle Specific Power approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 251–265, 2015.
- [16] A. Hurtado Gómez, "DESARROLLO DE CICLOS DE CONDUCCION PARA EL ÁREA METROPOLITANA CENTRO OCCIDENTE – AMCO." 2014.
- [17] L. C. Belalcazar, H. Acevedo, M. Ossess, and N. Rojas, "Development of Bogota ´ S Driving Cycles," pp. 96–101, 2012.
- [18] 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, no. January, pp. 212–222, 2017.
- [19] G. Mellios et al., *Parameterisation of fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes*. 2011.
- [20] EEA, "COPERT 4 — Estimating emissions from road transport — European Environment Agency," 2011. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/copert-4-2014-estimating-emissions>. [Accessed: 22-Jul-2018].
- [21] E. Ericsson, "Independent driving pattern factors and their influence on fuel use and exhaust emission factors," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 6, no. 5, pp. 325–345, 2001.
- [22] S. Kumar Pathak, V. Sood, Y. Singh, and S. A. Channiwala, "Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 44, pp. 157–176, May 2016.

- [23] 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, Jan. 2016.
- [24] H. Y. Tong, H. D. Tung, W. T. Hung, and H. V. Nguyen, “Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam,” *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 29, pp. 5191–5199, 2011.
- [25] M. André, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, and P. Perret, “Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars,” *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 31, pp. 5944–5953, 2006.
- [26] 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, no. 2, pp. 115–128, 2007.
- [27] J. Liu, X. Wang, and A. Khattak, “Customizing driving cycles to support vehicle purchase and use decisions: Fuel economy estimation for alternative fuel vehicle users,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 67, pp. 280–298, 2016.
- [28] EPA, “Emission standards reference guide for on-road and nonroad vehicles and engines,” US Environmental Protection Agency, 2016.
- [29] Comisión Europea de Movilidad y Transportes, “Categorías de vehículos - European Commission.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/vehicles/vehicle_categories_es. [Accessed: 22-Jul-2018].
- [30] J. A. Carpenter, J. Gibbs, A. A. Pesaran, L. D. Marlino, and K. Kelly, “Road Transportation Vehicles,” *MRS Bulletin*, vol. 33, no. 04, pp. 439–444, 2008.
- [31] UPME (Unidad de Planeación Minero Energética/Ministerio de Minas y Energía), “PROYECCIÓN DE DEMANDA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA Revisión Diciembre de 2016,” 2016.
- [32] US Environmental Protection Agency, “Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles,” Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, p. 1, 2013.
- [33] US Environmental Protection Agency, “Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles.” [Online]. Available: <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>. [Accessed: 07-Jan-2018].
- [34] U.S. Department Of Energy and Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Many

- Factors Affect MPG,” 2018. [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/factors.shtml>. [Accessed: 09-Jan-2018].
- [35] G. Fontaras, N. G. 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.
- [36] V. Franco, M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger, and P. Dilara, “Road vehicle emission factors development: A review,” *Atmospheric Environment*, vol. 70, pp. 84–97, 2013.
- [37] C. Organisation for Economic, Development, and A. the International Energy, *Making Cars More Fuel Efficient: Technology for Real Improvements on the Road*. 2005.
- [38] D. A. Crolla, *Automotive engineering: powertrain, chasis system and vehicle body*, 1st ed., no. 1. United States of America: Elsevier publications and Book AID International, 2009.
- [39] EUROMASTER, “ETIQUETA EUROPEA DE NEUMÁTICOS,” 2014. [Online]. Available: https://www.goodyear.eu/es_es/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [40] C. Ernst, C. Harter, I. Olschewski, and L. Eckstein, “CO₂ Emission Reduction Potential for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles Management Summary 123320.”
- [41] R. B. Carlson, J. Wishart, and K. Stutenberg, “On-Road and Dynamometer Evaluation of Vehicle Auxiliary Loads,” *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 9, no. 1, pp. 2016-01–0901, 2016.
- [42] K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction in passenger cars,” *Tribology International*, vol. 47, pp. 221–234, 2012.
- [43] R. Karlsson, A. Carlson, E. Dolk, and V. Transportforskningsinstitutet, VTI - *Energy Use Generated by Traffic and Pavement Maintenance: Decision Support for Optimization of Low Rolling Resistance Maintenance Treatments*. 2012.
- [44] Cummins, “Cummins MPG Guide. Secrets of better fuel economy - the physics of MPG.” [Online]. Available: https://cumminsengines.com/uploads/docs/cummins_secrets_of_better_fuel_economy.pdf. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [45] J. Thomas, B. West, and S. Huff, “Effect of Air Filter Condition on Diesel Vehicle Fuel Economy,” 2013.

- [46] 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, May 2016.
- [47] S. Spalding, “RACQ Congested Roads Report : The Effects on Fuel Consumption and Vehicle Emissions Prepared by RACQ Vehicle Technologies Department,” no. 07, pp. 1–9, 2008.
- [48] M. Ehsani, A. Ahmadi, and D. Fadai, “Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1638–1648, 2016.
- [49] M. André and T. P. Workshop, “Drive Cycle Development Drive Cycle Development - Technical Topics,” May 1996.
- [50] H. Wang, L. Fu, Y. Zhou, and H. Li, “Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 13, no. 7, pp. 479–482, 2008.
- [51] P. Roura and D. Oliu, “How energy efficient is your car?,” *American Journal of Physics*, vol. 80, no. 7, pp. 588–593, Jul. 2012.
- [52] I. S. M. and P. G. B. T J Barlow, S Latham, *A REFERENCE BOOK OF DRIVING CYCLES FOR USE IN THE MEASUREMENT OF ROAD VEHICLE EMISSIONS*, 3rd ed. TRL Limited, 2009.
- [53] 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, no. 5, pp. 604–611, 2009.
- [54] U. Galgamuwa, L. Perera, and S. Bandara, “Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction: Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach,” *Journal of Transportation Technologies*, vol. 05, no. 04, pp. 191–203, 2015.
- [55] United States EPA, “EPA Dynamometer Drive Schedules,” 2013. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>. [Accessed: 10-Jan-2018].
- [56] K. Post, J. H. Kent, J. Tomlin, and N. Carruthers, “Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models,” *Transportation Research*

Part A: General, vol. 18, no. 3, pp. 191–213, 1984.

- [57] O. US EPA, OAR, “Vehicle Testing Regulations.” [Online]. Available: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/vehicle-testing-regulations>. [Accessed: 11-Jan-2018].
- [58] United States EPA, “How Vehicles Are Tested,” US Department of Energy, 2014. [Online]. Available: https://www.fueleconomy.gov/feg/how_tested.shtml. [Accessed: 11-Jan-2018].
- [59] M. Tutuianu et al., “Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40, pp. 61–75, Oct. 2015.
- [60] DieselNet.com, “Emission Test Cycles,” 2015. [Online]. Available: <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/index.php#eu>. [Accessed: 18-Oct-2018].
- [61] JAPON - Ministerio de Tierras Infraestructura y Transporte Sección de Política Ambiental de la Oficina del Automóvil, “Automóvil: Publicación sobre la eficiencia del combustible de los automóviles (desde el 4 de enero de 1990) - Ministerio de Tierras, Infraestructura y Transporte.” [Online]. Available: http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000013.html. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [62] S. Kumar Pathak, V. Sood, Y. Singh, and S. A. Channiwala, “Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 44, pp. 157–176, 2016.
- [63] “Mind the gap 2015,” 2015.
- [64] P. Nyberg, E. Frisk, and L. Nielsen, “Driving Cycle Equivalence and Transformation,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 3, pp. 1963–1974, 2017.
- [65] H. Y. Tong, H. D. Tung, W. T. Hung, and H. V. Nguyen, “Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam,” *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 29, pp. 5191–5199, 2011.
- [66] L. Berzi, M. Delogu, and M. Pierini, “Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of Florence,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 47, pp. 299–322, Aug. 2016.
- [67] R. Smit, R. Smokers, and E. Rabé, “A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no. 6, pp. 414–422, 2007.

- [68] L. Ntziachristos et al., “In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe,” *Energy Policy*, vol. 67, no. 2014, pp. 403–411, 2014.
- [69] Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, “Consumo Vehicular,” 2016. [Online]. Available: <http://www.consumovehicular.cl/#/>. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [70] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, and EPA - United States Environmental Protection Agency, “Download Fuel Economy Data.” [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml>. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [71] Spritmonitor.de, “Spritverbrauch berechnen und Autokosten verwalten - Spritmonitor.de.” [Online]. Available: <https://www.spritmonitor.de/>. [Accessed: 31-Aug-2018].
- [72] km77, “Revista de coches, novedades y pruebas de coches. Reportajes, noticias y artículos técnicos. - km77.com.” [Online]. Available: <https://www.km77.com/>. [Accessed: 31-Aug-2018].
- [73] D. Wackerly and R. Scheaffer, *Estadística matemática con aplicaciones*, Séptima Ed. Mexico, DF: Cengage Learning Editores, S.A, 2010.

ANEXO A: DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA DESCRIBIR Y COMPARAR CICLOS DE CONDUCCIÓN

Distance related	Total distance	$dist = (t_2 - t_1) \frac{v_1}{3.6} + \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1}) \frac{v_i}{3.6}$
Time related	Total time	$T_{total} = t_2 - t_1 + \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1})$
	Driving time	$T_{drive} = T_{total} - T_{stop}$
	Cruise time	$T_{cruise} = T_{drive} - T_{acc} - T_{dec}$
	Drive time spent accelerating	$T_{acc} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (a_1 > acc_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^n \begin{cases} t_i - t_{i-1} & (a_i > acc_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases}$
	Drive time spent decelerating	$T_{dec} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (a_1 < -acc_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^n \begin{cases} t_i - t_{i-1} & (a_i < -acc_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases}$
	Time spent braking	$T_{brake} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (a_1 < brake_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^n \begin{cases} t_i - t_{i-1} & (a_i < brake_threshold) \\ 0 & (else) \end{cases}$
	Standing time	$T_{stop} = \begin{cases} t_2 - t_1 & (v_1 = 0 \wedge a_1 = 0) \\ 0 & (else) \end{cases} + \sum_{i=2}^n \begin{cases} t_i - t_{i-1} & (v_i = 0 \wedge a_i = 0) \\ 0 & (else) \end{cases}$
	% of time driving	$\%drive = \frac{T_{drive}}{T_{total}}$
	% of cruising	$\%cruise = \frac{T_{cruise}}{T_{total}}$
	% of time accelerating	$\%acc = \frac{T_{acc}}{T_{total}}$
% of time decelerating	$\%dec = \frac{T_{dec}}{T_{total}}$	
% of time braking	$\%brake = \frac{T_{brake}}{T_{total}}$	
% of time standing	$\%stop = \frac{T_{stop}}{T_{total}}$	
Speed related	Average speed (trip)	$\bar{v}_{trip} = 3.6 \frac{dist}{T_{total}}$
	Average driving speed	$\bar{v}_{drive} = 3.6 \frac{dist}{T_{drive}}$
	Standard deviation of speed	$v_sd = \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ (i.e., v_sd corresponds to \bar{v}_{trip} , not \bar{v}_{drive})

Speed: 75th - 25th percentile

Maximum speed

Acceleration related Average acceleration

$$a_{-av} = \bar{a} = \frac{1}{T_{total}} \sum_{i=1}^n a_i$$

Average positive accel.

$$a_{-pos_{-av}} = \bar{a}_{pos} = \left(\sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i > 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Average negative accel.

$$a_{-neg_{-av}} = \bar{a}_{neg} = \left(\sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i < 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i < 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Standard deviation of accel.

$$a_{-sd} = \sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n a_i^2}$$

Standard dev. of positive acceleration

$$a_{-pos_{-sd}} = \sigma_{a_{-av_{-pos}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{a_{-av_{-pos}}}-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i^2 & (a_i > 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}} \quad \text{where } n_{a_{-av_{-pos}}} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Accel: 75th - 25th percentile

Number of accelerations

$$acc_{-nr} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > acc_threshold \wedge a_{i-1} \leq acc_threshold) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Accelerations per km

$$acc_{-rate} = 1000 \frac{acc_{-nr}}{dist}$$

Stop related Number of stops

$$stop_{-nr} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & ((v_i = 0 \wedge a_i = 0) \wedge \{v_{i-1} \neq 0 \vee a_{i-1} \neq 0\}) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Stops per km

$$stop_{-rate} = 1000 \frac{stop_{-nr}}{dist}$$

Average stop duration

$$stop_{-T_{-av}} = \bar{T}_{stop} = \frac{T_{stop}}{stop_{-nr}}$$

Average distance between stops

Dynamics oriented Relative positive acceleration

$$RPA = \frac{1}{dist} \sum_{i=1}^n \begin{cases} \frac{a_i v_i}{3.6} & (a_i > 0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

Positive kinetic energy

$$PKE = \frac{1}{dist} \sum_{i=2}^n \begin{cases} v_i^2 - v_{i-1}^2 & (v_i > v_{i-1}) \\ (\text{else}) \end{cases}$$

Relative positive speed

Relative real speed

$$\left. \begin{array}{l} \text{Relative positive speed} \\ \text{Relative real speed} \end{array} \right\} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (v_i) dt}{\bar{v}} = \frac{\int_0^T (v_i) dt}{x}$$

Relative square speed

Relative positive square
speed (RPSS)

Relative real square speed

$$\left. \begin{array}{l} \text{Relative square speed} \\ \text{Relative positive square} \\ \text{speed (RPSS)} \\ \text{Relative real square speed} \end{array} \right\} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (v_i)^2 dt}{\bar{v}} = \frac{\int_0^T (v_i)^2 dt}{x}$$

Relative cubic speed

Relative positive cubic
speed

Relative real cubic speed

$$\left. \begin{array}{l} \text{Relative cubic speed} \\ \text{Relative positive cubic} \\ \text{speed} \\ \text{Relative real cubic speed} \end{array} \right\} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (v_i)^3 dt}{\bar{v}} = \frac{\int_0^T (v_i)^3 dt}{x}$$

Root mean square of acceleration

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (a)^2 dt}$$

**ANEXO B: VALOR DE CADA UNO LOS PARÁMETROS PARA DESCRIBIR Y
COMPARAR CICLOS DE CONDUCCIÓN FTP-75, HWFET, UDDS, EDC, EUDC,
NEDC, JC08, Y JC10-15**

Tabla B-6-1 Parámetros de los ciclos de conducción.

No.	Parámetro	Unidad	FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
1	Distancia total ($dist$)	m	17769,39	16506,51	11990,21	6399,45	11192,87	17592,32	8158,83	10201,79
2	Tiempo total (T_{total})	s	1874	765	1369	780	400	1180	1204	891
3	Tiempo de conducción dedicad acelerar (T_{acc})	s	669	242	496	168	103	271	388	233
4	Tiempo de conducción dedicado a desacelerar (T_{dec})	s	576	192	419	144	42	186	370	190
5	Tiempo dedicado a frenar (T_{break})	s	370	70	268	144	42	186	274	190
6	Tiempo en crucero (T_{cruise})	s	293	326	212	227	214	442	99	185
7	Tiempo en detención (T_{stop})	s	336	5	242	241	41	281	347	283
8	Tiempo de conducción (T_{drive})	s	1538	760	1127	539	359	899	857	608
9	% de tiempo en conducción	%	82,07	99,35	82,32	69,10	89,75	76,19	71,18	68,24
10	% de tiempo en crucero	%	15,64	42,61	15,49	29,10	53,50	37,46	8,22	20,76
11	% de tiempo acelerando	%	35,70	31,63	36,23	21,54	25,75	22,97	32,23	26,15
12	% de tiempo desacelerando	%	30,74	25,10	30,61	18,46	10,50	15,76	30,73	21,32
13	% de tiempo frenando	%	19,74	9,15	19,58	18,46	10,50	15,76	22,76	21,32
14	% de tiempo detenido	%	17,93	0,65	17,68	30,90	10,25	23,81	28,82	31,76
15	Velocidad media (trip) (\bar{v}_{trip})	km/h	34,135	77,678	31,530	29,536	100,736	53,671	24,395	41,219
16	Velocidad media de conducción (\bar{v}_{drive})	km/h	41,593	78,189	38,301	42,742	112,240	70,448	34,273	60,405

No.	Parámetro	Unidad	FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
17	Desviación estándar de la velocidad (v_{sd})	km/h	25,661	16,484	23,651	27,394	50,809	50,002	23,088	38,332
18	Velocidad: 75° – 25° percentil	km/h	37,498	16,737	35,043	51,499	47,797	77,409	43,140	72,420
19	Velocidad máxima	km/h	91	96	91	80	193	193	82	113
20	Aceleración media (a_{av})	m/s ²	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	Aceleración media positiva ($a_{pos_{av}}$)	m/s ²	0,511	0,194	0,505	1,032	0,608	0,871	0,417	0,844
22	Aceleración media negativa ($a_{neg_{av}}$)	m/s ²	-0,576	-0,221	-0,578	-1,205	-1,490	-1,269	-0,449	-1,035
23	Desviación estándar de la aceleración (a_{sd})	m/s ²	0,631	0,299	0,625	0,720	0,607	0,684	0,458	0,678
24	Desviación estándar de la aceleración positiva ($a_{pos_{sd}}$)	m/s ²	0,383	0,176	0,376	0,441	0,297	0,399	0,290	0,418
25	Aceleración: 75° – 25° percentil	m/s ²	0,402	0,224	0,402	0,000	0,358	0,000	0,401	0,402
26	Número de aceleraciones (acc_{nr})	-	101	38	75	12	7	19	63	17
27	Aceleraciones por kilómetro recorrido (acc_{rate})	1/km	5,684	2,302	6,255	1,875	0,625	1,080	8	1,666
28	Número de paradas ($stop_{nr}$)	-	19	1	15	12	0	13	10	8
29	Paradas por kilómetro ($stop_{rate}$)	1/km	1,069	0,061	1,251	1,875	1,000	0,739	1,226	0,784
30	Duración media de parada (\bar{T}_{stop})	s	17,684	5,000	16,133	20,083	0,089	21,615	34,700	35,375
31	Distancia media entre paradas	m	935,231	16506,509	799,347	533,288	41,000	1353,255	815,883	1275,223
32	Aceleración relativa positiva (RPA)	m/s ²	0,184	0,071	0,185	0,249	0,152	0,187	0,186	0,264
33	Energía cinética positiva (PKE)	m/s ²	0,348	0,141	0,350	0,468	0,300	0,361	0,355	0,509
34	Velocidad relativa positiva	-	0,419	0,301	0,426	0,257	0,296	0,282	0,471	0,391
35	Velocidad real relativa	-	0,821	0,993	0,823	0,691	0,898	0,762	0,712	0,682

No.	Parámetro	Unidad	FTP-75	HWFET	UDDS	EDC	EUDC	NEDC	JC08	JC10-15
36	Velocidad cuadrática relativa	m/s	13,538	23,284	12,556	11,104	33,344	22,787	10,968	16,882
37	Velocidad cuadrática relativa positiva (RPSS)	m/s	5,920	6,446	5,553	3,497	11,105	8,338	6,063	8,543
38	Velocidad cuadrática relativa real	m/s	12,176	22,373	11,262	10,539	31,440	21,207	9,140	14,561
39	Velocidad cúbica relativa	m ² /s ²	232,030	533,194	199,768	187,749	1279,904	781,746	163,222	406,097
40	Velocidad cúbica relativa positiva	m ² /s ²	98,379	141,795	85,405	55,708	451,404	307,464	89,992	208,040
41	Velocidad cúbica relativa real	m ² /s ²	210,142	513,994	180,591	179,294	1197,660	718,744	136,172	348,761
42	Raíz media cuadrática de la aceleración	m/s ²	0,398	0,089	0,391	0,519	0,368	0,468	0,209	0,460