



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Propuesta de Metodología para
establecer Factores de
Emisiones en [gr/kWh] de
Vehículos para Sistemas
Integrados de Transporte en
Colombia bajo pruebas en ruta**

Luis Guillermo Pinilla Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería mecánica y
mecatrónica
Bogotá, Colombia
2016

Propuesta de Metodología para establecer Factores de Emisiones en [gr/kWh] de Vehículos para Sistemas Integrados de Transporte en Colombia bajo pruebas en ruta

Luis Guillermo Pinilla Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Mecánica

Director:

Ph.D Helmer Rodolfo Acevedo Gamboa

Línea de Investigación:

Eficiencia energética en vehículos

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en combustibles alternativos, energías y protección del medio ambiente

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica

Bogotá, Colombia

2016

A mis padres

Agradecimientos

Este trabajo fue soportado por el grupo de investigación GICAEPMA (Grupo de investigación en combustibles alternativos, energías y protección del medio ambiente) adscrito a la Universidad Nacional de Colombia liderado por el profesor Helmer Acevedo. Especial agradecimiento a él, a Francisco Sichacá, a Edwin López, a Mateo Gómez, a Esteban Oliveros quienes han apoyado, aportado y motivado constantemente este pequeño proyecto académico.

Resumen

Esta tesis tiene por objetivo el desarrollo de una metodología que formula el procedimiento para generar factores de eficiencia energética y la base para los factores de emisiones, a partir de la evaluación y caracterización de los métodos de medición de consumo de energía al freno y consumo de energía total (energía suministrada por el combustible) en vehículos para transporte de pasajeros en el sistema integrado de transporte.

La evaluación estableció las partes que deberían componer la metodología para medir vehículos y garantizar que los resultados obtenidos son reproducibles, los métodos sean repetitivos y los valores obtenidos permitan el cálculo de factores de eficiencia de energía y el cálculo de factores de emisión por kilovatio-hora emitidos. Los métodos investigados e involucrados en la metodología son tres: la evaluación de vehículos en ruta a bordo del mismo, la evaluación de vehículos en laboratorio sobre banco dinamométrico y la modelación de vehículos.

Se encontró que el desarrollo en paralelo de los métodos mencionados permite obtener: ciclos de manejo con valores de correlación respecto a los datos de conducción reales superiores al (0.9), valores de consumo de energía al freno con un error relativo inferior al (10[%]) teniendo como referencia la medición sobre el dinamómetro y un error relativo inferior al (10[%]) en el consumo total de energía teniendo como referencia la medición en ruta para vehículos de tipología (M) o buses.

Palabras clave: metodología, eficiencia energética, dinamómetro, pruebas en ruta, dinámica vehicular, ciclos de manejo, factores de emisión.

Abstract

This thesis aims to develop a methodology for characterizing the process to generate energy efficiency factors and the basis for emission factors, from the evaluation and characterization of the methods for the measuring energy consumption and the brake total energy (power supplied by the fuel) on vehicles for passenger transport in the integrated transport system of Bogota.

The evaluation established that the parties should compose the methodology for measuring vehicles and ensure that the results are reproducible methods are repetitive and the values obtained allow calculation of energy efficiency factors and the calculation of emission factors per kilowatt hour issued. The methods investigated and involved in the methodology are threefold: the evaluation of vehicles en route aboard the same vehicle evaluation laboratory chassis dynamometer and vehicle modeling.

It was found that the parallel development of the methods mentioned allows: driving cycles with correlation values respect to the real data of (0.9), values of brake energy consumption with a relative error less than (10 [%]) with reference to the measurement on the dynamometer and a relative error less than (10 [%]) in total energy consumption with reference to the measurement path vehicle type (M) or buses.

Keywords: methodology, energy efficiency, dynamometer, road tests, vehicle dynamics, driving cycles, emission factors

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XV
Lista de ecuaciones.....	XVI
Glosario de símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
Capítulo 1 . Metodología para medir consumo energético y calcular factores de eficiencia y emisiones gaseosas por kWh consumido en buses para pruebas en ruta a bordo del vehículo y pruebas en dinamómetro. Revisión.....	9
¿Qué es una metodología y por qué es necesaria?.....	10
¿Por qué la metodología propuesta trabaja sobre los métodos de medición en ruta y medición en laboratorio?.....	11
¿Cuál fue el orden para obtener la metodología que evalúa consumo al freno y consumo de combustible para buses en la ciudad de Bogotá?.....	14
¿Qué vehículos se involucran en el presente estudio?.....	15
¿Qué tipos de medición de consumo de energía en vehículos se necesitan?.....	16
¿Cuáles instrumentos hay disponibles para medir consumo de energía?	18
¿Qué son factores de eficiencia energética?.....	22
¿Qué son factores de emisiones por kilovatio-hora?.....	24
¿Cómo la modelación de la dinámica vehicular puede apoyar la metodología para medir consumo?.....	25
¿Cómo se conectan las pruebas en ruta con las pruebas en laboratorio?.....	27
Contextualizando el siguiente capítulo.....	27
Capítulo 2 Diseño y construcción de algoritmo para crear ciclos de manejo a partir de datos de GPS.....	29
Procesamiento datos de sistema de posicionamiento global....	30
Diseño de ciclos de manejo a partir de Micro-ciclos.....	41
Descripción método	42
Sustento teórico del error	43

Matriz de frecuencias	43
Calculo de factor de correlación	45
Ajuste de ciclo a condiciones reales	47
Condición de máxima aceleración y máxima desaceleración ..	47
Caracterización del ciclo de manejo	48
Ejemplo de ciclo de manejo totalmente caracterizado	53
Diagrama de flujo diseño de ciclo de manejo	54
Contextualizando el siguiente capítulo	54
Capítulo 3 . Modelo de dinámica vehicular longitudinal de bicicleta para evaluar consumo energético.....	57
Modelación vehículo	58
Modelo de bicicleta en dinámica longitudinal	59
Fuerzas de resistencia al desplazamiento del vehículo	63
Resistencia aerodinámica	63
Resistencia a la rodadura	64
Rendimiento aceleración	65
Coeficiente de fricción y modelo de rueda	68
Modelo tren de transmisión	71
Control de aceleración, desaceleración y frenado	72
Simulación de modelo sin control refinado	77
Impacto de la pendiente en el modelo Impacto de la carga en el modelo	78
Simulación de ciclo de manejo en el modelo	79
Contextualizando el siguiente capítulo	80
Capítulo 4 . Ajuste de modelo de dinámica vehicular por medio de datos experimentales y comparación de pruebas en ruta y en laboratorio.....	81
Experimentos y objetivos	81
Experimento (1) Fuerzas de resistencia a la rodadura	83
Experimento (2) Consumo en estado estable	83
Experimento (3) Consumo en estado transitorio	84
Experimento (4) Factores de corrección modelo y cargas en dinamómetro	84
Especificaciones técnicas instrumentación	85
Experimento (1). Fuerzas resistivas en buses	89
Modelo usado por SAE (J1263)	93
Experimento (2). Consumo a carga constante.....	102
Experimento (3). Consumo con carga variable	103
Experimento (4). Factores de corrección modelo y cargas en dinamómetro	107
Parámetros de ajuste dinamómetro usando sensor de torque en línea	108
Parámetros de ajuste modelo usando sensor de torque en línea	109
Consumo modelo ajustado vs experimento	111
Contextualizando el siguiente capítulo	113
Capítulo 5 . Metodología para obtener consumo energético, factores de emisión en [g/kWh] y factores de eficiencia en [kWh/km] de buses bajo pruebas en ruta a bordo del vehículo y pruebas en dinamómetro	114
Reseña	115

Requerimientos	115
Instrumentación	116
Perfil del personal	118
Condiciones de la prueba en ruta a bordo del vehículo ..	119
Condiciones de la prueba en laboratorio	119
Método	120
Descripción métodos definidos en metodología	121
Pruebas de desaceleración	121
Prueba en ruta	122
Diseño de ciclos de manejo	122
Simulación dinámica vehicular	122
Prueba en laboratorio sobre dinamómetro	123
¿Qué resultados arroja la implantación de la metodología?	123
Contextualizando el siguiente capítulo	124
Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones.....	125
Conclusiones	125
Recomendaciones	127
Bibliografía.....	128
Anexos	132
Anexo A. Instrumentación.....	132
Analizador de gases	132
Sistema de medición de flujo de gases de escape GICAEPMA	134
Balanza vehículos	135
Computador portátil	135
Chasis dinamométrico	136
Flujómetros	138
Quinta rueda	139
Mecanismo de posición mariposa de aceleración (Otto) y gobernador (Diesel)	140
Tarjeta de adquisición de datos National Instruments ...	140
Tanque auxiliar para medir combustible	141
Transductor de momento en línea	141
Sistema de posicionamiento global	142
Algoritmos Labview para lectura de sensores	143
Anexo B. Algoritmos desarrollados en Matlab	144
Algoritmo (GPS).....	144
Algoritmo ciclo de manejo	147
Función ciclo de manejo	147
Suavización y filtración ciclo de manejo.....	154
Parámetros Art. Kinema.....	157
Algoritmo SAE (J1263)	160

Modelo dinámica vehicular	161
A. Función vehículo	170
B. Función sumatoria de momentos en el centro de gravedad del vehículo	172
C. Función caja de velocidades	173
D. Función frenar	174
E. Función motor	175
F. Función rueda	177
Anexo C. Programación dinamómetro Mustang MD 400	179
Anexo D. Tablas de datos	180
Anexo E. Especificaciones vehículos	182
Anexo F. Protocolo dinamómetro	183
Anexo G. Anexos DVD.....	185

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Formas de medición de consumo de energía en buses.....	19
Figura 2-1 Perfil de GPS sin filtrar.....	30
Figura 2-2 Muestra de plantilla de archivo de Datos de GPS tomados en Bogotá para ingresar al algoritmo.....	31
Figura 2-3 Efecto del filtro 1 en la señal de velocidad mostrando como se remueve valores negativos	32
Figura 2-4 Efecto del filtro 2 en la señal de velocidad.....	33
Figura 2-5 Efecto del filtro 3 en la señal de velocidad.....	34
Figura 2-6 Efecto del filtro 4 en la señal de velocidad eliminando falsos ceros.....	35
Figura 2-7 Efecto del filtro 5 en la señal de aceleración.....	36
Figura 2-8 Señal con ruido contra señal filtrada usando Savitzky-Golay	36
Figura 2-9 Correlación entre datos de GPS sin filtrar y datos filtrados.....	37
Figura 2-10 Perfil de velocidad de GPS sin filtrar y filtrado	37
Figura 2-11 Perfil de aceleración de GPS sin filtrar y filtrado	38
Figura 2-12 Triangulo ilustrando el ángulo de pendiente de una ruta para un vehículo	39
Figura 2-13 Procesamiento señal de pendiente GPS.....	40
Figura 2-14 Diagrama de proceso filtración de datos.....	41
Figura 2-15 Matrices de frecuencia obtenidas para una muestra de datos de GPS y el ciclo de manejo construido con los mismos datos	45
Figura 2-16 Perfil GPS filtrado acompañado de su matriz de frecuencia.....	46
Figura 2-17 Perfil ciclo de manejo junto con su matriz de frecuencia ($r=0.95$ respecto a los datos de la Gráfica 2-13).....	46
Figura 2-18 Ciclo de manejo entregado por el algoritmo desarrollado	48
Figura 2-19 Diagrama de proceso para diseño de ciclo de manejo.....	54
Figura 3-1 Diagrama de cuerpo libre vehículo	59
Figura 3-2 Capacidad de aceleración	66
Figura 3-3 Curvas características motor ISUZU 4JJ1-TC	66
Figura 3-4 Radios de la rueda.....	67
Figura 3-5 Modelo LuGre agrupado en estado estable.....	70
Figura 3-6 Programación caja de velocidades ZF de seis relaciones para un vehiculó articulado	71
Figura 3-7 Posición acelerador	76
Figura 3-8 Carga en el motor del vehículo	76

Figura 3-9 Simulación perfil de velocidad de (GPS) sin refinar el modelo en un vehículo tipo buseta	77
Figura 3-10 Resultado simulación ciclo de manejo con pendiente promedio de (2.5 [%]) simulado con una pendiente promedio de (21.2 [%])	78
Figura 3-11 Simulación ideal de ciclo de manejo para vehículo tipo buseta....	79
Figura 3-12 Simulación de momento motor y velocidad motor	80
Figura 4-1 Diagrama de dependencia de experimentos	82
Figura 4-2 Perfil fuerzas resistivas buseta Mercedes Benz	99
Figura 4-3 Coeficiente resistencia a la rodadura de una buseta Mercedes Benz	99
Figura 4-4 Ciclo de manejo para evaluación vehículos articulados (No construido bajo el método acá propuesto).....	104
Figura 4-5 Ciclo de manejo para evaluación vehículos SITP (No construido bajo el método acá propuesto)	104
Figura 4-6 Diferencia entre eficiencia en ruta (referencia) y eficiencia modelo	110
Figura 4-7 Valor máximo de aceleración del vehículo por parte del conductor (85[%]).....	111

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Descripción de categoría internacional para vehículos de transporte de personas	15
Tabla 1-2 Clasificación de vehículos en el sistema integrado de transporte de Bogotá	16
Tabla 1-3 Evaluación comparativa de instrumentos para medir consumo disponibles en GICAEPMA	21
Tabla 2-1 Comparación perfiles de datos originales GPS contra datos filtrados	38
Tabla 2-2 Comparación entre la variación de error permisible y la correlación entre ciclo de manejo y GPS.....	43
Tabla 2-3 Formato de registro de datos para ciclos de manejos	55
Tabla 3-1 Modelo LuGre usado por CARULLA[41] e implementado en este modelo	70
Tabla 3-2 Constantes para cálculo de consumo total de energía.....	79
Tabla 4-1 Dimensión de área sección transversal vehículo [49]	94
Tabla 4-2 Resultados de experimentos de desaceleración	100
Tabla 4-3 Resultados pruebas desaceleración extrapoladas a (80 [km/h]) para programar dinamómetro	101
Tabla 4-4 Resumen resultados promedio y desviación estándar para energía al freno a carga constante	102
Tabla 4-5 Resumen resultados promedio y desviación estándar para consumo y eficiencia energética sobre dinamómetro	103
Tabla 4-6 Resumen de consumo para pruebas en ruta y en laboratorio simulando ciclos	105
Tabla 4-7 Resumen resultados de eficiencias energéticas en vehículos evaluados	106
Tabla 4-8 Resumen de estadísticas eficiencia energética.....	106
Tabla 4-9 Pruebas en ruta y sobre dinamómetro para ajustar parámetros de carga	109
Tabla 4-10 Resumen resultados simulaciones sin ajustar del modelo de dinámica vehicular	109
Tabla 4-11 Resumen resultados simulaciones modelo ajustado de dinámica vehicular.....	112
Tabla 4-12 Emisiones Mazda B2000 en pruebas de ruta y pruebas en laboratorio	113

Lista de ecuaciones

Ecuación 1-1 Factor de eficiencia energética en [kWh/km]	23
Ecuación 1-2 Factor de emisión en [gX/kWh].....	24
Ecuación 1-3 Factor de emisión en [gX/km].....	25
Ecuación 2-1 Filtro de datos repetidos y negativos de tiempo en datos de GPS	32
Ecuación 2-2 Filtro de datos de velocidad fuera de escala	33
Ecuación 2-3 Filtro de datos de velocidad diferentes de cero (0) cuando el vehículo está detenido.....	33
Ecuación 2-4 Filtro de datos de valores falsos de cero velocidades	34
Ecuación 2-5 Filtro de datos de valores fuera de escala de aceleración.....	35
Ecuación 2-6 Método numérico de integración Simpson 1/3 [30]	39
Ecuación 2-7 Relación trigonométrica para conocer pendiente de la ruta.....	40
Ecuación 2-8 Diferencia máxima velocidad	44
Ecuación 2-9 Diferencia máxima aceleración	44
Ecuación 2-10 Calculo de factor de correlación para matrices del mismo tamaño.....	46
Ecuación 2-11 Promedio de los elementos de una matriz	46
Ecuación 2-12 Distancia total [km]	49
Ecuación 2-13 Tiempo total [s]	49
Ecuación 2-14 Tiempo de conducción [s].....	49
Ecuación 2-15 Tiempo en velocidad crucero [s]	49
Ecuación 2-16 Tiempo acelerando [s].....	49
Ecuación 2-17 Tiempo desacelerando [s]	49
Ecuación 2-18 Tiempo de paradas [s].....	49
Ecuación 2-19 [%] de tiempo conduciendo.....	50
Ecuación 2-20 [%] de tiempo en velocidad crucero.....	50
Ecuación 2-21 [%] de tiempo acelerando	50
Ecuación 2-22 [%] de tiempo desacelerando.....	50
Ecuación 2-23 [%] de tiempo en paradas	50
Ecuación 2-24 Velocidad promedio por ciclo [km/h]	50
Ecuación 2-25 Velocidad promedio conduciendo [km/h]	50
Ecuación 2-26 Desviación estándar de la velocidad [km/h].....	50
Ecuación 2-27 Velocidad máxima [km/h].....	51
Ecuación 2-28 Aceleración promedio por ciclo [m/s ²].....	51
Ecuación 2-29 Promedio aceleración [m/s ²].....	51
Ecuación 2-30 Promedio desaceleración [m/s ²].....	51
Ecuación 2-31 Desviación estándar de aceleración total [m/s ²]	51
Ecuación 2-32 Desviación estándar de aceleración positiva [m/s ²]	51
Ecuación 2-33 Numero de aceleraciones [#]	52
Ecuación 2-34 Aceleraciones por kilómetro [# /km]	52

Ecuación 2-35 Cantidad de paradas	52
Ecuación 2-36 Promedio de duración por parada [s/#]	52
Ecuación 2-37 Valor cuadrático medio velocidad [km/h]	52
Ecuación 2-38 Valor cuadrático medio aceleración [m/s ²]	52
Ecuación 2-39 Pendiente promedio [%]	53
Ecuación 3-1 Dinámica longitudinal ecuación principal	60
Ecuación 3-2 Expansión ecuación 3-1 para vehículo con tracción en el eje trasero	60
Ecuación 3-3 Factor de masa del tren de transmisión	61
Ecuación 3-4 Masa efectiva del vehículo	61
Ecuación 3-5 Sumatoria de momentos en torno al eje y del vehículo en el centro de gravedad	61
Ecuación 3-6 Expansión de sumatoria de momentos	62
Ecuación 3-7 Sumatoria de fuerzas en el eje (z) del vehículo	62
Ecuación 3-8 Expansión sumatoria fuerza en el eje (z)	62
Ecuación 3-9 Bernoulli	64
Ecuación 3-10 Fuerza de resistencia aerodinámica	64
Ecuación 3-11 Fuerza de resistencia a la rodadura	65
Ecuación 3-12 Fuerza de tracción por capacidad del motor [38] pág. 26	67
Ecuación 3-13 Modelo LuGre agrupado. Ecuaciones 1-3 [41]	69
Ecuación 3-14 Fuerza de tracción por capacidad de tracción de la rueda[43]	71
Ecuación 3-15 Dependencia de la relación de la caja de transmisión respecto a la velocidad del vehículo y la velocidad de referencia	71
Ecuación 3-16 Calculo momento inicial o en tiempo cero (0 [s])	73
Ecuación 3-17 Diferencia de aceleración entre referencia y actual	73
Ecuación 3-18 Diferencia de momento para alcanzar determinada aceleración	73
Ecuación 3-19 Momento de salida del motor al tren de transmisión.....	73
Ecuación 3-20 Error relativo aceleración.....	74
Ecuación 3-21 Error relativo velocidad.....	74
Ecuación 3-22 Tolerancia aceleración para modelo	74
Ecuación 3-23 Tolerancia velocidad para modelo	74
Ecuación 3-24 Señal de activar frenos en modelo.....	75
Ecuación 3-25 Función momento freno	75
Ecuación 3-26 Momento freno eje trasero.....	75
Ecuación 3-27 Momento freno eje delantero.....	75
Ecuación 4-1 Modelo SAE (J1263).....	93
Ecuación 4-2 Términos Cr y C'd Ecuación 4-1	93
Ecuación 4-3 Simplificación modelo SAE (1263)	93
Ecuación 4-4 Método numérico derivación de velocidad.....	96
Ecuación 4-5 Representación matricial para implementar método de mínimos cuadrados por medio de la Ecuación 4-3	96
Ecuación 4-6 Expansión Ecuación 4-5	97

Ecuación 4-7 Sistema resuelto para (X)	97
Ecuación 4-8 Trabajo desarrollado por la fuerza aerodinámica (fae).....	97
Ecuación 4-9 Perdidas de energía debido a resistencia aerodinámica	97
Ecuación 4-10 Trabajo desarrollado por la fuerza de resistencia a la rodadura (frr).....	98
Ecuación 4-11 Perdidas de energía debido a resistencia a la rodadura.....	98

Glosario de símbolos y abreviaturas

σ	Desviación estándar
\vec{a}	Aceleración
CG	Centro de gravedad
df	Distancia desde el eje delantero al centro de gravedad del vehículo
dr	Distancia desde el eje trasero al centro de gravedad del vehículo
fae	Fuerza de resistencia aerodinámica
$fe_{i/kWh}$	Factor de emisión de gas contaminante por kilovatio-hora
fm	Factor de masa
ftr	Fuerza de tracción en el eje trasero
frrr	Fuerza de resistencia a la rodadura en el eje trasero
frrf	Fuerza de resistencia a la rodadura en el eje delantero
fv	Fuerza vertical
f_{η}	Factor de eficiencia energética
g_i	Gramos de contaminante
hg	Altura centro de gravedad vehículo
M	Momento de fuerza
m	Masa del vehículo
mur	Coefficiente de resistencia a la rodadura
mv	Masa equivalente del vehículo
n_i	Relación de velocidad caja de transmisión
n_d	Relación de velocidad diferencial
Pot _{cb}	Potencia suministrada por el combustible
reff	Radio efectivo rueda
RMS	Valor cuadrático medio
s	Desplazamiento longitudinal
t	Tiempo
Tb	Momento de frenado
Tbf	Momento de frenado eje trasero
Tbr	Momento de frenado eje delantero

\vec{v}	Velocidad vehículo
W_x	Peso del vehículo
x	Eje (x) o longitudinal del vehículo
y	Eje (y) o transversal del vehículo
z	Eje (z) o vertical del vehículo

Abreviaturas

CFR	Códigos de regulación federal
GICA	Grupo de investigación de calidad del aire
GICAEPMA	Grupo de Investigación en combustibles alterativos, energías y protección del medio ambiente
GPS	Sistema de posicionamiento global
km	Kilometro
kWh	Kilovatio-hora
l	Litros
MCI	Motor de combustión interna
Tn	Toneladas metricas
SITP	Sistema Integrado de transporte publico
SUR	Grupo de Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes

Introducción

Medir y calcular el consumo de energía al freno y total con precisión y exactitud sirve para generar índices de eficiencia energética y como base acompañado de una medición adecuada de emisiones para calcular factores de emisión por unidad de energía consumida tanto en pruebas en ruta, como en pruebas de laboratorio sobre chasis dinamométrico.

Esta tesis comprende una investigación detallada sobre la metodología que se debería implementar para medir el consumo energético en los vehículos del sistema integrado de transporte público en Bogotá, como resultado se presenta una metodología que permite calcular el consumo energético de vehículos y determinar índices de eficiencia energética y establecer la base para los factores de contaminación por unidad de energía consumida.

La medición de emisiones y consumo han sido desarrolladas y caracterizadas por el grupo de investigación de combustibles alternativos, energía y protección del medio ambiente suscrito a la Universidad Nacional de Colombia (GICAEPMA), esta tesis muestra el desarrollo de la metodología utilizada para calcular el consumo energético en ruta y para calcular el consumo en laboratorio sobre pruebas en dinamómetro.

El objetivo general es desarrollar la metodología presentada, y los objetivos específicos son el respaldo experimental y conceptual de la metodología, en este caso varias herramientas desarrolladas que la soportan y la hacen robusta:

Instrumentación -Durante el desarrollo de esta tesis se adquirió y se caracterizaron variedad de sensores que han sido

incluidos dentro de la metodología. Y además ha sido de utilidad no solo a este proyecto, si no al grupo de trabajo que conforma GICAEPMA que los han usado en otras aplicaciones, ahorrando tiempo y obteniendo mejores resultados.

Algoritmos -Durante el desarrollo de esta tesis se implementaron dos algoritmos importantes para el análisis de fuentes móviles: El algoritmo para diseño de ciclos de manejo y el algoritmo para procesamiento de datos de sistemas de posicionamiento global.

Análisis

Modelo de dinámica vehicular - Durante el desarrollo de esta tesis de desarrollo un modelo simple de bicicleta que se ajustó por medio de experimentos de consumo en ruta y en dinamómetro y puede simular ciclos de manejo y entregar valores de consumo con errores relativos al valor experimental menores al diez por ciento (10[%]) en vehículos de tres (3) a dieciocho (18) toneladas.

La tesis está compuesta por seis (6) capítulos, cada capítulo depende de los resultados obtenidos en el anterior. A continuación, se lista el contenido de cada capítulo.

Capítulo 1. La construcción de un marco teórico que explica cómo medir consumo, presenta un breve resumen de cómo medir las emisiones, en pruebas de ruta y en pruebas de dinamómetro, la conexión entre las dos pruebas que son la construcción de los ciclos de manejo que incluye la construcción de un modelo de dinámica vehicular para conocer la carga que debería simular el dinamómetro junto con el ciclo de manejo.

Capítulo 2. El diseño y programación de un algoritmo capaz de crear ciclos de manejo usando la información recopilada en las pruebas de ruta por medio de sistemas de posicionamiento satelital (GPS).

Capítulo 3. El diseño y programación de un algoritmo capaz simular la dinámica de un vehículo siguiendo el ciclo de manejo diseñado para conocer la carga que debe ser programada en el dinamómetro.

Capítulo 4. El análisis experimental que ajusta el modelo de dinámica vehicular a las condiciones reales que se obtuvieron con vehículos del SITP y con un vehículo particular que tenía un montaje experimental que no era posible en vehículos del SITP.

Capítulo 5. Presentación de la metodología y resultados obtenidos implementándola en vehículos del SITP.

Capítulo 6. Conclusiones y observaciones para futuros trabajos que complementen o mejoren el presente trabajo.

Este trabajo solo aplica a vehículos de tipología (M) o vehículos de transporte de pasajeros de más de ocho (8) personas operados con motores de combustión interna. Se limita conforme a la capacidad de la instrumentación, presupuesto y tiempo disponible.

El desarrollo de este trabajo sigue las pautas del método científico partiendo de la pregunta de ¿Cómo conocer el consumo energético real, con incertidumbre pequeña y conocida en vehículos? y usando las herramientas que dispuso GICAEPMA para el desarrollo de este proyecto. Para demostrar la hipótesis de que es posible medir el consumo de pruebas en ruta y de pruebas en dinamómetro y que ambas sean válidas y con error relativo pequeño debido a la construcción de un ciclo de manejo de alta correlación con la realidad.

Esta tesis maneja como base para unidades y marcos de referencia las siguientes normas:

- ISO/TC 12 Cantidades y unidades bajo el sistema métrico internacional SI [1]
- ISO 8855/2011 Vehículos de carretera, Dinámica vehicular y capacidad de agarre en carretera

Antecedentes

Para apreciar el impacto que tiene el desarrollo de esta tesis se debe contextualizar qué lugar ocupa el transporte dentro de la organización de la ciudad y sus proyectos.

El transporte de la población en ciudades grandes es un tema vital para su desarrollo y rutina diaria, esto lo convierte en un punto estratégico en el éxito de la administración en cada ciudad. El banco mundial[2] por medio de estadísticas a nivel internacional argumenta que alrededor del cincuenta y cuatro por ciento (54 [%])[3] de la población vive actualmente en áreas urbanas y sus proyecciones indican que incrementara uno punto cinco (1.5) veces para el año dos mil cuarenta y cinco (2045).

Como requerimiento inmediato el crecimiento acelerado en las ciudades debe estar respaldado por medios de transporte altamente eficientes como los sistemas integrados de transporte público, que son el medio más eficiente que han desarrollado las ciudades para trasportar a su población de forma masiva, de modo económico, seguro y confortable. Un sistema de este tipo se caracteriza porque integra todos los modos factibles de transporte, compromete todas las rutas posibles, es de múltiple modo, es decir que el usuario es capaz de cambiar de medio de transporte con facilidad dentro del sistema, además opera como una red e integra física y operacionalmente todos sus elementos[4].

En el caso de Bogotá, su administración ha dado lugar al Sistema integrado de transporte público SITP [5] desde el año dos mil (2000). Desde entonces se ha estado ampliando su operación y ha dado espacio a diferentes tecnologías en buses que mejoran el servicio, pero carece de otros medios de transporte que impide que sea más eficiente y colapse fácilmente. Sin embargo, la cantidad de buses que componen el sistema y el impacto que genera dentro de la economía, la salud y el medio ambiente de la ciudad han dado lugar a proyectos como el que se presenta en esta tesis.

El plan de optimización en la operación del SITP que trabaja la administración de Bogotá visto desde la eficiencia energética y el control de emisiones necesita como base, índices medidos que sean confiables y que sean reales. Entonces aparece la necesidad de construir una metodología para medir el consumo energético real, calcular factores de eficiencia

energética en kilovatio-hora por kilómetro desarrollado y factores de emisión en gramo de gases de combustión emitido por kilovatio-hora consumido en vehículos. Actualmente se hacen estos procedimientos por medio de pruebas en ruta a bordo del vehículo, en pruebas sobre chasis dinamométrico de rodillos o se utiliza modelación matemática. Para situaciones de regulación y normalización se utilizan las dos primeras opciones.

En los países altamente organizados o altamente industrializados en el sector automotriz, la construcción de estos índices de eficiencia e índices de emisiones y las metodologías están ya normalizados acorde a sus necesidades y han buscado que los países que no cuentan con este tipo de regulaciones utilicen las de ellos o sigan los protocolos que han creado y los modifiquen de acuerdo a sus requerimientos y capacidades tecnológicas. Siendo Estados Unidos, los países de la Unión Europea, Rusia, Japón, China, Corea del sur e India los más representativos y quienes a su vez son los mayores constructores de vehículos, quienes han normalizado estos procedimientos y establecido los índices o factores de eficiencia y emisiones.

La Unión Europea por medio del parlamento Europeo y del consejo, normalizó sus índices de emisiones y son presentados por medio de regulaciones y directivas[6] como actos legislativos. Sus índices presentados en lo que concierne a vehículos de tipología (M)[7] o vehículos de transporte de personas con capacidad de ocho (8) pasajeros en adelante o mejor conocidos como buses, está dividido en seis (6) escenarios denominados EURO acompañados de un número romano del (I) a (VI) siendo el más actual y restrictivo el (VI) [8][9]. Los índices presentados en gramos del contaminante por unidad de trabajo consumido están respaldados por la metodología que se utilizó para obtenerlos. Actualmente son referencia para las diferentes constructoras de vehículos y para las entidades de control de emisiones en las ciudades.

Análogo al ejercicio que desarrollo la Unión Europea, Estados Unidos por medio de la agencia para la protección del medio ambiente (EPA, Environmental Protection Agency [10])

estableció sus índices de emisiones bajo códigos de regulación federal (CRF) y se encuentran divididos en tres niveles (Tier 1,2 y 3), donde el nivel tres (Tier 3) es el más actualizado, sin embargo no contempla combustible DIESEL, el programa de emisiones nivel tres continua trabajando con los índices del nivel dos para vehículos Diesel[11]. Los índices son presentados en gramos del contaminante por unidad de trabajo consumido y también respaldado por una metodología.

Las metodologías que usaron Estados Unidos y la Unión Europea tienen en común el uso de chasis dinamométrico de rodillos, la simulación de ciclos de manejo que son una representación a escala de las dinámicas de transito de los vehículos en operación real y la operación a carga constante sobre el dinamómetro. Para la tipología de vehículos (M) o buses entregan los índices en gramo del contaminante por unidad de trabajo consumido. Estados Unidos en gramo por caballo de potencia al freno-hora (g/bhp-h) y la Unión Europea en gramo por kilovatio-hora (g/kWh).

Actualmente se está renovando la metodología para obtener los índices de consumo y emisiones para regularización, está pretende dejar de lado las pruebas en dinamómetro por pruebas en ruta a bordo del vehículo y presentar factores de emisión en gramo por unidad de potencia y gramo por kilómetro recorrido, esto aún no es norma.

Ese cambio permite ventajas como obtener índices de consumo energético y emisiones propias de la operación y las condiciones reales del tránsito, que el vehículo opere con todos sus sistemas de seguridad y control activados y de programación habilitados, esto ayuda además a evitar fraudes como el ocurrido con la Volkswagen[12] que cambiaban el modo de programación del vehículo cuando censaba que estaba montado sobre el dinamómetro, esta observación detallada por la Universidad de Virginia del oeste[13] le valió a la constructora una sanción. Presenta desventajas como la caída en precisión que implica la desaparición de la condición de repetitividad debido a las condiciones de tránsito y ambientales cambiantes pero continua siendo un experimento reproducible[14].

Motivación

En Colombia que no es un país industrializado en el sector automotriz, se ha buscado utilizar las metodologías de Europa y Estados Unidos bajo la resolución (0910)[15] del año dos mil ocho (2008) que reglamenta los niveles permisibles de emisiones para fuentes móviles y bajo las normas técnicas NTC (5375)[16], NTC (4231)[17]. La resolución es una combinación de los estándares de la Unión Europea, los estándares de Estados Unidos y regulaciones establecidas en Colombia en base a la capacidad tecnológica de esos años en el País. La resolución no especifica una metodología para obtener los índices de emisión y consumo que sean reales para las condiciones de tránsito y operación de los vehículos en Colombia, se remiten a las metodologías de los países mencionados sin ser modificadas y adaptadas a las condiciones Nacionales.

Es necesario entonces generar metodologías que entreguen resultados representativos para las ciudades del país. En los últimos años diferentes grupos de investigación en Colombia han trabajado metodologías para calcular consumo y emisiones en vehículos. Siendo los de mayor experiencia GICAEPMA (Grupo de Investigación en combustibles alterativos, energías y protección del medio ambiente de la Universidad Nacional de Colombia), GICA (Grupo de investigación de calidad del aire de la Universidad Nacional de Colombia) y SUR (Grupo de Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes).

El ejercicio que ha estado desarrollando la administración de la ciudad y los grupos GICAEPMA y GICA para calcular los índices o factores de eficiencia y emisión consiste de pruebas en ruta a bordo del vehículo y pruebas en dinamómetro, en ambas es claro que al finalizar las pruebas se debe conocer principalmente la energía consumida, sea en volumen de combustible o en unidades de energía y la cantidad de emisiones generadas en gramos en lo que concierne a esta tesis.

Se han desarrollado las dos pruebas en paralelo para trabajar bajo las metodologías desarrolladas por Europa y Estados Unidos en dinamómetro que aún son vigentes y son utilizadas como referencia en situaciones como la selección de filtros de material particulado, homologación de vehículos, pruebas de consumo, emisiones y potencia propias de las diferentes constructoras de vehículos, y aún importante para establecer la línea base de potencia, factores de emisión y consumo de vehículos del SITP siguiendo las pautas internacionales.

Las pruebas en ruta permiten establecer una segunda línea base de factores que serán la representación real de las emisiones y el consumo en la ciudad de Bogotá y pueden ser usados con mayor confianza en los cálculos de impacto ambiental, cálculos de eficiencia energética y cálculos económicos de consumo.

Se evidencia así la importancia y el impacto que tiene el desarrollo de esta tesis. Que pretende aportar al grupo de investigación una herramienta robusta para que avancen sus investigaciones, las cuales están aportando resultados positivos a la calidad del sistema de transporte de la ciudad de Bogotá.

Capítulo 1 . Metodología para medir consumo energético y calcular factores de eficiencia y emisiones gaseosas por kWh consumido en buses para pruebas en ruta a bordo del vehículo y pruebas en dinamómetro. Revisión

Este capítulo presenta una revisión detallada de la base teórica que se necesita en el desarrollo de una metodología que sirva en la evaluación del consumo de energía entregada al eje por vehículos de tipología (M) [7] y de consumo de energía total del vehículo o consumo de combustible bajo pruebas en ruta a bordo del vehículo bajo condiciones reales reproducibles y pruebas en laboratorio bajo condiciones que simulen la operación real del vehículo sobre un chasis dinamométrico y que sea repetitiva. Esta revisión incluye los medios que pueden ser implementados para medir consumo de energía, las ventajas y desventajas de los mismos, una revisión de las metodologías desarrolladas para medir consumo de energía, tanto en las pruebas en ruta a bordo del vehículo, como en las pruebas en laboratorio sobre chasis dinamométrico y las aplicaciones actuales de cada una.

Se presenta la modelación matemática de dinámica vehicular soportada por datos de GPS como un medio económico, efectivo y fácil de implementar para estimar la energía entregada al eje en pruebas de ruta a bordo del vehículo. Se presenta un breve resumen describiendo la metodología de medición de emisiones (no desarrollada por esta tesis) para dar respaldo

técnico a el cálculo de factores de emisión por unidad de energía consumida e igualmente se presenta en detalle el cálculo de factores de eficiencia. Finalmente se ilustra la conexión entre las pruebas en ruta y las pruebas sobre dinamómetro por medio del desarrollo de ciclos de manejo altamente representativos de las condiciones reales de manejo de la tipología de vehículos especificada.

¿Qué es una metodología y porqué es necesaria?

Como un recurso para producir conocimientos objetivos y sólidos, la metodología ofrece el desarrollo de métodos que han permitido evidenciar comportamientos y tendencias en todas las ramas del conocimiento. Este artículo es la base teórica para una tesis que se adentra en la investigación de los métodos existentes para medir y calcular el consumo energético total y al eje en vehículos tipo bus, para postular una metodología que sea aplicable en los vehículos de la ciudad de Bogotá de modo eficiente, preciso, simple y efectivo. Formular una metodología con tales características implica por causa y lógica conocer su concepto y definir las partes que la componen.

La Real academia de la lengua describe el concepto de "metodología" literalmente -como la ciencia del método y el conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal[18]. Al expandir el concepto, la metodología puede concebirse como una teoría del método para producir algún tipo conocimiento científico, para validarlo, para organizarlo, para garantizar la conservación y la reproducción del mismo[19].

Así mismo la metodología en una idea más familiar para la ingeniería y para argumentar el objetivo de este artículo, establece los métodos que se deben utilizar en la obtención de un conocimiento basado en la investigación y experimentación de los métodos mismos.

Método y metodología

Siendo el primer concepto el efecto del segundo concepto que enuncia a esta sección, se introduce la primera noción que relaciona los dos términos. El método es entonces uno de los resultados de la metodología. Conocer estas diferencias en una investigación como la que formula el título de este artículo, estableció una visión objetiva del alcance del trabajo y de cómo se resolvió.

El método responde al ¿Cómo?, es la secuencia de operaciones, probadas y aceptadas científicamente, diseñadas para alcanzar un objetivo, el ejemplo más conocido y la base que se sigue en este trabajo, el método científico. Y la metodología responde al ¿Por qué del método? Es decir, el argumento del cómo.

Metodología e ingeniería

En la ingeniería el método base para trabajar investigación en la mayoría de los casos e incluyendo este trabajo, es el método científico. Para cerrar esta sección poco tratada en la ingeniería, se establece como base que la esta investigación: utilizo el método científico para su desarrollo y presenta una metodología como resultado cuyos métodos estudiados las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio sobre chasis dinamométrico permiten conocer el consumo energético al freno y total en vehículos tipo bus para la ciudad de Bogotá.

¿Por qué la metodología propuesta trabaja sobre los métodos de medición en ruta y medición en laboratorio?

Actualmente los procedimientos de regulación de consumo y emisiones se encuentran en un periodo de reevaluación que ha evidenciado la necesidad de medir emisiones en ruta a bordo del vehículo, sin embargo, los estándares de Estados Unidos y la Unión europea que son la referencia para gran parte de los

organismos de control en el mundo han sido desarrollados bajo pruebas en laboratorio sobre dinamómetro. Cada método presenta características que lo hacen de utilidad en las organizaciones que necesitan caracterizar las emisiones, consumo y la eficiencia energética de vehículos para control y homologación de tecnologías vehiculares.

Por una parte, las pruebas en laboratorio presentan características de repetitividad, de fácil control y bajo nivel de costo y logística que la hacen ideal para ser implementada de forma masiva. Los factores de emisiones para la tipología de vehículos (M) o buses son entregados por unidad de energía entregada al freno por el motor del vehículo y los factores de eficiencia son entregados como energía consumida total (la energía propia del combustible del vehículo) por kilómetro desplazado.

Los estándares de la Unión Europea (EURO) utilizan pruebas en laboratorio para regularización de emisiones[20], para el cálculo de la energía entregada al freno han implementado en su historial de estándares en emisiones seis (6) metodologías, siendo la más reciente desarrollada dentro de las Naciones Unidas haciéndola más global y por tanto un punto de referencia importante para ciudades como Bogotá. La metodología implementada en laboratorio sobre dinamómetro de motor o sobre chasis dinamométrico, simula dos ciclos de manejo denominados: Ciclo mundial armonizado en estado transitorio y Ciclo mundial armonizado en estado estacionario[21]. Que aplica a vehículos de carga pesada y autobuses que se certifiquen bajo estándar de emisiones (EURO [VI]).

La otra parte comprende las pruebas en ruta a bordo del vehículo, presentan características de reproducibilidad y representatividad de la realidad. Los factores de emisiones para la tipología de vehículos (M) son entregados en gramo de la emisión por kilovatio-hora consumido o en gramo de la emisión por kilómetro desarrollado y los factores de eficiencia son entregados por vehículo en kilovatio-hora total por kilómetro desarrollado pero cuando se analizan por flotas vehiculares y estadísticas de pasajeros en los buses, los

factores de eficiencia se entregan en Estados Unidos en pasajero-milla por galón de combustible, en Europa en megajulio por pasajero-kilometro [22], [23].

La realidad que han mostrado los resultados obtenidos de las pruebas en ruta para caracterizar emisiones y consumo están presionando a los actuales organismos públicos a desarrollar metodologías para normalizar este tipo de pruebas. Colombia al no ser un país líder en el sector de la industria automotriz le es más simple y útil trabajar con las regulaciones internacionales existentes, sin embargo, estas deben ser modificadas a las condiciones de sus ciudades, que tienen dinámicas de transporte propias que no son representadas en las regulaciones internacionales. Además, no estando aún regularizadas las pruebas en ruta a nivel internacional.

La Universidad Nacional de Colombia ha empezado a liderar este tipo de pruebas y le ha sido posible formular metodologías para desarrollarlas de forma confiable y eficaz y así estar actualizado respecto a los demás países, se puede incluso pensar que un poco adelantado respecto a las pruebas en rutas respecto a varios países latinos.

Partiendo de este hecho se desarrolla una metodología compuesta de dos métodos que complementan las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio sobre dinamómetro porque permite:

- Establecer factores de emisiones que están desarrollados bajo las mismas condiciones metodológicas internacionales (pruebas en laboratorio sobre dinamómetro), que garantizan repetitividad y normalización y son base para la homologación de vehículos, pruebas de rendimiento y eficiencia.
- Establecer factores de eficiencia energética reales (pruebas en ruta).
- Establecer la base energética para los factores de emisión por kilovatio-hora que representan la realidad (pruebas en ruta).

- Generar un puente claro entre las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio sobre el dinamómetro.

¿Cuál fue el orden para obtener la metodología que evalúa consumo al freno y consumo de combustible para buses en la ciudad de Bogotá?

Este trabajo inicio con una consulta detallada de los métodos de medición en ruta y medición en laboratorio de consumo de energía en vehículos. Que ha sido resumida en la introducción de este artículo y desglosada en detalle a lo largo del mismo como prólogo a la implementación de cada método de medición en vehículos del sistema integrado de transporte y comprende también el marco teórico de esta investigación.

Una vez hecha la consulta, fue necesario establecer un puente solido entre los dos métodos, esto corresponde al diseño de ciclos de manejo que muestren la realidad de la operación normal del vehículo sobre el chasis dinamométrico, este ciclo debe incluir un perfil de velocidad del vehículo y los parámetros de carga que representan las fuerzas resistivas que actúan sobre el vehículo en una prueba en ruta para programar la simulación en el dinamómetro, esta parte es desarrollada parcialmente en el Capítulo 2 el cual sigue al presente artículo y describe el método desarrollado para generar ciclos de manejo.

Sin embargo el Capítulo 2 no involucra la determinación de los parámetros de carga para el dinamómetro, esta parte se desarrolla en el Capítulo 4 que presenta el desarrollo experimental de la investigación relativo a las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio, incluyendo las pruebas de desaceleración que se utilizan para determinar las fuerzas resistivas en vehículos.

El 0 presenta un modelo de dinámica vehicular que pretende ser una solución económica y efectiva al problema de conocer el consumo de energía al eje en vehículos sobre pruebas en ruta,

este modelo es ajustado en el experimento presentado en el Capítulo 4.

El Capítulo 5 presenta la metodología que recomienda el uso de los dos métodos para aplicar en la ciudad de Bogotá respaldado por las dos herramientas desarrolladas en esta investigación: diseño y construcción de ciclos de manejo y modelación de dinámica vehicular.

¿Qué vehículos se involucran en el presente estudio?

El sistema integrado de transporte está compuesto por vehículos de tipología (M) [7]. A nivel internacional están divididos en tres sub-clases que dependen de la capacidad de carga en peso o la capacidad en cantidad de pasajeros como se aprecia en la Tabla 1-1. A nivel nacional los vehículos en el sistema integrado de transporte están divididos en seis (6) clases de acuerdo a la capacidad de pasajeros (ver Tabla 1-2).

Tabla 1-1 Descripción de categoría internacional para vehículos de transporte de personas

Descripción de categoría de vehículos (M) o vehículos de transporte de pasajeros	
Por definición la categoría (M) comprende vehículos que tienen al menos cuatro ruedas y son usados para transportar personas[7] pág. 6	
M ₁	Vehículos usados para transporte de pasajeros de no más de ocho (8) pasajeros. (sin incluir el lugar del conductor)
M ₂	Vehículos usados para transporte de pasajeros de más de ocho (8) pasajeros. (Sin incluir el lugar del conductor) y que no exceda las cinco (5) toneladas.
M ₃	Vehículos usados para transporte de pasajeros de más de ocho (8) pasajeros. . (Sin incluir el lugar del conductor) y que exceda las cinco (5) toneladas.
Clase I, II y III	Para vehículos que tienen una capacidad superior a los veintidós (22) pasajeros. (Sin incluir el lugar del conductor). Hay una sub-división de tres clases (I – II – III). Clase I: Vehículos construidos con áreas para pasajeros de pie para permitir movimiento frecuente de pasajeros. Clase II: Vehículos construidos principalmente para el transporte de pasajeros sentados, y diseñados para permitir el transporte de viajeros de pie en el pasillo y/o en una zona que no sobrepase el espacio previsto para dos asientos dobles. Clase III: Vehículos construidos principalmente para el transporte de pasajeros sentados.
Observación: vehículos articulados que consisten de dos o más cuerpos rígidos de movimiento relativo, los pasajeros comparten los compartimientos y se pueden desplazar libremente y tiene secciones para pasajeros de pie.	

Fuente: Clasificación según Naciones Unidas [7]

Tabla 1-2 Clasificación de vehículos en el sistema integrado de transporte de Bogotá

Clasificación vehículos para transporte de personas en el Sistema integrado de transporte de Bogotá		
Clases de vehículos	Capacidad de personas	Clasificación equivalente internacional ¹
Micro-bus	19	M2
Buseta	40	M3
Bus	50	M3 clase II
Clases de vehículos	Capacidad de personas	Clasificación equivalente internacional ²
Padrón	80	M3 clase II
Articulado	160	M3 clase II
Biarticulado	250	M3 clase II

Fuente: Transmilenio y Alcaldía de Bogotá[24]

En este estudio se han incluido mediciones de consumo de tres (3) clases de vehículo: articulado, buseta y micro-bus.

Adicional hay un experimento que se utilizó para ajustar el modelo de dinámica vehicular que se propone en el 0, que consistió en montar un transductor de torque en línea en el cardan del sistema de transmisión en un vehículo Mazda B2000³ y desarrollar todas las pruebas análogas que se desarrollan en un bus, con el objetivo de conocer la energía al eje en ruta y sobre el dinamómetro para calcular la desviación de la simulación de un ciclo de manejo respecto a la operación real del vehículo.

¿Qué tipos de medición de consumo de energía en los vehículos se necesitan?

Este corto numeral pretende aclarar la diferencia entre la energía que se mide al freno y la energía entregada por el

¹ Esta clasificación es asignada en este artículo.

² Esta clasificación es asignada en este artículo.

³ Este vehículo no hace parte de la flota del sistema integrado de transporte, se utiliza porque se montó en un experimento que no era posible implementarse en un bus dadas las características de los vehículos y el tiempo disponible.

combustible o energía total en el cálculo de factores de emisión y factores de eficiencia.

Como ya se mencionó los factores de emisión que están bajo las regulaciones europeas o estadounidenses están por unidad de energía al freno. Porque la metodología que las concibió utilizo como instrumento base de medición directa un dinamómetro, el cual por la forma en que trabaja entrega un valor confiable con error conocido de potencia al eje del motor y omite las pérdidas de energía en el motor de combustión interna, es decir mide la energía efectiva que entrega el motor al vehículo.

Esto no implica que no se puedan conocer los factores de emisión por unidad de energía total consumida, pero no es relevante a nivel internacional por la regularización establecida que siguen la mayoría de los países. Ahora conocer el consumo total de energía a partir del dinamómetro implicaría el montaje de instrumentación adicional y cálculos matemáticos que amplían el margen de error del factor obtenido, es más simple la medición de consumo de combustible. Respecto a calcular la eficiencia energética, este si demanda conocer el consumo total de energía para que el dato sea útil en estudios de optimización, estudios ambientales y estudios económicos. Este es un motivo más para dar paso a las pruebas de emisiones en ruta a bordo del vehículo.

Ahora si se trabaja en la metodología para Bogotá los dos tipos de pruebas, en ruta y en laboratorio se obtendrían los siguientes resultados:

- Factores de emisión por unidad de energía consumida al freno en pruebas bajo laboratorio, siguen las pautas metodológicas que están actualmente normalizadas por líderes automotrices pero no son idénticas por capacidad de tecnología y condiciones ambientales, luego son útiles para procedimientos de certificación que Colombia está en la obligación de conocer para saber que tecnología está ingresando al país y para presentar ante los demás países que esos vehículos emiten determinada cantidad de gases por unidad de energía consumida

al freno y presentan determinada eficiencia energética siguiendo las pautas de metodologías internacionales.

- Factores de emisión por unidad de energía consumida total en pruebas bajo laboratorio, implementados en este artículo pretenden establecer una conexión directa entre las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio, porque en ambas pruebas son medibles todas las variables, lo cual permite apreciar la capacidad de la prueba en laboratorio implementada de Bogotá, para representar las condiciones de operación real de los vehículos.
- Factor de eficiencia energética son calculados a partir de pruebas en ruta, aunque pueden ser calculados bajo prueba en laboratorio para pruebas de consumo normalizadas o bajo condiciones específicas no reproducibles en una ruta. Dependiendo del ciclo de manejo implementado en el dinamómetro y de la programación de la carga en el mismo, es posible obtener factores de eficiencia semejantes a los obtenidos en ruta.

Luego esta metodología entregada permite obtener el consumo de energía al eje y total, que pueden ser usados para determinar dos (2) factores de emisión y dos (2) de eficiencia energética, los cuales tiene aplicaciones totalmente diferentes e importantes.

¿Cuáles instrumentos hay disponibles para medir consumo de energía?

La instrumentación utilizada en el desarrollo de esta tesis se encuentra descrita en el anexo A. En esta sección se hace una descripción breve de ¿Por qué se utilizaron determinados sensores para medir consumo?, ya que son una parte importante en el desarrollo de esta tesis.

La implementación de instrumentos en experimentos se encuentra sujeta a varias variables que deben ser contempladas antes de ser adquiridos como: la incidencia del instrumento en el resultado del experimento sujeto a una adecuada selección, por ejemplo la selección incorrecta de un flujómetro de

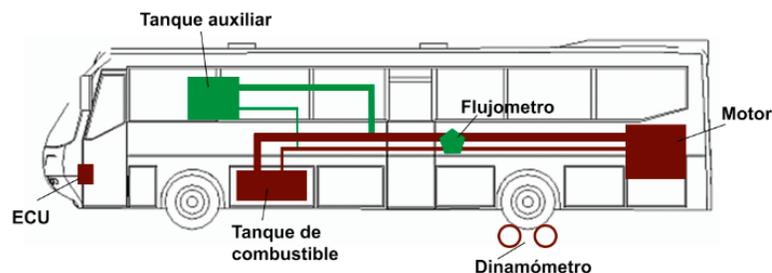
combustible para motores de combustión interna genera en la línea de combustible del motor uno de estos dos efectos: primero que la línea de combustible tenga altas pérdidas de presión por un flujómetro sub-dimensionado alterando la operación del motor, segundo que el flujómetro no sea capaz de registrar el valor de consumo y entregue datos equívocos.

El montaje del sensor incide directamente en la variable que se propone medir, por ejemplo, la presencia de aire en la línea de combustible altera la operación de un motor Diesel. Entonces se debe conocer bien las características de las variables y los puntos de medición en el experimento, para evitar este tipo de problemas.

El consumo de energía en vehículos se puede medir por varios medios y en diferentes puntos del mismo, dependiendo de que se desea conocer, el mercado de la instrumentación ofrece diversidad de sensores para montar en el vehículo y medir adecuadamente, sin embargo, el presupuesto y compatibilidad con la mayor cantidad de vehículos posibles son variables de restricción importantes. La **Figura 1-1** muestra un bus con algunos de los puntos clave para medir consumo energético.

Son cuatro (4) puntos en los que se puede medir el consumo energético del vehículo (**Figura 1-1**), se aprecian dos métodos de medición que son invasivos: el uso de un tanque auxiliar aforado y el uso de flujómetros con registro de datos y se aprecian dos (2) no invasivos: usar la información suministrada por la unidad de control electrónico (ECU) por medio del puerto de diagnóstico a bordo (OBD) y está el uso de un dinamómetro.

Figura 1-1 Formas de medición de consumo de energía en buses



Fuente: GICAEPMA

- El uso de un tanque auxiliar aforado permite hacer registro de datos de dos modos: registrar el peso del tanque al inicio y al final de la evaluación del vehículo, establecer la diferencia en masa y conocer el valor en kilogramos [kg] del combustible o al estar aforado el tanque registrar el volumen inicial y final, establecer la diferencia en volumen y conocer el valor en litros [l].

El montaje es invasivo interviniendo las líneas de alimentación y retorno de combustible al motor de combustión interna. Este método entrega una medición en volumen o en masa con margen de error conocido, ya sea por la resolución de la balanza utilizada o por la resolución del tanque aforado. La medida de consumo entregada es el total de la prueba. La energía consumida se calcula con el poder calorífico del combustible y la densidad del mismo y el resultado final representa la energía total entregada al vehículo.

- El uso de flujómetros con registro de datos permite tener información de consumo a una frecuencia constante, ver el consumo acumulado y el caudal en cualquier instante de la evaluación del vehículo. El montaje es invasivo interviniendo las líneas de alimentación y retorno de combustible al motor de combustión interna. Este método entrega una medición en volumen con un margen de error conocido y el instrumento tiene un valor de resolución conocido. La energía consumida se calcula con el poder calorífico del combustible y la densidad del mismo y el resultado final representa la energía total entregada al vehículo.
- El uso de información proveniente de la unidad de control electrónica entregada a través de puertos OBD de los vehículos a un escáner permiten conocer el consumo de energía. El método es no invasivo y depende del escáner que tenga a disposición permitirá o no registrar el consumo. La información de consumo obtenida por este

método normalmente está en valores de volumen. También es posible obtener el consumo de energía al eje del motor.

- El uso del dinamómetro permite obtener el consumo directo de energía al freno en unidades de kilovatio-hora [kWh] y el consumo total de energía se obtiene asumiendo una eficiencia en el motor y en la combustión. El montaje es no invasivo y permite desarrollar diferentes tipos de pruebas a parte de consumo. El margen de error y la resolución del equipo son conocidos.

Cada método mencionado ha sido ensayado y se han apreciado las ventajas y desventajas de cada uno. Los métodos invasivos son los que presentan mayor nivel de precisión, sin embargo, son los más complicados de implementar. El uso de la información suministrada por el puerto OBD en los vehículos en Colombia no es posible obtenerla completa porque las constructoras automotrices no lo permiten por asuntos legales y porque los escáneres que son enviados a Colombia no tienen habilitadas todas las funciones que se requieren, luego la información que se ha obtenido de este método no ha sido de utilidad. La Tabla 1-3 presenta una evaluación comparativa de cada instrumento basado las características de cada uno.

Tabla 1-3 Evaluación comparativa de instrumentos para medir consumo disponibles en GICAEPMA

Evaluación comparativa instrumentos						
Instrumento	Tipo de medición	Resolución instrumento	Prueba exitosa	Facilidad de montaje	Cobertura de vehículos	Utilidad la información resultante
Tanque aforado	Invasiva	+ - 1 [L]	Si	3	5	4
Flujómetros	Invasiva	+ - 5 [ml]	Si	2	4	5
ECU / OBD	No invasiva	Depende de cada vehículo	No	5	5	0
Dinamómetro	No invasiva	+ - 1 [kWh]	Si	4	5	4

Fuente: GICAEPMA

En la Tabla 1-3 se aprecian seis (6) características para cada instrumento. Donde dos de ellas son características propias del instrumento (tipo de medición y resolución del instrumento), el

resultado de la prueba que se desarrolló con cada uno de ellos (exitosa y no exitosa) y los tres restantes son una calificación de uno a cinco (donde cinco es el mejor puntaje) que califican la facilidad de montaje, la cobertura de vehículos a los que se les puede montar el instrumento y la utilidad de la información suministrada por cada uno.

Los datos adquiridos por OBD (Diagnóstico a bordo del vehículo) han sido descartados como prueba exitosa porque no fue posible tener datos de consumo confiables. El tanque auxiliar y los flujómetros son instrumentos aptos para el ejercicio, el tanque auxiliar con el que se desarrolló la prueba cuenta con una resolución pequeña comparada con la del flujómetro y en este caso es utilizado para verificar la correcta operación de los flujómetros, que además permite conocer datos de consumo en cualquier instante de tiempo. Luego el instrumento que mejor se comporta al momento de medir consumo de combustible es el flujómetro. La **Tabla 1-3** también muestra que el único instrumento que permite medir consumo energético al freno es el dinamómetro, para mayor información técnica de estos instrumentos remítase al anexo A.

De acuerdo a lo mencionado los instrumentos mejor calificados para medir consumo de combustible y energía consumida al freno son respectivamente los flujómetros y el dinamómetro.

¿Qué son factores de eficiencia energética?

Los factores de eficiencia son relaciones que indican cantidad de energía que es consumida desarrollando determinada actividad, en los vehículos son en la forma más simple la cantidad de kilovatios-hora por kilómetro recorrido y son la base de estudios de optimización, estudios económicos y ambientales para diferentes organismos públicos y privados. Entonces establecer como se obtienen los factores mencionados, implica conocer en detalle todas las actividades, cálculos, procedimientos, instrumentación, personal y condiciones que se tuvieron en cuenta para llegar al factor presentado.

Le otorgan al factor final entregado un sello de confianza alto y un respaldo metodológico robusto. El cual es necesario para que los estudios en los que sean involucrados sean de utilidad.

Los factores de eficiencia energética en vehículos se suelen entregar de varios modos según sea la necesidad. La oficina

de integración y análisis internacional de energía suelen entregar factores de consumo energético en reportes que denominan "Panorama anual energético"[25] y los entrega en millones de combustible consumidos por día, es un valor global. Por otro lado estudios más locales entregan valores de eficiencia en pasajero-kilometro por litro consumido o pasajero-milla por galón consumido de combustible[23]. Un estudio más pequeño implicaría evaluar el vehículo directamente, en ese caso el factor de eficiencia energética más simple es la energía consumida por kilómetro desplazado. La Ecuación 1-1 presenta el cálculo de este factor de eficiencia energética conociendo la potencia entregada por el combustible y la distancia recorrida en una prueba.

Ecuación 1-1 Factor de eficiencia energética en [kWh/km]

$$f_{\eta} = \frac{\int_{t_0}^{t_n} Pot_{cb}(t) * dt}{\int_{t_0}^{t_n} \vec{v}(t) * dt} = \left[\frac{kWh}{km} \right]$$

Para llegar a valores de consumo de energía y desplazamiento confiables y que estén respaldados por un método robusto de medición es necesario:

- Conocer las condiciones de la medición
- Caracterizar el vehículo a medir
- Determinar cuál es la instrumentación necesaria para cada medición en el vehículo.
- Establecer las condiciones de operación del vehículo: carga a transportar, tipo de conducción, velocidad media y máxima entre otras varias condiciones.

El método más eficiente es medir en ruta a bordo del vehículo porque el vehículo está operando en condiciones reales de operación. También es factible montar un experimento más controlado y que garantice repetitividad en un laboratorio sobre el chasis dinamométrico. En este artículo se establece como valor de referencia en eficiencia energética, los valores obtenidos en pruebas de ruta y esta debe ser propia de las

condiciones de operación normales del vehículo para obtener factores que sean aplicables.

¿Qué son factores de emisiones por kilovatio-hora?

Los factores de emisiones han nacido de la necesidad de implementar control sobre los gases contaminantes emitidos por determinadas actividades humanas que generan un alto impacto al medio ambiente, en este caso el transporte público operado con motores de combustión interna (mci).

Los estándares estadounidenses y europeos se han expresados de dos modos: en gramos del gas contaminante por kilómetro desplazado en vehículos pequeños y livianos o en gramos del gas contaminante por kilovatio-hora consumido para vehículos de trabajo pesado y autobuses.

Esta distinción se debe a varias razones: iniciado en que los vehículos considerados de trabajo pesado operan con motores que también son usados como plantas de generación eléctrica en otras aplicaciones y es más útil para ambas partes conocer la emisión por unidad de energía generada o kilovatio-hora para estudios económicos y de eficiencia, también porque el nivel de gases contaminantes emitido es dependiente de la carga demandada por el vehículo al motor de combustión interna como lo evidencia Jiménez[26] en el modelo de consumo específico vehicular que propone en su tesis doctoral y actualmente utilizado para modelar emisiones en Estados Unidos, el nivel de emisiones depende de la cantidad de energía demandada.

La Ecuación 1-2 y la Ecuación 1-3 muestran el cálculo de los factores de emisión a partir de datos obtenidos de mediciones directas sobre el vehículo.

Ecuación 1-2 Factor de emisión en [gX/kWh]

$$f_{e_{i/kWh}} = \frac{\sum_{t_0}^{t_n} g_i(t)}{\int_{t_0}^{t_i} Pot(t) * dt} = \left[\frac{g_i}{kWh} \right]$$

Ecuación 1-3 Factor de emisión en [gX/km]

$$f_{e_i/km} = \frac{\sum_{t_0}^{t_n} g_i(t)}{\int_{t_0}^{t_i} \vec{v}(t) * dt} = \left[\frac{g_i}{km} \right]$$

La metodología para medir emisiones que se utiliza en Bogotá por organismos gubernamentales fue diseñada por GICAEPMA⁴ y consiste de una prueba en ruta a bordo del vehículo predefinida por el tipo de vehículo, donde se instalan instrumentos que registran datos en tiempo real segundo a segundo de emisiones gaseosas (Ver anexo A), material particulado, número de partículas y flujo de aire. Como resultado del método implementado se obtiene los gramos de cada emisión y la cantidad de partículas.

La metodología de este estudio pretende empalmar con la metodología de emisiones para obtener la forma más completa para caracterizar vehículos del sistema integrado de transporte en Bogotá, entregando como resultado del desarrollo total de la metodología:

- Factores de emisión por kilovatio-hora en ruta.
- Factores de emisión por kilovatio-hora bajo condiciones controladas en laboratorio sobre chasis dinámico siguiendo las regulaciones internacionales actuales.
- Factores de eficiencia energética en kilovatio-hora por kilómetro.

¿Cómo la modelación de la dinámica vehicular puede apoyar la metodología para medir consumo?

La modelación matemática de la dinámica longitudinal de un vehículo es un modo económico y efectivo de conocer el consumo

⁴ GICAEPMA Grupo de investigación en combustibles alternativos, energías y protección del medio ambiente asociado al departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

energético. Este estudio propone un modelo matemático que ajustado con datos experimentales presenta como resultado la energía entregada por el motor del vehículo. El modelo y su resultado es útil para:

- Determinar la relación que existe entre las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio sobre dinamómetro, utilizando como referencia la energía al eje. Y así conocer la desviación que existe entre las dos pruebas para ajustar la prueba de laboratorio mejor a las condiciones reales.
- Presentar un valor de consumo de la energía al eje sin un montaje experimental complejo. Porque un montaje de este tipo implica una instrumentación que es invasiva y por tanto demanda desarrollar modificaciones en el vehículo para poder hacerlas, lo cual no es viable por costo, operación del vehículo normal y seguro.

Los modelos de dinámica vehicular han sido implementados de diferentes formas en aplicaciones de este tipo. Jiménez[26] utiliza un modelo simplificado de la dinámica longitudinal del vehículo que involucra las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo. Conocidas como fuerzas resistivas: la resistencia aerodinámica producto de la interacción del vehículo con el aire del entorno, la resistencia a la rodadura producto de la interacción entre las ruedas y el asfalto y el peso asociado al vehículo. Por medio de este modelo Jiménez evidencia el consumo del vehículo por cada tonelada de carga transportada. Por medio de la modelación de dinámica vehicular se caracterizan y optimizan las fuerzas resistivas previamente descritas. Como lo hace en la cita[27] donde se presenta una revisión de la reducción en las fuerzas resistivas en buses y camiones, en ese propuesta se evidencia como la reducción en la intensidad de estas fuerzas se ven reflejadas en un menor consumo de combustible.

¿Cómo se conectan las pruebas en ruta con las pruebas en laboratorio?

Los ciclos de manejo son el puente entre las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio, siendo las pruebas en ruta la referencia de la realidad, mientras que las pruebas en laboratorio siempre busca reproducirlas. Para que los resultados del laboratorio representen a la realidad, la metodología que estudia los métodos de diseño del ciclo de manejo y de cálculo de carga para la programación del dinamómetro para simular las fuerzas resistivas debe ser robusta y clara.

Los ciclos de manejo se componen de dos partes principales: Primero un perfil de velocidad contra tiempo que representa las velocidades que el vehículo normalmente alcanza en operación normal y de forma implícita los cambios en aceleración. Segundo un valor representativo de las fuerzas resistivas que el vehículo operando en condiciones normales debe vencer. Una vez conocidas las dos partes, se puede programar el ciclo y la carga debida a fuerzas resistivas en el chasis dinamométrico.

El ciclo de manejo se construye utilizando como fuente de información datos de sistemas de posicionamiento global (GPS) montados en los vehículos que son el objeto de evaluación y circulado sobre las rutas de interés en condiciones normales de operación.

Contextualizando el siguiente capítulo

En este artículo se ha presentado la respuesta a los interrogantes que nacieron al postular la construcción de una metodología como la que se ha venido describiendo, para poder dar dirección y forma al trabajo de investigación que se ha propuesto. Resaltando y argumentando que los métodos de prueba en ruta y prueba en laboratorio son relevantes en el análisis de consumo de energía en vehículos, por tanto son involucrados en la metodología acá presentada y los cuales deben ser

respaldados por un método sólido de desarrollo de ciclos de manejo y un método económico y eficaz de medición en ruta de energía al eje. En base a lo descrito a continuación se presenta el desarrollo del método para diseño y construcción de ciclos de manejo.

Capítulo 2 Diseño y construcción de algoritmo para crear ciclos de manejo a partir de datos de GPS

Los ciclos de manejo nacen de la necesidad de representar la operación real de los vehículos en las calles, sobre modelos y dinamómetros para evaluar consumo y emisiones de forma controlada y repetitiva. Los estándares Euro y Tier están basados en metodologías que comprenden la simulación de ciclos de manejo en dinamómetros. Este capítulo trata sobre cómo se construyen ciclos de manejo por medio de micro-ciclos a partir de datos provenientes de sistemas de posicionamiento global, que son económicos y fáciles de obtener.

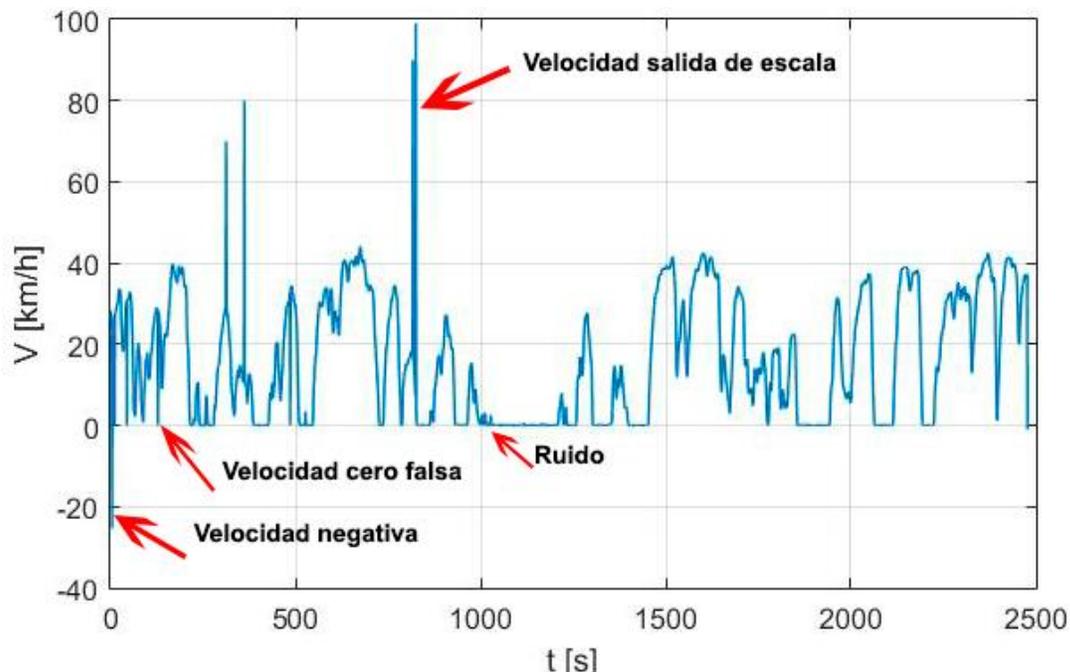
Los datos adquiridos son previamente filtrados y preparados para ser divididos en secciones denominadas micro-ciclos que son luego ensamblados bajo parámetros de velocidad, aceleración, desaceleración y paradas que caracterizan la ruta contenida en los datos que representan el modo de conducción del vehículo en operación real para obtener un ciclo de manejo ensamblado con las características de la ruta, finalmente se toma el ciclo ensamblado y se refina retirando valores de velocidad y aceleración atípicos y se caracterizan sus cualidades para presentar como ciclo oficial en algún tipo de aplicación, en este caso ciclos de manejo para evaluación de emisiones en la ciudad de Bogotá.

Procesamiento datos de sistema de posicionamiento global

Los datos que adquieren los sistemas de posicionamiento global normalmente son el insumo para la construcción de ciclos de manejo, sin embargo es frecuente la presencia de ruido, falta de secciones de datos porque la señal de los satélites se pierde, picos de velocidad, caídas de velocidad a cero (0) con el vehículo andando a una velocidad diferente, denominados datos atípicos y la presencia de ruido blanco. La presencia de estas anomalías en los datos afectaría las estadísticas de los datos típicos y como resultado el ciclo de manejo definido no sería representativo de los datos originales. Por tal motivo es necesario filtrar y preparar los datos de GPS antes de ser utilizados para generar un ciclo de manejo.

La Figura 2-1 muestra las anomalías mencionadas en un perfil de velocidad de un GPS NEO-6P (Ver anexo A).

Figura 2-1 Perfil de GPS sin filtrar



Fuente: GICAEPMA

La filtración de datos para construir un ciclo de manejo se puede describir por medio de seis (6) procedimientos.

1. Remover los datos duplicados y los datos con valores negativos de tiempo o diferentes pasos de tiempo.
2. Reemplazar los valores por fuera de escala en velocidad.
3. Remover las señales de velocidad cuando el vehículo está detenido.
4. Reemplazar los valores falsos de cero velocidades
5. Reparar los valores de aceleración fuera de rango
6. Retirar el ruido y acondicionar la señal final

Se han propuesto procedimientos de filtración compuestos por siete (7) filtros [28], en este artículo se usan seis (6), se descarta un filtro que propone reparar las secciones de datos dañadas. Se prefiere en esta situación retirar los dañados por que repararlos implica asumir valores de velocidad y aceleración que no son propios de la ruta desarrollada. El algoritmo desarrollado para el tratamiento de los datos de GPS lo encuentra en el anexo B. Algoritmo tratamiento datos GPS. Las relaciones lógicas y matemáticas utilizadas para la construcción del algoritmo se ilustran a continuación.

De los datos del GPS NEO-6P (Ver anexo A) se procesa las columnas de tiempo, velocidad, aceleración y pendiente bajo el algoritmo que se presenta en esta sección, son cuatro (4) columnas (Tiempo, delta de tiempo, velocidad y pendiente) y tantas filas como datos de GPS se hallan registrado y se deben presentar en un archivo de texto exportado desde Excel, el cual convierte el valor tipo de tiempo en Excel a un valor tipo número en archivo de texto, como se ilustra en la Figura 2-2.

Este tipo de archivo y organizado como muestra la Figura 2-2 lo puede leer el algoritmo y desarrolla el proceso de filtración.

Figura 2-2 Muestra de plantilla de archivo de Datos de GPS tomados en Bogotá para ingresar al algoritmo

VAM vehículos Bogotá muestra 1.txt: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
t [s] abs	t [s] rel	vel [km/h]	MAMSL [m]	
1.208055556	1.15741E-05	28.368	2611.56	
1.20806713	1.15741E-05	25.344	2611.56	
1.20806713	1.15741E-05	25.344	2611.56	
1.20806713	1.15741E-05	25.344	2611.56	
1.20806713	1.15741E-05	-25.344	2611.56	
1.208078704	1.15741E-05	22.68	2611.56	
.				
.				
.				
.				
n datos				

Fuente: GICAEPMA

1. Remover datos duplicados y negativos de tiempo

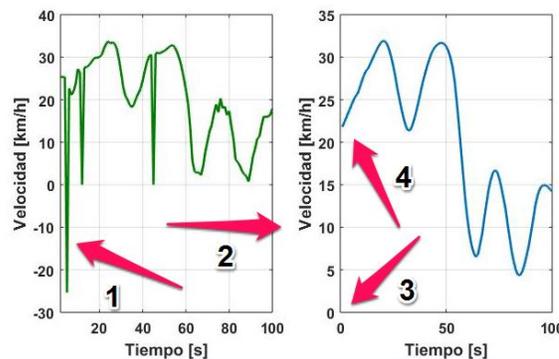
Se implementa un bucle en el algoritmo que itera dato a dato del registro de tiempo dentro de una condicional y lo compara con las tres condiciones dadas y si es necesario eliminar el dato, el algoritmo elimina la fila completa es decir toda la información asociada al dato de tiempo, se trabaja con una frecuencia de (1) Hertz o un dato por segundo, entonces no debe haber más de un dato registrado en un intervalo de tiempo de un segundo. El filtro se ilustra en la Ecuación 2-1 y en la Figura 2-3 se aprecia el efecto en la señal.

Ecuación 2-1 Filtro de datos repetidos y negativos de tiempo en datos de GPS

$$filtro_1(t) = \begin{cases} \text{Si } t = t + 1, & \text{eliminar dato} \\ \text{Si } t = t < 0, & \text{eliminar dato} \\ \text{Si no,} & \text{consevar dato} \end{cases}$$

Fuente: GICAEPMA

Figura 2-3 Efecto del filtro 1 en la señal de velocidad mostrando como se remueve valores negativos



Siga los números para notar la diferencia. Fuente: GICAEPMA

2. Reemplazar los valores salidos de escala en velocidad

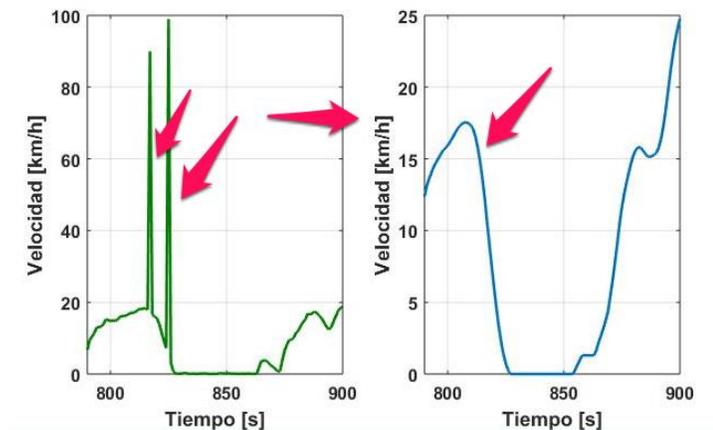
Se implementa un bucle en el algoritmo que itera dato a dato del registro de tiempo dentro de una condicional que compara la velocidad con la velocidad máxima permitida por el vehículo en operación real, si es mayor elimina los datos de tiempo y toda la información asociada a este y lo reemplaza por el valor promedio de la anterior y la siguiente fila de datos. El filtro se ilustra en la Ecuación 2-2 y en la Figura 2-4 se aprecia el efecto en la señal.

Ecuación 2-2 Filtro de datos de velocidad fuera de escala

$$filtro_2(v) = \begin{cases} Si \ v > v_{m\acute{a}xima} + 1, & eliminar \ dato \\ Si \ no, & consevar \ dato \end{cases}$$

Fuente: GICAEPMA

Figura 2-4 Efecto del filtro 2 en la señal de velocidad



Fuente: GICAEPMA

3. Remover las señales de velocidad cuando el vehículo está detenido

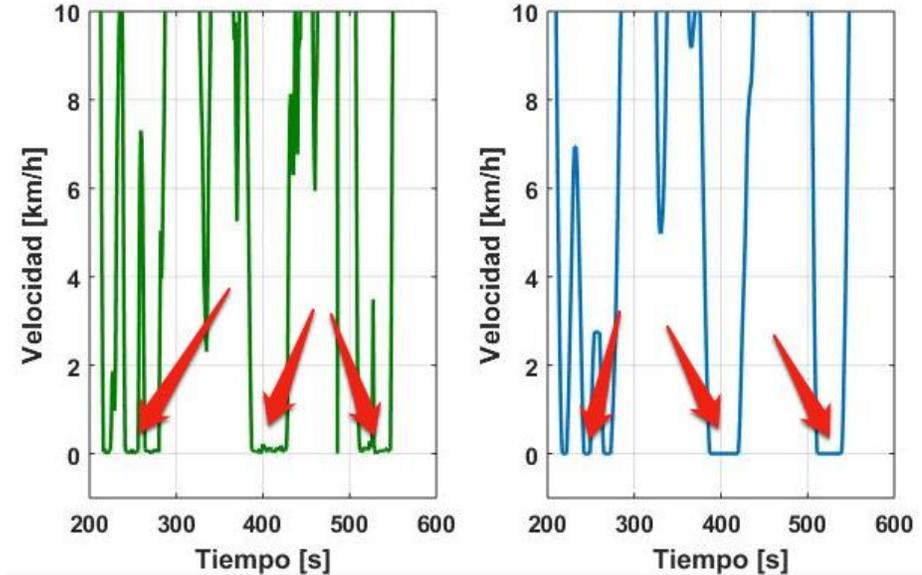
Se implementa un bucle en el algoritmo que itera dato a dato del registro de tiempo dentro de una condicional que convierte todos los datos que sean inferior a la velocidad de resolución del GPS NEO-6P (± 0.36 [km/h]) y la aceleración igual a cero (0) a cero(0). El filtro se ilustra en la Ecuación 2-3 y en la Figura 2-5 se aprecia el efecto en la señal.

Ecuación 2-3 Filtro de datos de velocidad diferentes de cero (0) cuando el vehículo está detenido

$$filtro_3(v) = \begin{cases} v = 0, & \text{Si } v > 0.36 \wedge a = 0 \\ v = v, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Fuente: GICAEPMA

Figura 2-5 Efecto del filtro 3 en la señal de velocidad



Fuente: GICAEPMA

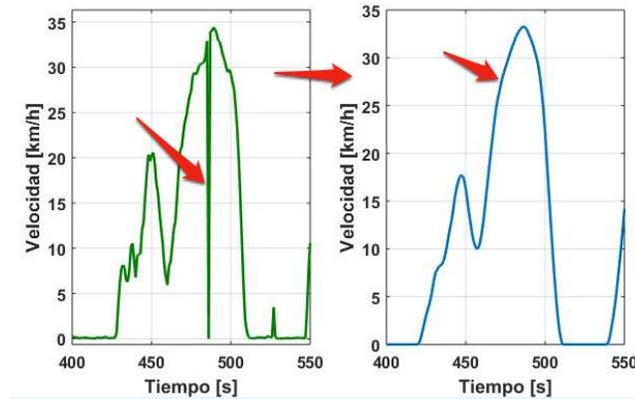
4. Reemplazar los valores falsos de cero velocidades

Se implementa un bucle en el algoritmo que itera dato a dato el registro de tiempo dentro de una condicional que compara la fila anterior a la fila en evaluación con la fila siguiente, es decir el valor en la fila (i-1) con el valor en la fila (i+1). Y si son diferentes de cero, pero la fila (i) es cero el algoritmo reemplaza el valor por el valor medio de los dos puntos. El filtro se ilustra en la Ecuación 2-4 y en la Figura 2-6 se aprecia el efecto en la señal.

Ecuación 2-4 Filtro de datos de valores falsos de cero velocidades

$$filtro_4(v) = \begin{cases} v = \frac{\vec{v}_{i-1} + \vec{v}_{i+1}}{2}, & \text{Si } \vec{v}_{i-1} \sim 0 \wedge \vec{v}_{i+1} \sim 0 \wedge \vec{v}_i = 0 \\ v = v, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Fuente: GICAEPMA

Figura 2-6 Efecto del filtro 4 en la señal de velocidad eliminando falsos ceros

Fuente: GICAEPMA

5. Reparar los valores de aceleración fuera de rango

La aceleración de referencia se obtiene como la derivada de la velocidad respecto al tiempo y los datos de aceleración experimentales son registrados por medio de un acelerómetro que viene en la unidad VAM (ver anexo A) que trae embebido el GPS y el acelerómetro ADXL 335, entrega aceleraciones en los tres ejes (x-y-z), se utiliza únicamente la aceleración en (x) y se eliminan los datos que sean mayor a la aceleración máxima obtenida de la derivada.

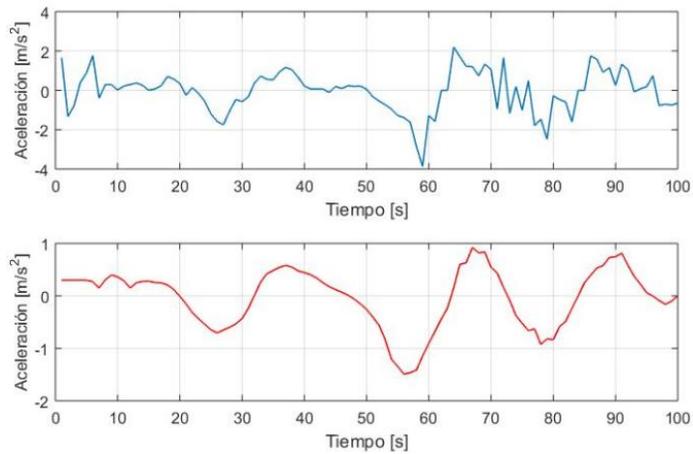
Se implementa un bucle en el algoritmo que itera dato a dato el registro de tiempo dentro de una condicional que compara datos experimentales con la aceleración máxima obtenida de la derivada de la velocidad y si la supera es reemplazada por el valor máximo. El filtro se ilustra en la Ecuación 2-5 y en la Figura 2-7 se aprecia el efecto en la señal.

Ecuación 2-5 Filtro de datos de valores fuera de escala de aceleración

$$filtro_5(a) = \left\{ \begin{array}{l} a = a_{maxima\ calculada}, \text{ Si } a > a_{maxima\ calculada} \\ a = a, \text{ de lo contrario} \end{array} \right\}$$

Fuente: GICAEPMA

Figura 2-7 Efecto del filtro 5 en la señal de aceleración

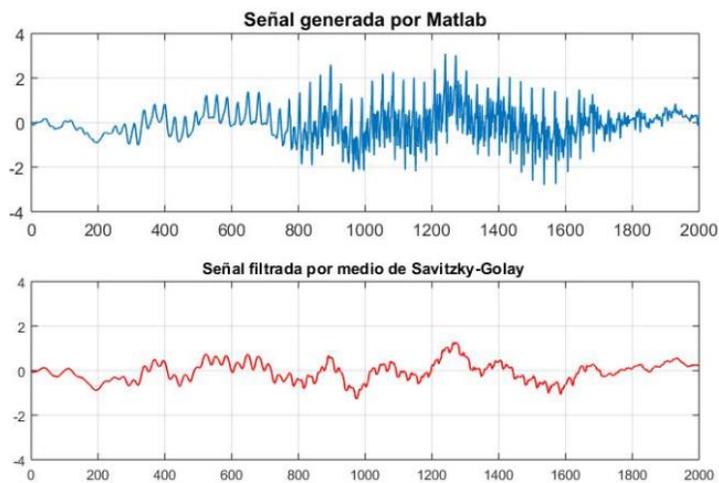


Fuente: GICAEPMA

6. Retirar el ruido y acondicionar la señal final

Por último, el algoritmo que implementa un filtro de media móvil basado en regresiones polinómicas que como resultado produce una función análoga a la de entrada, pero suavizada. El filtro se denomina Savitzky-Golay[29] y preserva las características de la señal inicial como los valores máximos y mínimos. En la **Figura 2-8** se aprecia el comportamiento del filtro utilizando una señal con ruido que trae Matlab para este tipo de pruebas.

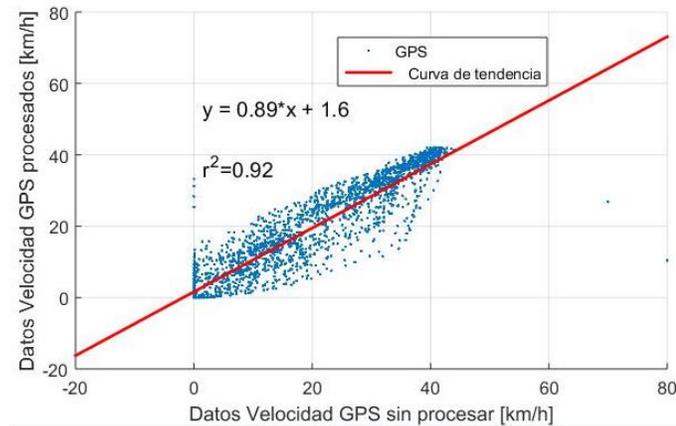
Figura 2-8 Señal con ruido contra señal filtrada usando Savitzky-Golay



Fuente: Matlab 2012a R

Después del procedimiento desarrollado los datos del GPS sin filtrar y los datos filtrados son correlacionado y el resultado se ilustra en la **Figura 2-9** y con factores de correlación (r^2) mayores al noventa por ciento (90 [%]) garantizando que la perdida de datos es despreciable y el resultado en calidad de los datos es notable.

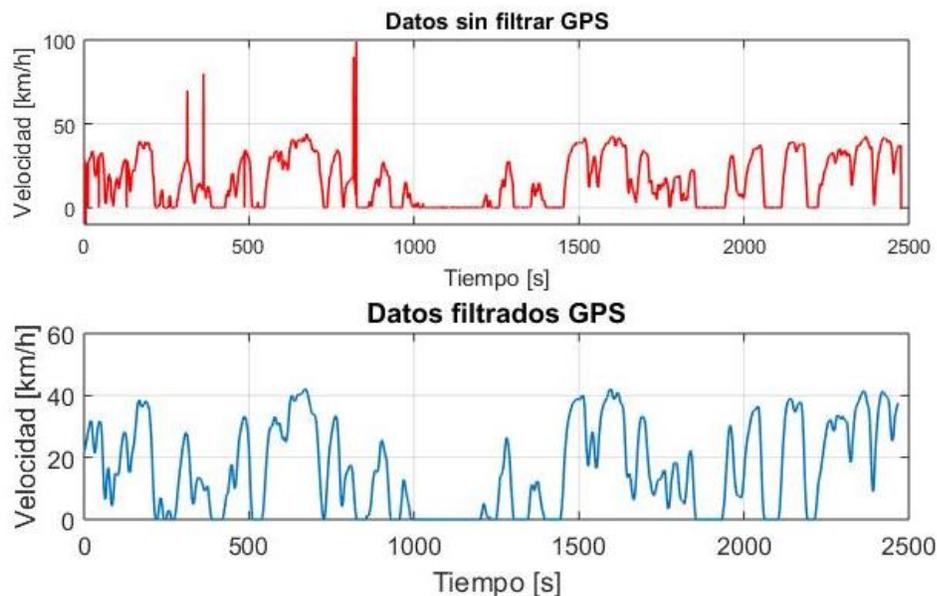
Figura 2-9 Correlación entre datos de GPS sin filtrar y datos filtrados



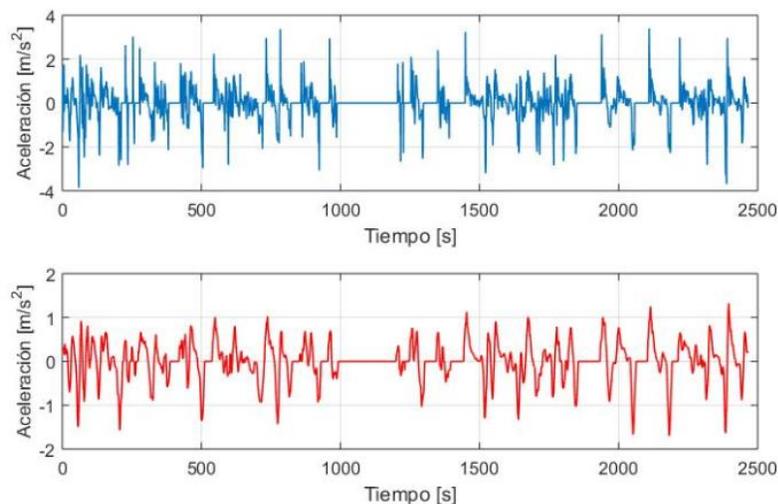
Fuente: GICAEPMA

Finalmente se aprecia el cambio de los datos registrados a los datos filtrados velocidad y aceleración en la **Figura 2-10** y la **Figura 2-11** respectivamente.

Figura 2-10 Perfil de velocidad de GPS sin filtrar y filtrado



Fuente: GICAEPMA
Figura 2-11 Perfil de aceleración de GPS sin filtrar y filtrado



Fuente: GICAEPMA

En la Tabla 2-1 se presenta la comparación de características de velocidad de los datos de GPS presentados.

Tabla 2-1 Comparación perfiles de datos originales GPS contra datos filtrados

Comparación perfiles GPS sin filtrar y filtrado		
Característica	Datos GPS sin filtrar	Datos GPS filtrados
Velocidad máxima [km/h]	99	42.1
Velocidad mínima [km/h]	-25.34	0
Velocidad media [km/h]	16.37	16.18
Desviación estándar vel. [km/h]	14.83	14.25
Aceleración máxima [m/s ²]	3.4	1.7
Aceleración mínima [m/s ²]	-3.87	-1.3
Aceleración promedio [m/s ²]	0.0028	0.0032
Desviación estándar ace. [m/s ²]	0.69	0.42
Factor de correlación	0.92	

Fuente: GICAEPMA

Respecto a los registros de pendiente, el GPS entrega una columna de datos de altura sobre el nivel del mar en metros [m], el procesamiento que se les aplica es pasarlo por dos filtros: el filtro (2) (ver la Ecuación 2-2) para remover datos atípicos y luego pasan los datos por el filtro Savitzky-

Golay para suavizar. Para conocer la pendiente en radianes [rad] o en grados [°] se procede como se lista a continuación:

1. Se integró numéricamente el perfil de velocidad para conocer el desplazamiento total y se generó un perfil acumulativo de desplazamiento, siguiendo el método formulado en la Ecuación 2-6.

Ecuación 2-6 Método numérico de integración Simpson 1/3 [30]

$$\int_{t_0}^t \vec{v} * dt = s = \sum_{i=1}^n \frac{h}{3} * (y_i + 4 * y_{i+1} + y_{i+2})$$

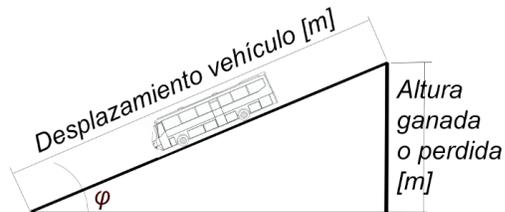
2. Se calculó las diferencias de desplazamiento segundo a segundo utilizando el resultado de la integral numérica del perfil de velocidad en metros [m].

3. Se calculó las diferencias de cambio en altura sobre el nivel del mar segundo a segundo, en metros [m].

4. Se calcula el ángulo que genera el seno de la diferencia de alturas con las diferencias de desplazamientos segundo a segundo, el signo de la pendiente dependerá de la dirección del vehículo: cuando va en ascenso la pendiente será negativa y en descenso positiva. La Figura 2-12 muestra el triángulo que conforman el desplazamiento del vehículo como hipotenusa, la altura ganada o perdida como cateto opuesto y el ángulo de inclinación o pendiente como (φ).

Conocidos los dos valores mínimos para resolver un Angulo en un triángulo rectángulo, se utiliza la Ecuación 2-7.

Figura 2-12 Triángulo ilustrando el ángulo de pendiente de una ruta para un vehículo



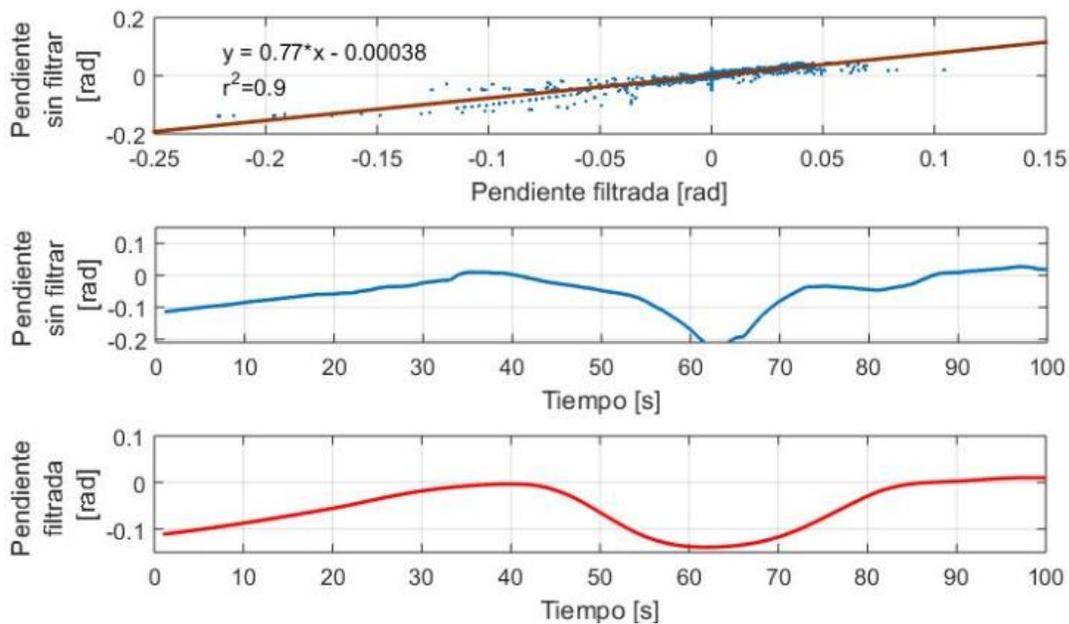
Fuente: GICAEPMA

Ecuación 2-7 Relación trigonométrica para conocer pendiente de la ruta

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{\pm \text{Altura ganada o perdida [m]}}{\text{Desplazamiento del vehículo [m]}}\right) = [\text{rad}]$$

La correlación, la señal sin procesar y la señal procesada de pendiente correspondiente a los datos que se han estado presentando como ejemplo, se aprecian en una muestra pequeña para notar el cambio en la Figura 2-13.

Figura 2-13 Procesamiento señal de pendiente GPS



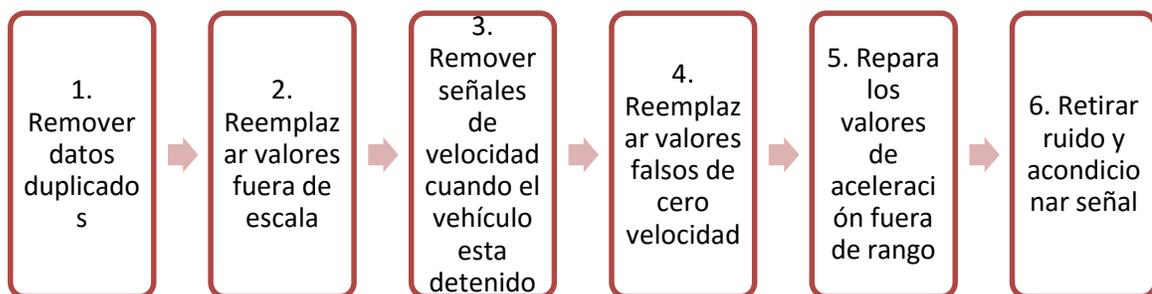
Fuente: GICAEPMA

El procedimiento presentado garantiza datos filtrados de GPS listos para ser procesados, en este caso para desarrollo de ciclos de manejo.

El algoritmo al final entrega una matriz con las columnas de tiempo [s], velocidad [km/h], aceleración [m/s²] y pendiente [°].

A continuación la Figura 2-14 se presenta el resumen del procedimiento de filtración.

Figura 2-14 Diagrama de proceso filtración de datos



Fuente: GICAEPMA

Diseño de ciclos de manejo a partir de Micro-ciclos

El diseño y la programación del ciclo de manejo para evaluar emisiones y consumo, es uno de los procedimientos más críticos, porque de su resultado depende que los valores obtenidos en los factores de emisión y de eficiencia sean representativos de la operación normal del vehículo.

El método que se trabaja en este artículo ha sido ya desarrollado e implementado en otros países. Por ejemplo implementaron el método de micro-ciclos junto con una metodología estocástica o no determinista [31], para crear un ciclo de manejo representativo del tráfico de vehículos eléctricos en la ciudad de Dublín capital de Irlanda. Dentro de sus resultados evidenciaron que el ciclo desarrollado representaba las dinámicas de consumo reales del vehículo.

También desarrollaron también un método usando como base los micro-ciclos [32], caracterizando con datos estadísticos los perfiles de velocidad y aceleración, para generar parámetros de comparación y poder relacionar las mismas características con los micro-ciclos y finalmente crear matrices de frecuencia

de velocidad y aceleración para comparar condiciones reales con los ciclos que se van ensamblando.

Construyeron un método a partir de micro-ciclos y análisis estadístico para desarrollar ciclos de manejo en la ciudad de Pune de la India [33], consideraron parámetros de velocidad media, aceleración media, desaceleración media y tiempos de parada para la construcción del ciclo, como resultado encontraron que el ciclo aunque era representativo de la gama de vehículos que midieron no podía extenderse a más aplicaciones.

Descripción método

El método desarrollado parte de tomar los datos preparados de GPS y caracterizarlos en ocho (8) medidas estadísticas: 1. Velocidad promedio, 2. Aceleración promedio, 3. Desaceleración promedio, 4. Porcentaje de tiempo acelerando, 5. Porcentaje de tiempo desacelerando, 6. Porcentaje de tiempo en paradas, 7. Velocidad RMS, 8. Porcentaje de cambio de posición de aceleración a desaceleración.

Bajo esas ocho (8) medidas de referencia se divide la matriz obtenida del GPS en micro-ciclos de cinco (5) segundos y se inicia un algoritmo que ensambla micro-ciclos bajo dos condiciones:

1. El ensamble debe ser del tamaño del ciclo deseado, ese tamaño oscila entre cinco (5) minutos y (20) minutos para los ciclos internacionales, por ejemplo el ciclo de conducción[34] presenta una duración de mil ochocientos setenta y cuatro segundos (1874 [s]) y es usado como base para las pruebas en laboratorio sobre dinamómetro para regularizar las emisiones bajo los niveles 1-2-3 (Tier 1-2-3). Y el ciclo que utiliza la Unión Europea para normalizar las emisiones[35] dura mil ochocientos segundos (1800 [s]). Los ciclos que ensambla el método presentado en este artículo son de cinco (5) minutos y el algoritmo da la opción de cambiar ese tiempo.

2. El ciclo construido debe cumplir con la condición de tener las medidas estadísticas de referencia dentro de un margen de

error inferior al cinco (5[%]) para garantizar un índice de correlación superior o igual a punto nueve (0.9).

Cuando el algoritmo ubica un ciclo de manejo que este dentro del margen de error establecido, construye dos matrices de frecuencia en velocidad y aceleración, una de los datos del GPS y otra de los datos del ciclo y calcula la correlación entre las dos matrices si es inferior a cero punto setenta y cinco (0.75) se debe cambiar el margen de error, en este algoritmo el margen de error establecido permite tener factores de correlación superiores a ese valor.

Sustento teórico del error

A medida que se amplía el margen de error, se reduce la correlación entre el ciclo y los datos reales. Para validar el error usado se crearon ciclos utilizando el mismo perfil de datos de GPS procesados en el algoritmo de diseño de ciclos pero se varió el error permisible de cinco (5) hasta quince (15), el resultado se aprecia en la **Tabla 2-2**.

Tabla 2-2 Comparación entre la variación de error permisible y la correlación entre ciclo de manejo y GPS

Comparación error generado contra factor de correlación	
Error permisible	Correlación ciclo contra GPS
5	0.96
10	0.90
15	0.87

Fuente: GICAEPMA

Matriz de frecuencias

El procedimiento para comprobar el nivel de correlación entre los datos utilizados de GPS y los datos del ciclo de manejo, utiliza matrices de frecuencias de velocidad y aceleración como fundamento. Estas matrices se construyen bajo el siguiente procedimiento.

1. Se determina de valor de velocidad máxima y mínima, y el valor de aceleración máximo y mínimo. Se calcula

la diferencia de cada uno como se indica en la Ecuación 2-8 y la Ecuación 2-9.

Ecuación 2-8 Diferencia máxima velocidad

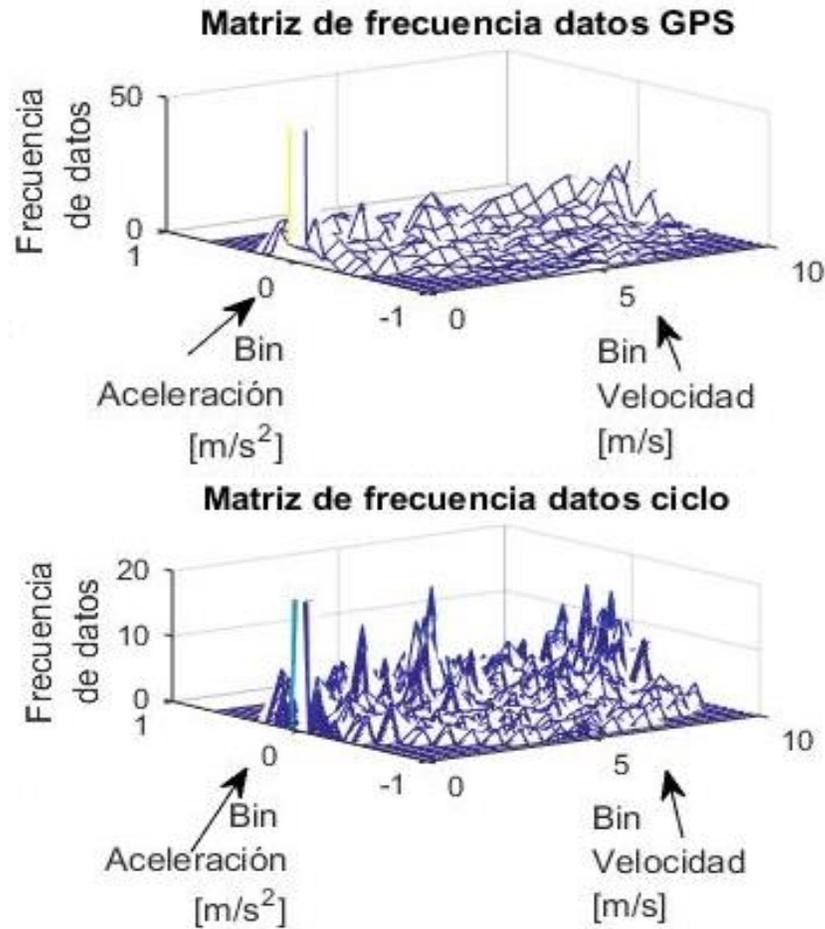
$$Diferencia = \vec{v}_{m\acute{a}xima} - \vec{v}_{m\acute{i}nima}$$

Ecuación 2-9 Diferencia máxima aceleración

$$Diferencia = \vec{a}_{m\acute{a}xima} + \vec{a}_{m\acute{i}nima}$$

2. Se divide cada diferencia en intervalos denominados (bins) o cajas, entre más intervalos la matriz de frecuencia se refina más y la correlación se hace más fuerte, cuando se comparan las matrices del ciclo y de los datos de GPS. Pero la demanda computacional es mayor y el tiempo que le toma diseñar el ciclo se incrementa. En este método se implementaron veinticinco (25) cajas para cada diferencia y se obtuvieron valores de correlación superiores a punto nueve (0.9).
3. Se implementa un algoritmo que recorre segundo a segundo los datos de los perfiles de velocidad y aceleración del GPS y del ciclo de manejo y va sumando una unidad a la caja donde corresponda la pareja de datos (velocidad y aceleración) para un tiempo determinado. El resultado obtenido se ilustra en la Figura 2-15.

Figura 2-15 Matrices de frecuencia obtenidas para una muestra de datos de GPS y el ciclo de manejo construido con los mismos datos



Fuente: GICAEPMA

Calculo de factor de correlación

El factor se calcula para dos planos de datos o dos matrices que son del mismo tamaño, lo que hace es comparar la distribución de las frecuencias en cada matriz, en este caso se implementan matrices de veinticinco por veinticinco (25 x 25) datos y se trabaja la relación mostrada en la Ecuación 2-10.

Este método de comparación entre la intensidad o las frecuencias de cada matriz, consiste en la localización de la misma casilla (m, n) en cada matriz una por una, en este caso

se remite a cada matriz y evalúa la diferencia entre el valor de frecuencia almacenada en cada casilla y el valor medio de la respectiva matriz y los va sumando, esta operación representa desviación de cada dato respecto a la frecuencia media de toda la matriz.

Luego divide el anterior resultado entre el valor normalizado (elevar al cuadrado la diferencia) y va sumando los resultados.

Ecuación 2-10 Calculo de factor de correlación para matrices del mismo tamaño

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) * (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2) * \sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2}}$$

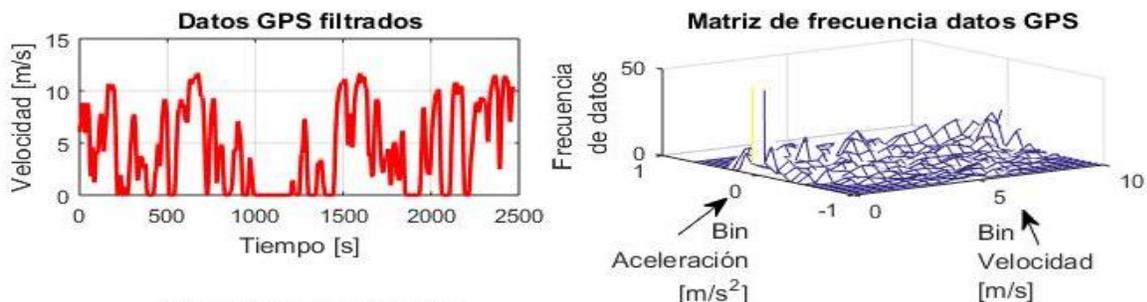
Donde $(\bar{A}$ y $\bar{B})$ son el promedio de todos los elementos de cada matriz definido en la Ecuación 2-11.

Ecuación 2-11 Promedio de los elementos de una matriz

$$\bar{A} = \frac{\sum_m \sum_n A_{mn}}{m * n}$$

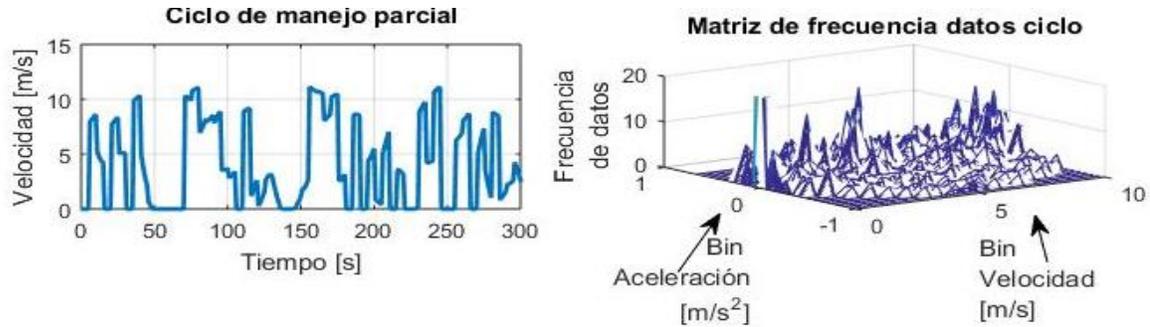
Una vez el algoritmo ha encontrado un ciclo de manejo adecuado que sea representativo del perfil de velocidad de GPS usado. El ciclo obtenido y las matrices de frecuencias junto con el factor de correlación obtenido son presentados como se ilustra en la Figura 2-16.

Figura 2-16 Perfil GPS filtrado acompañado de su matriz de frecuencia



Fuente: GICAEPMA

Figura 2-17 Perfil ciclo de manejo junto con su matriz de frecuencia ($r=0.95$ respecto a los datos de la Error! Reference source not found.)



Fuente: GICAEPMA

Ajuste de ciclo a condiciones reales

Una vez obtenido un ciclo de manejo parcial como el ilustrado en la Figura 2-17 se debe ajustar. Al momento de ensamblar micro-ciclos el algoritmo genera aceleraciones altas que no son capaces de alcanzar los vehículos y que tampoco se presentan en los datos del GPS, son producto de anidar micro-ciclos, luego se debe filtrar el ciclo entregado y suavizarlo.

Previo al proceso de filtrado el ciclo se extiende en tamaño, a la matriz de datos se le anexan cinco (5) filas de ceros (0) para señalar el inicio y al final del ciclo. Tal que se aprecie que el vehículo inicio el trayecto detenido y termina detenido o velocidad cero (0).

Condición de máxima aceleración y máxima desaceleración

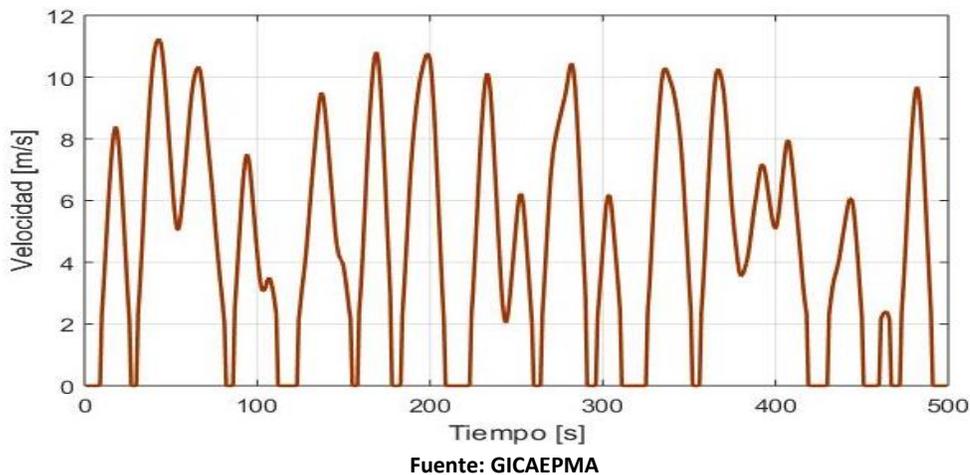
La condición del filtro establecido al perfil diseñado es una condicional simple: si la diferencia de aceleración en el intervalo de tiempo evaluado es superior a la aceleración máxima presentada en los datos del GPS, se abre el ciclo en esa sección y se introduce tanto tiempo como sea necesario en segundos para alcanzar la misma velocidad de la sección que contiene la diferencia de aceleración atípica, pero usando la aceleración promedio de los datos de GPS procesados.

La condición aplica también para la desaceleración, si la diferencia en el intervalo de tiempo evaluada es inferior a la aceleración mínima presentada en los datos del GPS, se abre el ciclo en esa sección y se introduce tanto tiempo como sea necesario, para desacelerar hasta la misma velocidad, pero

usando la desaceleración promedio de los datos de GPS procesados.

Finalmente se suaviza utilizando el filtro Savitzky-Golay para obtener un resultado como el que se aprecia en la Figura 2-18.

Figura 2-18 Ciclo de manejo entregado por el algoritmo desarrollado



Caracterización del ciclo de manejo

El ciclo definido debe ser simulado en laboratorio sobre dinamómetro o con modelación de dinámica vehicular para conocer la relación entre el consumo energético real, el nivel de emisiones real y los valores obtenidos por medio del ciclo. Para conocer en detalle el ciclo de manejo se caracterizan sus variables lo mejor posible, Se proponen un lista de veintisiete parámetros denominados *Parámetros Art.kinema* que identifican las propiedades del ciclo [36].

Dentro de sus resultados presentan una compilación de doscientos cincuenta y seis (256) ciclos de manejo para diferentes aplicaciones, ciudades, vehículos y pruebas, que son reconocidos por el departamento de transporte del Reino Unido. Los parámetros indicados se ilustran de la Ecuación 2-12 a la Ecuación 2-39. Y están incorporados dentro del algoritmo de diseño de ciclos (ver anexo B).

Ecuación 2-12 Distancia total [km]

$$s = \frac{1}{3.6} \int_{t_0}^{t_n} \vec{v} * dt$$

Ecuación 2-13 Tiempo total [s]

$$t_{total} = (t_2 - t_1) + \sum_{i=2}^n t_2 - t_{i-1}$$

Ecuación 2-14 Tiempo de conducción [s]

$$t_{conducción} = t_{total} - t_{paradas}$$

Ecuación 2-15 Tiempo en velocidad crucero [s]

$$t_{crucero} = t_{manejo} - t_{aceleración} - t_{desaceleración}$$

Ecuación 2-16 Tiempo acelerando [s]

$$t_{aceleración} = \left\{ \begin{array}{ll} t_2 - t_1 & \text{si } \vec{a}_1 > \vec{a}_{limite} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right. + \sum_{i=2}^n \left\{ \begin{array}{ll} t_i - t_{i-1} & \text{si } \vec{a}_1 > \vec{a}_{limite} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right\}$$

Ecuación 2-17 Tiempo desacelerando [s]

$$t_{desaceleración} = \left\{ \begin{array}{ll} t_2 - t_1 & \text{si } \vec{a}_1 < -\vec{a}_{limite} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right. + \sum_{i=2}^n \left\{ \begin{array}{ll} t_i - t_{i-1} & \text{si } \vec{a}_1 < -\vec{a}_{limite} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right\}$$

Ecuación 2-18 Tiempo de paradas [s]

$$t_{paradas} = \left\{ \begin{array}{ll} t_2 - t_1 & \text{si } (\vec{v}_1 = 0 \wedge \vec{a}_1 = 0) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right. + \sum_{i=2}^n \left\{ \begin{array}{ll} t_i - t_{i-1} & \text{si } (\vec{v}_1 = 0 \wedge \vec{a}_1 = 0) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right\}$$

Ecuación 2-19 [%] de tiempo conduciendo

$$\%_{conduciendo} = \frac{t_{conducción}}{t_{total}}$$

Ecuación 2-20 [%] de tiempo en velocidad crucero

$$\%_{crucero} = \frac{t_{crucero}}{t_{total}}$$

Ecuación 2-21 [%] de tiempo acelerando

$$\%_{acelerando} = \frac{t_{acelerando}}{t_{total}}$$

Ecuación 2-22 [%] de tiempo desacelerando

$$\%_{desacelerando} = \frac{t_{desacelerando}}{t_{total}}$$

Ecuación 2-23 [%] de tiempo en paradas

$$\%_{paradas} = \frac{t_{paradas}}{t_{total}}$$

Ecuación 2-24 Velocidad promedio por ciclo [km/h]

$$\tilde{v}_{ciclo} = 3.6 * \frac{S}{t_{total}}$$

Ecuación 2-25 Velocidad promedio conduciendo [km/h]

$$\tilde{v}_{conduciendo} = 3.6 * \frac{S}{t_{conducción}}$$

Ecuación 2-26 Desviación estándar de la velocidad [km/h]

$$\vec{v}_{desv} = \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n \vec{v}_i^2} \quad \text{Donde } \vec{v}_{desv} \text{ corresponde a } \tilde{v}_{ciclo}$$

Ecuación 2-27 Velocidad máxima [km/h]

$$\vec{v}_{max} = \text{maximo ciclo de manejo} * 3.6$$

Ecuación 2-28 Aceleración promedio por ciclo [m/s²]

$$\vec{a}_{ciclo} = \frac{1}{t_{total}} * \sum_{i=1}^n \vec{a}_i$$

Ecuación 2-29 Promedio aceleración [m/s²]

$$\vec{a}_{aceleración} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{ll} 1 & \text{si } \vec{a}_i \geq 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right) \right\}^{-1} * \sum_{i=2}^n \left(\begin{array}{ll} a_i & \text{si } \vec{a}_i \geq 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right)$$

Ecuación 2-30 Promedio desaceleración [m/s²]

$$\vec{a}_{desaceleración} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{ll} 1 & \text{si } \vec{a}_i < 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right) \right\}^{-1} * \sum_{i=2}^n \left(\begin{array}{ll} a_i & \text{si } \vec{a}_i < 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right)$$

Ecuación 2-31 Desviación estándar de aceleración total [m/s²]

$$\vec{a}_{aceleración total} = \sigma_{aceleración total} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n \vec{a}_i^2}$$

Ecuación 2-32 Desviación estándar de aceleración positiva [m/s²]

$$\vec{a}_{aceleración} = \sigma_{aceleración} = \sqrt{\frac{1}{n_{aceleración} - 1} * \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{ll} \vec{a}_i^2 & \text{si } (a_i > 0) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{array} \right)}$$

$$\text{donde } n_{\text{aceleración}} = \sum_{i=1}^n \begin{matrix} 1 & \text{si } \vec{a}_i > 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{matrix}$$

Ecuación 2-33 Numero de aceleraciones [#]

$$\vec{a}_{\text{cantidad}} = \sum_{i=1}^n \begin{matrix} 1 & \text{si } \vec{a}_i > \vec{a}_{\text{limite}} \wedge \vec{a}_{i-1} \leq \vec{a}_{\text{limite}} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{matrix}$$

Ecuación 2-34 Aceleraciones por kilómetro [# / km]

$$\frac{\text{aceleraciones}}{\text{kilometro}} = 1000 * \frac{\vec{a}_{\text{cantidad}}}{s}$$

Ecuación 2-35 Cantidad de paradas

$$\#_{\text{paradas}} = \sum_{i=1}^n \begin{matrix} 1 & \text{si } \vec{v}_i = 0 \wedge \vec{a}_i = 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{matrix}$$

Ecuación 2-36 Promedio de duración por parada [s / #]

$$\text{tiempo por parada} = \frac{t_{\text{paradas}}}{\#_{\text{paradas}}}$$

Ecuación 2-37 Valor cuadrático medio velocidad [km/h]

$$RMS_{\vec{v}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{total}}} * \int_0^{t_{\text{total}}} (\vec{v}_i) * dt}$$

Ecuación 2-38 Valor cuadrático medio aceleración [m/s²]

$$RMS_{\vec{a}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{total}}} * \int_0^{t_{\text{total}}} (\vec{a}_i) * dt}$$

Ecuación 2-39 Pendiente promedio [%]

$$Pendiente_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n (pendiente_i)}{n} * 100\%$$

Ejemplo de ciclo de manejo totalmente caracterizado

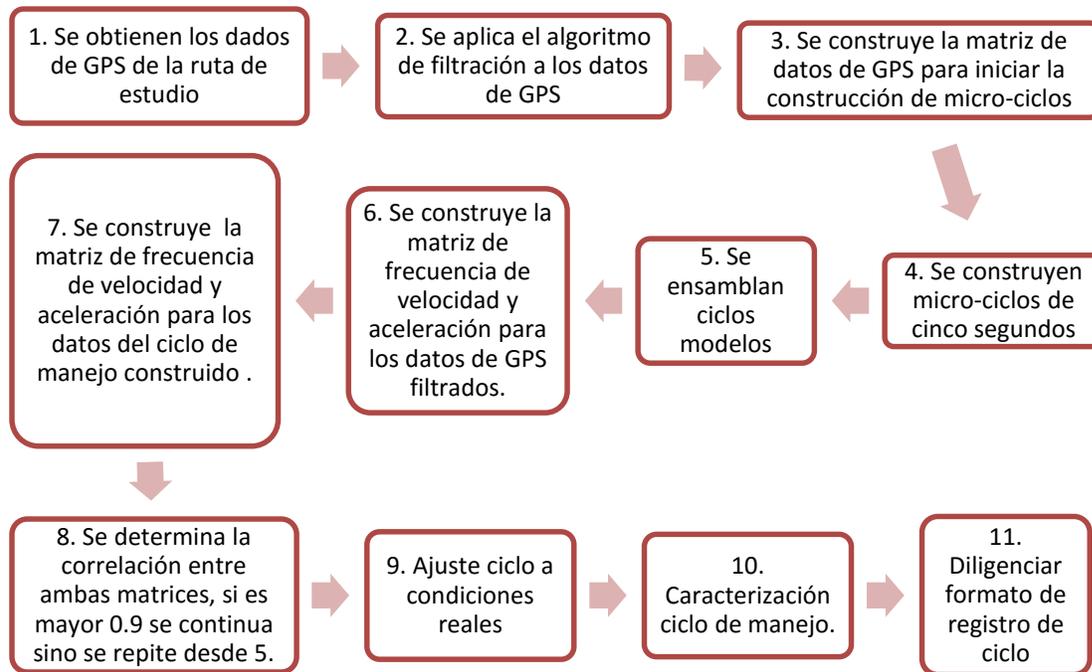
Finalmente se presenta como resultado del ejercicio de preparación de datos, diseño del ciclo, ajuste y suavización del ciclo y caracterización del mismo, un ejemplo de la forma que se considera apropiada presentar los datos mencionados dentro de una metodología.

1. Fecha
2. Lugar de procedencia
3. Nombre del ciclo
4. Programa de evaluación al que pertenece
5. Categoría vehicular al que aplica
6. Carga en porcentaje de potencia máxima motor simulada en dinamómetro.
7. Imagen perfil de datos de GPS
8. Imagen perfil de velocidad ciclo
9. Imagen matriz de frecuencia datos GPS
10. Imagen matriz de frecuencia datos Ciclo
11. Valor de correlación entre matrices
12. Parámetros Art. Kinema
13. Observaciones

Se presenta un formato con las características mencionadas para incluir dentro del diseño de la metodología (ver **Tabla 2-3**).

Diagrama de flujo diseño de ciclo de manejo

Figura 2-19 Diagrama de proceso para diseño de ciclo de manejo



Fuente: GICAEPMA

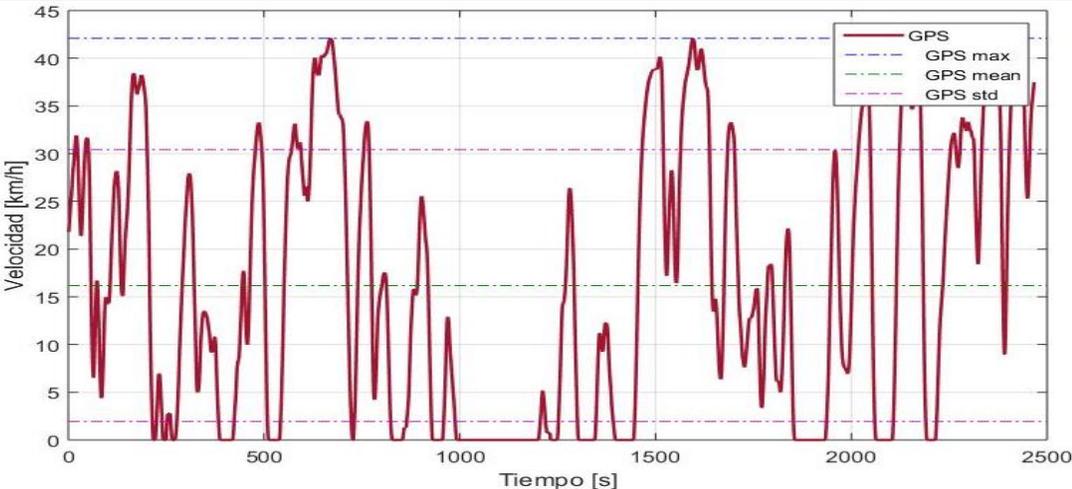
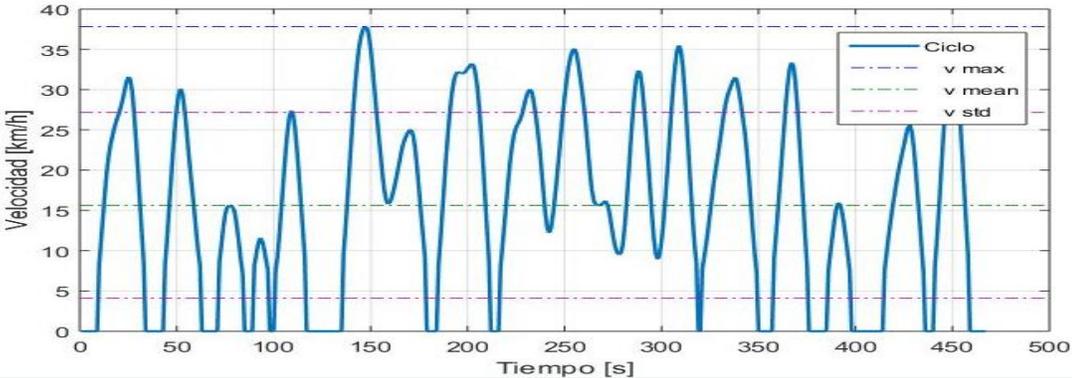
Contextualizando el siguiente capítulo

Este artículo presento en detalle el desarrollo del algoritmo para diseño de ciclos de manejo, donde se entrega en la **Tabla 2-3** lo que se considera en esta investigación debería formar parte de la metodología en desarrollo y respaldado por los algoritmos.

El ejercicio de simulación en dinamómetro requiere también conocer el valor de carga media debido a fuerzas resistivas, en la cual opero el vehículo en condiciones normales para ser programado y se obtiene por medio de análisis de dinámica vehicular.

Este análisis de fuerzas resistivas y carga media en ruta es presentado en el capítulo (3) y (4), en la **Tabla 2-3** se presentan todas las características relacionadas con él.

Tabla 2-3 Formato de registro de datos para ciclos de manejo

Fecha: Año/mes/día	Ciudad: Bogotá	País: Colombia	N° _____
Nombre del ciclo: Perfil de prueba de algoritmo para diseño de ciclos de manejo			
Programa de evaluación al que pertenece: Metodología para establecer Factores eficiencia [kWh/km] y de Emisiones en [gr/kWh] de Vehículos			
Categoría vehicular: (M) / buses		[%] de carga en Dinamómetro⁵: xx	
Perfil velocidad datos GPS (Muestra):			
			
Perfil velocidad datos Ciclo de manejo:			
			

⁵ La carga que se debe simular en el ciclo es presentada como un porcentaje de la potencia máxima del motor del vehículo y es descrita en el capítulo (4) de esta tesis.

Matriz de frecuencia datos GPS:		Matriz de frecuencia datos ciclo de manejo:	
Factor de correlación entre la matrices: $r = \underline{0.96}$			
Parámetros Art. Kinema:			
1. Distancia total [km]	0.56	15. Velocidad promedio [km/h]	16.17
2. Tiempo total [s]	467	16. Velocidad promedio conduciendo [km/h]	19.2
3. Tiempo de conducción [s]	376	17. Desviación estándar de la velocidad [km/h]	11.52
4. Tiempo en velocidad crucero [s]	13	18. Velocidad máxima [km/h]	37.8
5. Tiempo acelerando [s]	195	19. Aceleración promedio por ciclo [m/s ²]	0.0001
6. Tiempo desacelerando [s]	168	20. Promedio aceleración [m/s ²]	0.23
7. Tiempo de paradas [s]	91	21. Promedio desaceleración [m/s ²]	-0.35
8. [%] de tiempo conduciendo	80	22. Desviación estándar de aceleración total [m/s ²]	0.24
9. [%] de tiempo en velocidad crucero	2.7	23. Desviación estándar de aceleración positiva [m/s ²]	0.16
10. [%] de tiempo acelerando	41.2	24. Numero de aceleraciones [#]	128
11. [%] de tiempo desacelerando	35.9	25. Aceleraciones por kilómetro [# / km]	228
12. [%] de tiempo en paradas	20	26. Cantidad de paradas	13
13. Promedio de duración por parada [s / #]	7	27. Valor cuadrático medio aceleración [m/s ²]	0.3821
14. Valor cuadrático medio velocidad [km/h]	19.2	28. Pendiente promedio [%]	2.1
Observaciones: Este es un ciclo ejemplo construido paso a paso para ilustrar el método desarrollado en este artículo. Junto con este documento se debe anexar el perfil de velocidad programado en dinamómetro, ver (anexo C. Guía de programación ciclo dinamómetro)			

Capítulo 3 . Modelo de dinámica vehicular longitudinal de bicicleta para evaluar consumo energético

La modelación de dinámica longitudinal se utiliza para analizar el comportamiento que tiene un vehículo en condiciones de aceleración, desaceleración, frenado, velocidad en la dirección de avance, consumo de energía y comportamiento de las fuerzas que intervienen en el plano longitudinal del vehículo.

Este capítulo trata de la implementación de un modelo de bicicleta simple en dinámica longitudinal, para simular vehículos de tipología (M) o buses de transporte de pasajeros con dos ejes y sistema de tracción al eje trasero, recorriendo diferentes perfiles de velocidad de ciclos de manejo con diferentes estados de carga y pendiente en una sola dirección, controlando el torque que debería entregar el motor de combustión interna (MCI) para poder seguir el ciclo de manejo por medio del perfil de aceleración y funciones de comparación de diferencias de aceleración objetivo y actual.

El modelo no contempla la dinámica del motor. Como resultado se obtienen consumos de energía al freno o trabajo entregado al eje y energía disipada debido a fuerzas resistivas para buses desde dos toneladas (2 [Tn]) tipo micro-bus a dieciocho toneladas (18 [Tn]) tipo articulado (los articulados se simplifican a un vehículo de dos ejes en la modelación).

Modelación vehículo

El modelo de dinámica longitudinal vehicular de bicicleta implementado en este artículo se utiliza para:

1. Simular perfiles de GPS filtrados y ciclos de manejo contruidos para conocer el consumo.
2. Calcular factores teóricos de eficiencia energética en unidad de energía consumida por kilómetro desarrollado.
3. Calcular las pérdidas de energía debido a fuerzas resistivas que afectan al vehículo en operación normal para ser programadas en el dinamómetro en la simulación de ciclos de manejo.

Los alcances del modelo son:

1. El modelo permite simular la dinámica longitudinal del vehículo, controlando el torque entregado que debería entregar el motor de combustión interna al sistema de transmisión del vehículo para seguir el perfil de velocidad y la carga media de fuerzas resistivas de interés.

Las restricciones del modelo son:

1. El modelo no evalúa condiciones de operación críticas como frenado en seco, deslizamiento de ruedas excesivo, aceleraciones a fondo, pendientes superiores al veinte por ciento (20 [%]).
2. El modelo no contempla un modelo de rueda.
3. El modelo considera al vehículo y las ruedas como una sola unidad, por tanto, no se consideran la suspensión del mismo.
4. Los vehículos que son modelados deben cumplir los siguientes requerimientos: el vehículo debe ser de

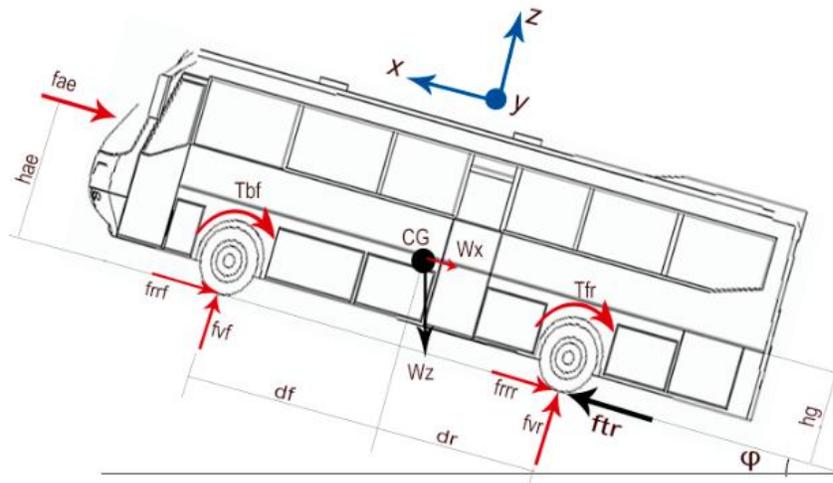
tracción trasera, el diferencial del sistema de transmisión deber simple sin relación de velocidad adicional o doble relación, se debe conocer las características técnicas del motor, del sistema de transmisión, capacidad de carga en cada eje, dimensiones principales del vehículo altura, ancho, distancia entre ejes, referencia de ruedas, centro de gravedad, centro de presión aerodinámico.

Modelo de bicicleta en dinámica longitudinal

En la construcción del modelo matemático se utiliza como diagrama de cuerpo libre la **Figura 3-1**, allí se representan todas las fuerzas involucradas en la dinámica longitudinal del vehículo del modelo desarrollado. Siguiendo las pautas de sentido y dirección del estándar [37].

El modelo está compuesto por tres ecuaciones principales: sumatoria de fuerzas en el eje (x) (**Ecuación 3-1**) o sentido de desplazamiento longitudinal del vehículo, sumatoria de fuerzas en el eje (z) o eje vertical y sumatorias de momentos entorno al centro de gravedad (CG) del vehículo o eje (y).

Figura 3-1 Diagrama de cuerpo libre vehículo



Fuente: GICAEPMA

Ecuación 3-1 Dinámica longitudinal ecuación principal

$$\sum_{i_x=1}^n f_{i_x} = mv * \frac{dv}{dt}$$

La Ecuación 3-1 es expandida y presentada en la Ecuación 3-2 donde la fuerza de tracción en el eje trasero (ftr) generada desde el motor del vehículo y amplificadas o reducidas por medio del tren de transmisión del vehículo, produce el cambio de estado en el mismo.

Las fuerzas de resistencia a la rodadura del eje trasero (frrr) y del eje delantero (frrf) generadas por efecto de deformación de la rueda al contacto con el suelo se oponen a la fuerza de transmisión del vehículo (ftr). El mismo efecto produce la fuerza de resistencia aerodinámica (fae) generada por la interacción del vehículo con el viento producido por el aire del entorno, dependiendo de la dirección del mismo respecto al vehículo se puede oponer o sumarse a la dirección de la fuerza de tracción (ftr), en este modelo el viento siempre se asume en dirección opuesta a la fuerza de tracción.

Cuando el vehículo está en una pendiente genera una componente, su peso (Wx) que puede estar en el mismo sentido de la fuerza de tracción cuando el vehículo está descendiendo en la pendiente, o contrario a la fuerza de tracción produciendo más carga en el vehículo cuando este está ascendiendo.

Las fuerzas producidas al momento de frenar el vehículo sin realizadas por el mecanismo de frenado en cada eje, cada momento dividido entre el radio efectivo de la rueda genera las fuerzas de frenado en el eje delantero (Tbf/reff) y en el eje trasero (Tbr/reff).

Ecuación 3-2 Expansión ecuación 3-1 para vehículo con tracción en el eje trasero

$$\frac{dv}{dt} = \left(ftr - frrf - frrr - fae - Wx - \frac{Tbr}{reff} - \frac{Tbf}{reff} \right) / mv$$

La sumatoria de las fuerzas mencionadas divididas entre la masa efectiva del vehículo (mv) son equivalentes a la

aceleración del vehículo y se convierte en la ecuación principal del modelo.

La masa equivalente del vehículo (mv) comprende la suma de las inercias asociadas a los cuerpos rotativos del tren de transmisión y el peso del vehículo. Gillespie[38] pág. 27 postula un factor de masa que involucra los elementos mencionados (Ecuación 3-3).

Ecuación 3-3 Factor de masa del tren de transmisión

$$fm = 1.004 + 0.0025 * (n_i * n_d)^2$$

Luego la masa efectiva (mv) del vehículo es la multiplicación de la masa del vehículo (m) por el factor de masa (Ecuación 3-4).

Ecuación 3-4 Masa efectiva del vehículo

$$mv = fm * m$$

La sumatoria de momentos (Ecuación 3-5) es expandida en la Ecuación 3-6 donde la fuerza vertical en el eje trasero (fvr), multiplicada por la distancia al centro de gravedad del vehículo desde el eje trasero (dr) produce un momento de fuerza positivo junto con el momento generado por la fuerza de resistencia a la rodadura ($mur * fvr * hg$) generada sobre el mismo eje, donde (mur) es un coeficiente de fricción y (hg) corresponde a la altura desde el suelo al centro de gravedad del vehículo (CG). Sumado a este, está el momento generado por la resistencia a la rodadura en el eje delantero ($mur * fvf * hg$).

Ecuación 3-5 Sumatoria de momentos en torno al eje y del vehículo en el centro de gravedad

$$\sum_{j_y=1}^n M_{j_y} = 0$$

Cuando el vehículo está frenando se generan dos momentos, uno en cada eje del vehículo $\left(\frac{T_{br}}{r_{eff}} * hg + \frac{T_{bf}}{r_{eff}} * hg\right)$.

A este grupo de momentos se restan los momentos generados por la fuerza vertical frontal, multiplicada por la distancia al centro de gravedad del vehículo ($f_{vf} * df$) y el generado por la fuerza de tracción del vehículo multiplicada por la altura al centro de gravedad del vehículo ($f_{tr} * hg$).

Ecuación 3-6 Expansión de sumatoria de momentos

$$f_{vr} * dr - f_{vf} * df - f_{tr} * hg + m_{ur} * f_{vr} * hg + m_{ur} * f_{vf} * hg + \frac{T_{br}}{r_{eff}} * hg + \frac{T_{bf}}{r_{eff}} * hg = 0$$

La última fuerza que produce momento respecto al centro de gravedad (CG) del vehículo es la resistencia aerodinámica (f_{ae}), sin embargo dependiendo de la diferencia entre la altura del centro de presión (h_{ae}) y la altura del centro de gravedad (h_g) del vehículo este momento puede ser positivo o negativo, en el tipo de vehículo que se manejan en este artículo (buses), el centro de presión está ubicado por encima del centro de gravedad del vehículo porque la altura del vehículo respecto a la ubicación del centro de gravedad es dos veces mayor, esto produce un momento de fuerza negativo.

La sumatoria de los momentos descritos es igual a cero (0) para garantizar la estabilidad del vehículo, en este modelo no se involucra suspensión por lo tanto la rotación en el eje (y) se desprecia.

La sumatoria de fuerzas en el eje vertical del vehículo (Ecuación 3-7) es expandida y descrita en la Ecuación 3-8 donde la suma de la fuerza vertical del eje delantero (f_{vf}) y vertical eje trasero son la distribución de la componente vertical del peso del vehículo (W_z).

Ecuación 3-7 Sumatoria de fuerzas en el eje (z) del vehículo

$$\sum_{k_z=1}^n f_{k_z} = 0$$

Ecuación 3-8 Expansión sumatoria fuerza en el eje (z)

$$f_{vr} + f_{vf} - W_z = 0$$

Fuerzas de resistencia al desplazamiento del vehículo

Se deben considerar como resistivas todas las fuerzas que se opongan al desplazamiento o cambio de estado del vehículo. Fricción es la base de todas las fuerzas resistivas involucradas, iniciando desde el tren de transmisión en el sistema de embrague entre el motor y la caja de velocidades, pasando entre los elementos mecánicos de las relaciones de velocidad hasta las ruedas y la interacción con el suelo y el aire del entorno produciendo arrastre.

Experimentos y modelos han sido desarrollados para dimensionar la cantidad de energía que se pierde a causa de las fuerzas resistivas. La sociedad de ingenieros automotrices bajo la recomendación SAE (J1263)[39] han presentado un método experimental de fácil implementación, para calcular los coeficientes de arrastre aerodinámico y coeficiente de fricción. En la recomendación se cita el procedimiento y las condiciones para obtener un dato sólido, además es base para programar las cargas calculadas en el chasis dinamométrico.

El análisis de estas fuerzas es una herramienta que permite caracterizar las pérdidas de energía y ser utilizado en variedad de estudios, siendo los más importantes consumo y optimización.

Resistencia aerodinámica

Junto con la resistencia a la rodadura la carga aerodinámica es la mayor fuente de pérdidas en la rodadura del vehículo produciendo varias fuerzas (arrastre, lateral y elevación) y se ve el impacto en el consumo de combustible y en la manejabilidad del vehículo.[38] pág. (79). Este efecto es más intenso cuando el vehículo alcanza velocidades más altas.

Esta fuerza es generada por dos fuentes: el arrastre y la fricción viscosa. El arrastre aerodinámico es modelado por medio de mecánica de fluidos, como el flujo entorno a un cuerpo, siendo el vehículo el cuerpo. Y es gobernado por la relación entre la velocidad del vehículo y la presión ejercida,

visto por la Ecuación 3-9 de Bernoulli y asumiendo flujo incompresible (Lo cual es razonable en aerodinámica vehicular[38] pág. (80)).

Ecuación 3-9 Bernoulli

$$P_{estatica} + P_{dinamica} = P_{total}$$

Definiendo la presión dinámica como $(1/2 * \rho * \vec{v}^2)$ donde se multiplica por un medio a la densidad del aire y la velocidad del vehículo y el aire. Y la presión estática en este caso corresponde a la presión atmosférica del entorno del vehículo. La presión dinámica es producida por la velocidad relativa entre el vehículo y el aire $(\vec{v}_v - \vec{v}_0)$.

En este modelo se asume la condición de operación en la cual el viento lleva siempre la misma dirección del vehículo pero sentido contrario⁶ produciendo una fuerza resistiva. Luego se desprecia los vientos transversales al vehículo. De aplicar segunda ley de Newton al incremento de flujo en un cuerpo despreciando la fricción y se obtendría la fuerza de arrastre aerodinámico como se ilustra en la Ecuación 3-10. Donde (C_D) es un coeficiente aerodinámico propio de la forma del vehículo y es calculado experimentalmente, que multiplica al área de la sección transversal (A_{st}), la velocidad relativa y la densidad del aire.

Ecuación 3-10 Fuerza de resistencia aerodinámica

$$f_{ae} = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_{st} * (\vec{v}_v - \vec{v}_0)^2$$

Resistencia a la rodadura

Considerada como la mayor fuerza de resistencia en el vehículo es producto de la rodadura de los neumáticos en el suelo. Varios mecanismos son los responsables de esta fuerza: presión de aire en las ruedas, deformación de las ruedas, deslizamiento

⁶ Entiéndase dirección como la línea recta sobre la que se mueve el vehículo y el sentido el extremo de la línea hacia el que viaja el vehículo.

entre el suelo y la rueda, arrastre entre otras. La Ecuación 3-11 muestra la multiplicación entre la fuerza vertical del respectivo eje (f_v) por el coeficiente de resistencia a la rodadura (μ).

Ecuación 3-11 Fuerza de resistencia a la rodadura

$$f_{rr} = \mu * f_v$$

Los efectos de la aceleración y la desaceleración se deben ver reflejados en la componente de fuerza vertical para obtener un mejor comportamiento de la ecuación, luego el modelo debe considerar la transferencia de carga, un modelo de bicicleta permite parcialmente ver el efecto.

Rendimiento aceleración

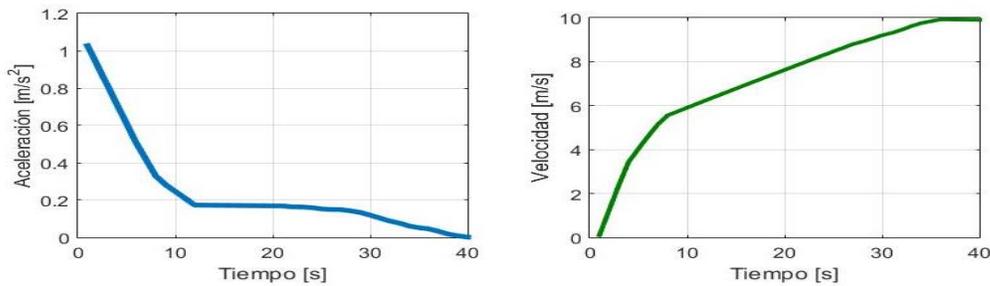
El máximo rendimiento en aceleración longitudinal de un vehículo está determinado por dos límites: primero la capacidad del motor y segundo la capacidad de tracción en las ruedas. Este modelo implementa las dos condiciones bajo el siguiente criterio:

Si capacidad del motor que es transmitida hasta la rueda en forma de fuerza de tracción es superior a la capacidad de tracción de las ruedas, la fuerza de tracción efectiva será el máximo valor que pueda transmitir la rueda.

La máxima capacidad en el motor está definida en este modelo por una de las dos siguientes opciones:

1. Se conocen las curvas características del motor entregada por el constructor del vehículo de potencia y momento contra revoluciones por minuto.
2. Se montó el experimento en el laboratorio sobre el chasis dinamométrico y se obtuvieron las curvas características reales en las condiciones de Bogotá y actuales de operación y programación del vehículo (por defecto el modelo propuesto trabaja con estas curvas).

Figura 3-2 Capacidad de aceleración



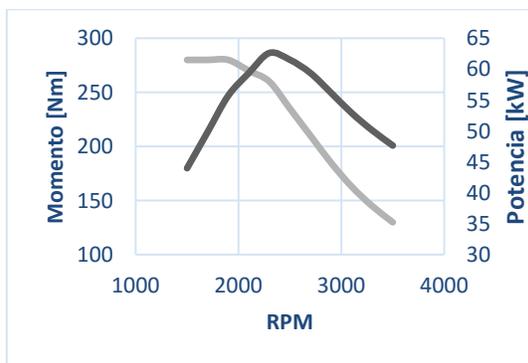
Fuente: GICEPMA

La Figura 3-2 muestra el efecto de la capacidad de aceleración del vehículo tanto en aceleración como en velocidad que está ascendiendo en una pendiente del ocho por ciento (8[%]). En ella se aprecia el efecto que tienen las dos opciones de restricción en aceleración sobre el vehículo haciendo que la aceleración tienda a cero (0) y la velocidad tienda a un valor estable, en este caso diez metros por segundo (10[m/s]) o treinta y seis kilómetros hora (36[km/h]).

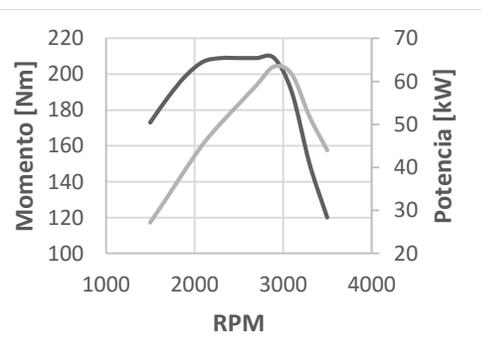
La Figura 3-3 ilustra las curvas características del motor de un vehículo tipo micro-bus que opera en el sistema integrado de transporte y ha sido evaluado en laboratorio sobre el chasis dinamométrico. Donde la prueba de potencia ha arrojado la gráfica (B) y la ficha técnica de la gráfica (A) muestra que el motor debería entregar mayor potencia.

Figura 3-3 Curvas características motor ISUZU 4J11-TC

A.



B.



Fuente: A. Ficha técnica motor ISUZU [40], B. GICEPMA-Dinamómetro SENA

Sin embargo por las condiciones de la prueba donde el dinamómetro es de rodillos al eje del vehículo y no al eje del

motor implica una pérdida, las condiciones de Bogotá respecto a la altura respecto al nivel del mar suma otra pérdida y finalmente el tiempo de operación del vehículo (tres años para el citado en este ejemplo) implica otra pérdida.

De la **Figura 3-3** se infiere que de tener las dos curvas características, la presentada por el fabricante y la obtenida en el laboratorio, se debe utilizar en el modelo la segunda o gráfica (B) porque es la que representa el estado actual del vehículo.

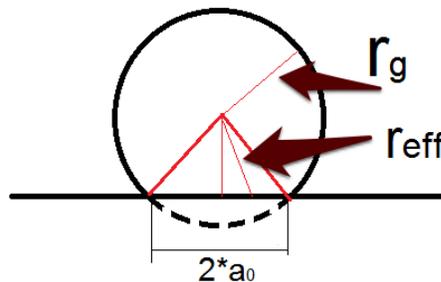
La fuerza de transmisión (f_{tr}) por capacidad del motor es calculada desde el momento de fuerza entregado por el eje del motor de combustión interna como (Ecuación 3-12):

Ecuación 3-12 Fuerza de tracción por capacidad del motor [38] pág. 26

$$f_{tr_{capacidad\ motor}} = \frac{M_{mci} * n_i * n_d * \eta_{st}}{r_{eff}}$$

Donde momento del motor M_{mci} es amplificado o reducido por la relación de la caja n_i y amplificado por la relación del diferencial n_d y restadas las eficiencias del tren de transmisión η_{st} , en este caso se asumió un valor de (0.95). Todo dividido entre el radio efectivo de la rueda r_{eff} del vehículo que se define **Figura 3-4**.

Figura 3-4 Radios de la rueda



Fuente: GICAEPMA

Donde el radio geométrico (r_g) de la rueda se conoce de dos modos: midiendo la rueda en vacío verificando que la presión

de recomendación de fábrica se cumpla o calculándola por medio de la referencia de fábrica de la rueda. La huella ($2 \cdot a_0$) de la rueda en estado estacionario del vehículo se toma como referencia y se despreja la variación de la rueda en estado transitorio. Aplicando teorema de Pitágoras se obtiene un valor medio del radio efectivo de la rueda que es un buen valor para el modelo implementado.

Ahora respecto a la segunda condición de restricción en rendimiento de aceleración esta la capacidad de la rueda para transmitir la fuerza al suelo. Establecer un coeficiente de fricción representativo de los vehículos estudiados es importante para los resultados del modelo desarrollado.

Coeficiente de fricción y modelo de rueda

Ahora respecto a la capacidad de tracción en los ejes, la dinámica vehicular presenta varios modelos que han sido desarrollados por diferentes Universidades y fabricantes. Donde el objetivo es modelar la rueda del vehículo y evaluar el coeficiente de fricción de la rueda de tracción, cada modelo presenta diferente nivel de complejidad, precisión y aplicación.

Los modelos más conocidos Pacejka descrito por Carulla[41] como un modelo empírico para estimar el estado estable de la rueda y manejan el modelo dentro del concepto de fórmula mágica la cual describe la fuerza longitudinal combinando el deslizamiento de la rueda respecto al suelo. Majdoub, Giri y Ouadi[42] proponen un control no lineal a un sistema de dinámica vehicular donde inicialmente implementa el modelo de rueda Kiencke que se basa en un modelo de fricción.

El modelo LuGre totalmente teórico descrito de nuevo por Carulla[41] permite ver el comportamiento en estado transitorio de la interacción de la rueda con el suelo, es el modelo con mayor características de la rueda involucradas. LuGre tiene tres formas: LuGre agrupado, LuGre promedio y LuGre distribuido, siendo este último un modelo de elementos finitos. En este artículo se utilizó el modelo LuGre agrupado

por ser el más simple de modelar y de las tres formas el único que no solicitaba datos de técnicos especiales de la rueda que no están dentro del alcance del estudio. El modelo es presentado en la Ecuación 3-13 donde se aprecia que está compuesto de tres ecuaciones. Donde (z) es el estado de fricción de la deflexión de las secciones de la rueda, (μ_c) es la fricción estática normalizada, (\vec{v}_r) es la velocidad relativa entre los elementos (representa la rueda como una fila de cerdas que tienen fricción entre sí) de la rueda, (\vec{v}_s) es la velocidad relativa del efecto Stribeck o de fricción, (f_v) es la fuerza vertical en el eje y las letras griegas (σ_0, σ_1 y σ_2) corresponden a características técnicas de la rueda obtenidas experimentalmente.

Ecuación 3-13 Modelo LuGre agrupado. Ecuaciones 1-3 [41]

$$\dot{z} = \vec{v}_r - \frac{\sigma_0 * |\vec{v}_r|}{g|\vec{v}_r|} * z$$

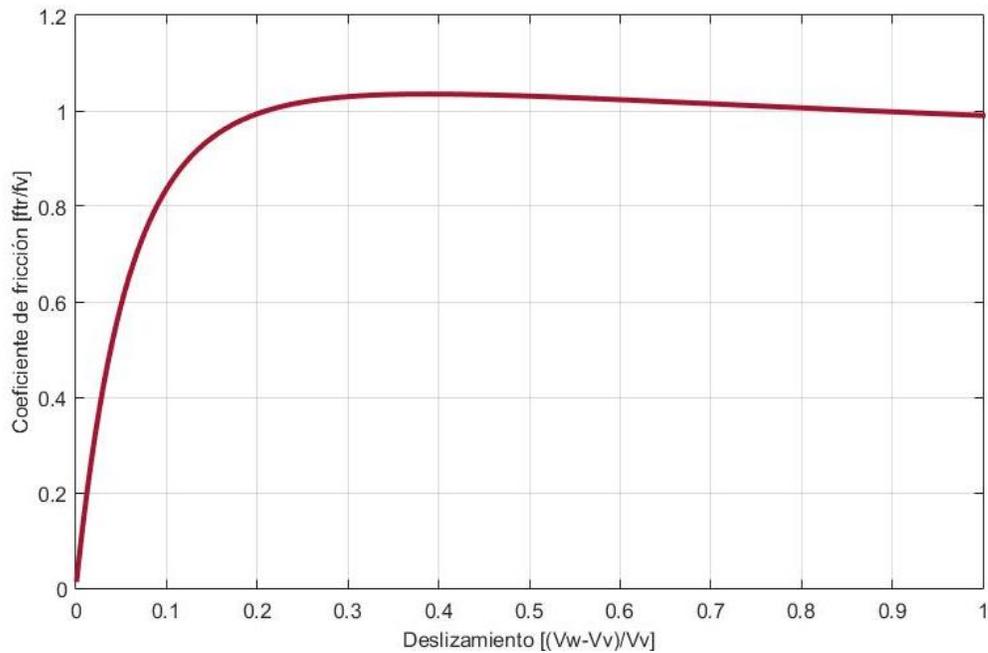
$$f_{tr} = (\sigma_0 * z + \sigma_1 * z + \sigma_2 * \vec{v}_r) * f_v$$

$$g(\vec{v}_r) = \mu_c + (\mu_s - \mu_c) * e^{-\left|\frac{\vec{v}_r}{\vec{v}_s}\right|^{1/2}}$$

Este es el modelo base que se manejó para buscar un coeficiente de fricción para implementar en el modelo. La Figura 3-5 muestra la simulación del modelo en estado estable para las constantes ilustradas en la Tabla 3-1.

Se aprecia un coeficiente máximo de fricción de (1) para un deslizamiento ideal del para esta grafica de (0.3), sin embargo, los calores que se registran en la literatura sobre deslizamiento oscilan entre (0.1) y (0.2).

Figura 3-5 Modelo LuGre agrupado en estado estable



Fuente: GICAEPMA

Tabla 3-1 Modelo LuGre usado por CARULLA[41] e implementado en este modelo

Modelo LuGre variables	
Variable	Valor
Sigma 0	181.54
Sigma 2	0.0018
Mu s	0.8
Mu c	1.55
vr	0 - 1
vs	6.57

Fuente: GICAEPMA

En el modelo que se presenta en este artículo se asume el valor medio del coeficiente de fricción (μ) ubicado entre (0.1) y (0.2) que es (0.965), siguiendo las sugerencias de deslizamiento de la literatura. Luego el máximo valor de la fuerza transmitida desde el motor que podrá impulsar el vehículo será el $(0.965 \cdot f_v)$ en el eje de tracción. Finalmente la fuerza de tracción por capacidad de tracción de la rueda queda definida como (Ecuación 3-14) :

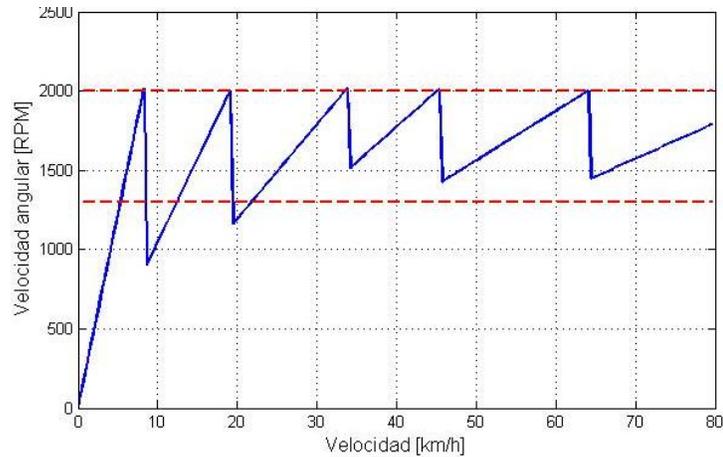
Ecuación 3-14 Fuerza de tracción por capacidad de tracción de la rueda[43]

$$f_{tr_{capacidad\ tracción\ rueda}} = f_{vr} * \mu$$

Modelo tren de transmisión

En la Figura 3-6 **Error! Reference source not found.** de diente de sierra se aprecia la programación de una caja de un vehículo articulado montado sobre el chasis dinamométrico con el control de tracción y de restricción de velocidad desactivado.

Figura 3-6 Programación caja de velocidades ZF de seis relaciones para un vehículo articulado



Fuente: GICAEPMA

Las gráficas de diente de sierra son la mejor forma de apreciar la programación de la transmisión de un vehículo. Y también la mejor forma de programar un algoritmo como el que se requiere en este modelo. En el algoritmo diseñado de la transmisión, la relación de la caja de es una función de la velocidad del vehículo (\vec{v}_v) y la velocidad de referencia (\vec{v}_{ref}) (ver Ecuación 3-15), en este caso es el perfil del ciclo de manejo o el perfil de velocidad del (GPS) la velocidad de referencia. Donde el algoritmo compara la velocidad del vehículo con la velocidad de referencia y decide si debe cambiar la marcha o mantenerla.

Ecuación 3-15 Dependencia de la relación de la caja de transmisión respecto a la velocidad del vehículo y la velocidad de referencia

$$n_i = f(\vec{v}_v, \vec{v}_{ref})$$

Para cada vehículo se debe conocer las relaciones de velocidad de la transmisión y del diferencial.

Control de aceleración, desaceleración y frenado

Sujeto a que el perfil de velocidad que se simula sea de (GPS) directamente o de un ciclo de manejo y tampoco tiene condiciones críticas de operación para el vehículo, se presenta este control. Considérese como condición crítica frenar en seco y acelerar a fondo, el modelo de control no es capaz de identificar estos cambios y no resolverá el sistema de ecuaciones.

La condición de frenado en seco supone reducir su velocidad de (60[km/h]) a (0) en doce metros (12[m]) para vehículos articulados y cuatro punto cinco metros (4.5 [m]) para vehículos tipo micro-bus. Este resultado basado en pruebas de frenado desarrolladas en los vehículos del sistema integrado de transporte.

La condición de aceleración a fondo supone alcanzar una velocidad de (60 [km/h]) en menos de (30[s]) para vehículos articulados y (20[s]) para vehículos tipo micro-bus. Este resultado basado en pruebas de frenado desarrolladas en los vehículos del sistema integrado de transporte.

El control implementado en el modelo se ejerce desde cuatro (4) puntos del vehículo:

1. Variando la fuerza de tracción del motor (f_{tr}) en función de la aceleración necesaria para alcanzar la velocidad de referencia del perfil de (GPS) o el ciclo de manejo, el modelo no incluye al motor solo reproduce el momento que se requiere para determinadas condiciones de velocidad y aceleración del vehículo, se asume en este modelo que el motor es capaz de operar dentro de las condiciones demandadas por el ciclo y no opera en condiciones críticas de aceleración y velocidad.

Las condiciones iniciales para resolver el modelo son: una fuerza de tracción cero (0), velocidad y aceleración (0), relación de la caja de velocidades inicial en primera marcha.

Ecuación 3-16 Calculo momento inicial o en tiempo cero (0 [s])

$$M_{mci\ inicial} = \frac{ftr_{inicial} * r_{eff}}{n_i * n_d * \eta_{st}} + \frac{T_{rrr}}{n_i * n_d * \eta_{st}}$$

La Ecuación 3-16 ilustra el cálculo del momento inicial del motor para mover el vehículo, donde se requiere conocer las relaciones de la caja (n_i) y del diferencial (n_d), la eficiencia del tren de transmisión (η_{st}) y el momento debido a pérdidas por resistencia a la rodadura (T_{rrr}). Al momento inicial calculado se le debe sumar el necesario para alcanzar la aceleración requerida, así se presenta el cálculo de la diferencia de aceleración (Ecuación 3-17).

Ecuación 3-17 Diferencia de aceleración entre referencia y actual

$$\pm \Delta_{aceleración} = \vec{a}_{referencia} - \vec{a}_{actual}$$

El cálculo de diferencia en momento se ilustra en la Ecuación 3-18 donde a partir de la diferencia de aceleración del vehículo necesaria para alcanzar la velocidad de referencia se calcula el momento.

Ecuación 3-18 Diferencia de momento para alcanzar determinada aceleración

$$\Delta M_{mci} = \frac{\pm \Delta_{aceleración} * m_v * r_{eff}}{n_i * n_d * \eta_{st}}$$

El momento total que debe entregarse al eje es la suma del momento inicial más la diferencia de momento. (Ecuación 3-19)

Ecuación 3-19 Momento de salida del motor al tren de trasmisión

$$M_{salida\ eje\ motor} = \Delta_{aceleración} \pm \Delta M_{mci}$$

El error descrito como la desviación entre la referencia que propone los ciclos de manejo o los perfiles de velocidad aplica por encima o por debajo del valor objetivo. (Ecuación 3-20 y Ecuación 3-21)

Ecuación 3-20 Error relativo aceleración

$$error_{aceleración} = \left(\frac{\vec{a}_{referencia} - \vec{a}_{actual}}{\vec{a}_{referencia}} \right) \%$$

Ecuación 3-21 Error relativo velocidad

$$error_{velocidad} = \left(\frac{\vec{v}_{referencia} - v_{actual}}{\vec{v}_{referencia}} \right) \%$$

El error relativo permisible respecto a los valores de referencia en el modelo corresponde al cinco por ciento (5[%]) en velocidad y aceleración. Y concuerda con el error que se plantea en el diseño de ciclos de manejo. (Ecuación 3-22 y Ecuación 3-23)

Ecuación 3-22 Tolerancia aceleración para modelo

$$\vec{a}_{referencia} * 0.95 < \vec{a}_{actual} \leq \vec{a}_{referencia} * 1.05$$

Ecuación 3-23 Tolerancia velocidad para modelo

$$v_{referencia} * 0.95 < \vec{v}_{actual} \leq \vec{v}_{referencia} * 1.05$$

2. Variando la relación de transmisión de la caja de velocidades en función de la velocidad de referencia y la velocidad actual del vehículo.

3. Variando los momentos de frenado (T_{br}) y (T_{bf}) correspondiente a cada eje del vehículo. La una función de frenado se activa únicamente cuando la velocidad actual del vehículo es superior a la de referencia y al mismo tiempo el vehículo está desacelerando. Esta función está construida por partes y no es una representación de un modelo dinámico. Solamente busca ajustar las velocidades asumiendo que no está en una condición crítica de frenado de lo contrario es invalida la suposición. (Ecuación 3-24)

Ecuación 3-24 Señal de activar frenos en modelo

Señal Frenar(\vec{v})

$$= \begin{cases} \text{Si frenar,} & \vec{v}_{referencia} \leq \vec{v}_{actual} \wedge \vec{v}_{referencia} \geq \vec{v}_{referencia+\Delta t} \\ \text{No frenar,} & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

El momento de frenado es calculado a partir del momento del motor, de la relación de caja más grande, la velocidad actual del vehículo y una constante (C_1) que varía dependiendo de la carga que transporta el vehículo y la pendiente de la ruta. (Ecuación 3-25)

Ecuación 3-25 Función momento freno

$$M_b = M_{motor\ máximo} * n_1 * n_d * \vec{v}_{actual} * C_1$$

El momento también es dividido entre los dos ejes, asumiendo una distribución de momento de treinta por ciento (30 [%]) en el eje trasero y setenta por ciento en el eje delantero (70 [%]). (Ecuación 3-26 y Ecuación 3-27)

Ecuación 3-26 Momento freno eje trasero

$$M_{br} = 0.3 * M_b$$

Ecuación 3-27 Momento freno eje delantero

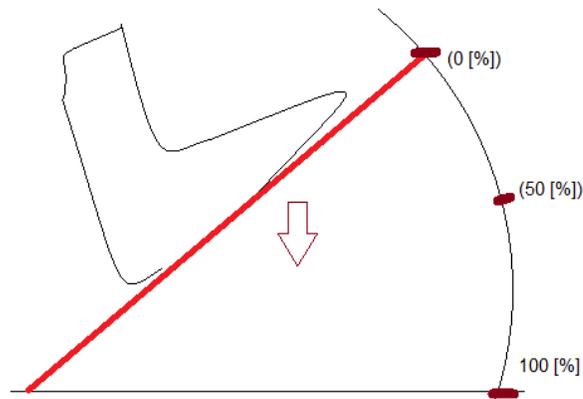
$$M_{bf} = 0.7 * M_b$$

4. Estableciendo un valor máximo de porcentaje de aceleración del vehículo representado físicamente como la posición del acelerador del vehículo. Donde el motor permanece en ralentí en el cero por ciento (0[%]) y totalmente acelerado en el cien por ciento (100[%]) como se aprecia en la **Figura 3-7**. Este valor se ve reflejado en el motor de combustión interna de dos modos en velocidad y en aumento de carga o entrega de momento motor y se presenta en diferentes situaciones (**Figura 3-8**). El valor promedio obtenido en pruebas de ruta fue de (85 [%]), ver anexo A. Sensor posición gobernador y estrangulador.

Situación A. Cuando a máxima velocidad del motor la posición del acelerador está en el cien por ciento y la carga del motor no puede superar la carga demandada, el motor empieza a desacelerar.

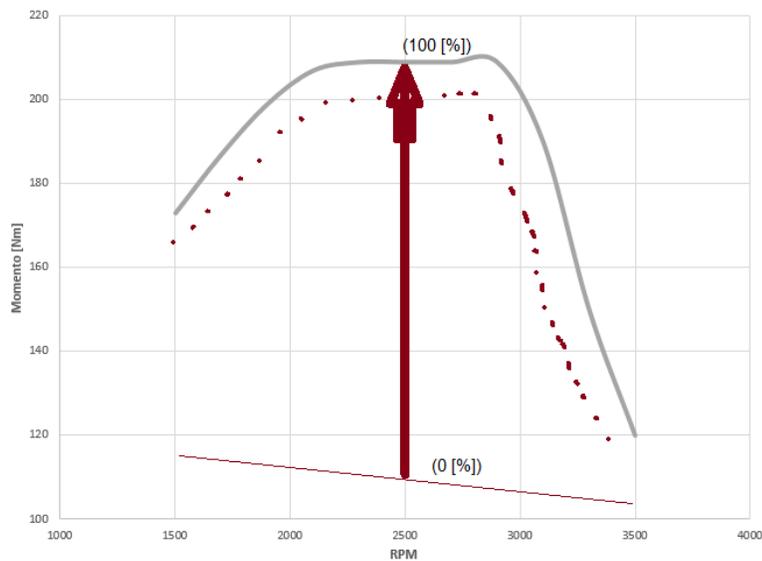
Situación B. Cuando se desea mantener la velocidad constante, pero incrementa la carga, lo hace hasta llegar al valor de máxima carga a la velocidad dada luego empieza a desacelerar. Situación C. Cuando se desea acelerar y la carga se reduce, ejemplo una pendiente en descenso.

Figura 3-7 Posición acelerador



Fuente: GICAEPMA

Figura 3-8 Carga en el motor del vehículo

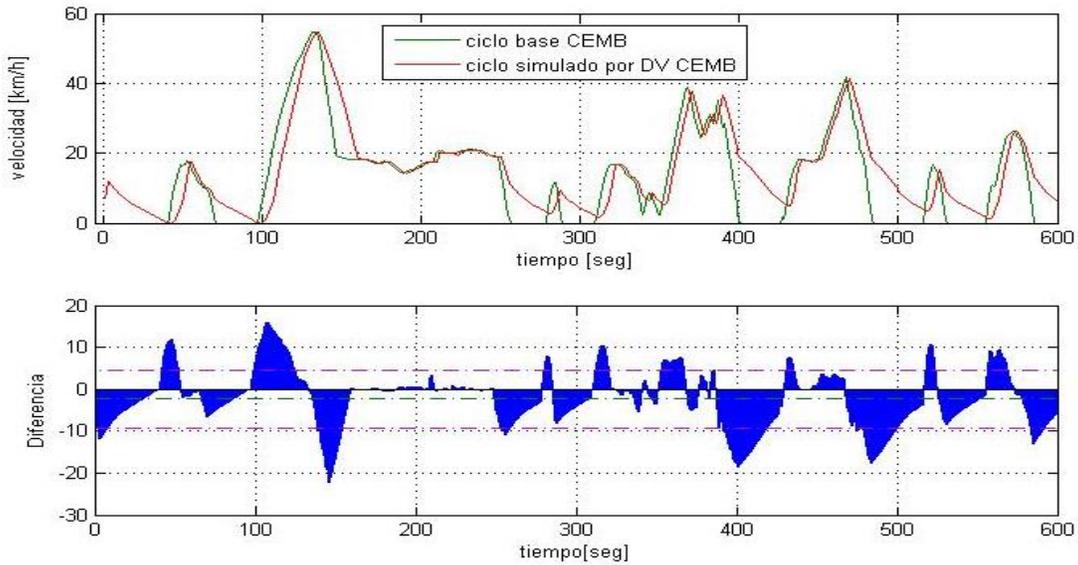


Fuente: GICAEPMA

Simulación de modelo sin control refinado

Una vez desarrollado el algoritmo (anexo A) siguiendo las pautas mencionadas en este artículo se obtuvo un primer acercamiento al modelo, y se simuló el perfil ilustrado en la Figura 3-9 donde se parecían errores de más del (50 [%]) en velocidad.

Figura 3-9 Simulación perfil de velocidad de (GPS) sin refinar el modelo en un vehículo tipo buseta



Fuente: GICAEPMA

Una vez desarrollado el algoritmo (anexo A) siguiendo las pautas mencionadas en este artículo se obtuvo un primer acercamiento al modelo, y se simuló el perfil ilustrado en la Figura 3-9 donde se parecían errores de más del (50 [%]) en velocidad.

El ejercicio de ajuste y refinamiento del modelo se desarrolló siguiendo el siguiente procedimiento.

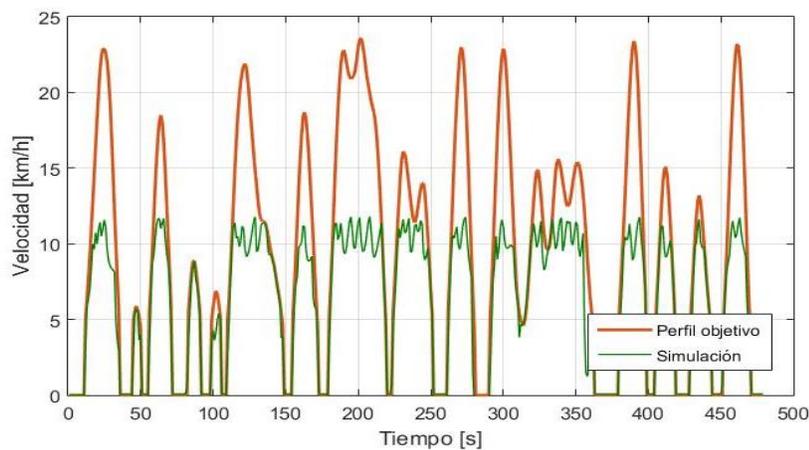
1. El margen de error en velocidad en las secciones de desaceleración se ajustó con el modelo de frenado y controlando el momento motor de salida.

2. El margen de error en las secciones de aceleración se ajustó modificando la programación del algoritmo de error que continúa siendo ($\pm 5\%$)

Impacto de la pendiente en el modelo e impacto de la carga en el modelo

Una vez ajustado el modelo se evalúan diferentes condiciones de operación, la **Figura 3-10** ilustra la simulación de un vehículo tipo buseta cargado al (60[%]) de su capacidad recorriendo el ciclo simulando una pendiente del (21.2 [%]). El ciclo presentado está diseñado para una pendiente del (2.5 [%]) es la razón por la que el vehículo no puede alcanzar las velocidades de referencia.

Figura 3-10 Resultado simulación ciclo de manejo con pendiente promedio de (2.5 [%]) simulado con una pendiente promedio de (21.2 [%])



Fuente: GICAEPMA

La simulación con el modelo y el control refinado muestran un alto grado de sensibilidad y precisión respecto a velocidad y aceleración, presentando errores menores al diez por ciento (10 [%]) a excepción de las zonas que las condiciones de carga y pendiente impiden que el vehículo con sus características técnicas sea capaz de alcanzar.

El consumo de energía al eje presenta un valor de (0.65 [kWh/km]) para este tipo de vehículo, mientras en vehículos

articulados presenta un valor de (1.02 [kWh/km]) y en micro-buses se dan valores de (0.50 [kWh/km]).

Los valores de energía total consumida se calculan a partir de relaciones matemáticas y asumiendo valores constantes de densidad de combustible, poder calorífico inferior, eficiencia térmica y de eficiencia de combustión constante.

Tabla 3-2 Constantes para cálculo de consumo total de energía

Constantes para cálculo de consumo total de energía a partir de modelo de dinámica vehicular	
Nombre de constante	Valor
Densidad combustible DIESEL [kg/m ³]	860
Poder calorífico inferior DIESEL [kJ/kg]	43.900
Eficiencia media térmica motores	0.40
Eficiencia media combustión motores	0.95

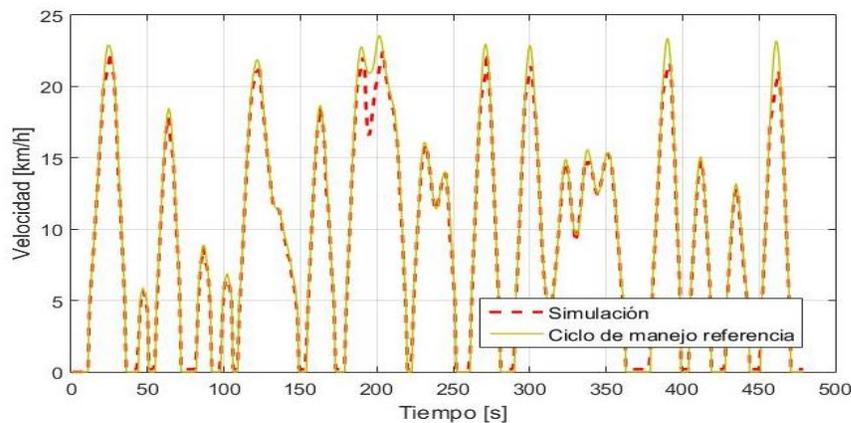
Fuente: Propiedades DIESEL Ecopetrol [44], eficiencias valores promedio en Heywood [45] pág. 82 y 175

Los valores obtenidos para eficiencia energética calculada a partir de los datos citados en la Tabla 3-2 fueron para vehículos articulados en promedio de (2.9 [kWh/km]), en busetas de (2.5 [kWh/km]) en promedio y en micro-buses de (1.9 [kWh/km]).

Simulación de ciclo de manejo en el modelo

La Figura 3-11 muestra la simulación ideal de un ciclo de manejo.

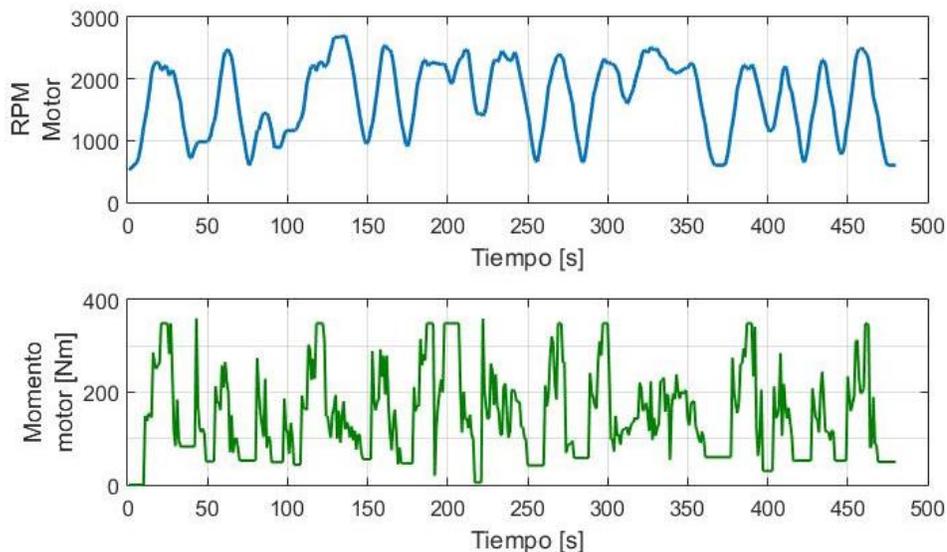
Figura 3-11 Simulación ideal de ciclo de manejo para vehículo tipo buseta



Fuente: GICAEPMA

Se aprecia que el vehículo es capaz de seguir el perfil porque las condiciones de programación del modelo concuerdan con las características del ciclo de manejo y las especificaciones técnicas del vehículo.

Figura 3-12 Simulación de momento motor y velocidad motor



Fuente: GICAEPMA

La Figura 3-12 ilustra las variables de momento motor y velocidad del motor, bases para el cálculo del consumo al eje del vehículo, este valor es estudiado en el artículo siguiente y se ajusta con los resultados obtenidos en experimentos.

Contextualizando el siguiente capítulo

El capítulo siguiente presenta la sección experimental de la investigación, donde se evalúan las pruebas en ruta y en laboratorio sobre chasis dinamométrico bajo los criterios que se han establecido hasta el momento en el desarrollo de la metodología. Con los resultados se ajustan los consumos del modelo de dinámica, se establece la energía perdida debido a fuerzas resistivas para programar el dinamómetro en los buses de la ciudad de Bogotá y finalmente se presentan los resultados de consumo, eficiencia energética para las tipologías de vehículos de interés.

Capítulo 4 . Ajuste de modelo de dinámica vehicular por medio de datos experimentales y comparación de pruebas en ruta y en laboratorio

El desarrollo experimental presentado en este artículo inicia con una descripción de los objetivos de cada prueba desarrollada. Seguido se describe como hizo cada experimento, que variables se evaluaron, que instrumentación se utilizó en cada prueba y finalmente que resultados se obtuvieron. El objetivo del artículo es establecer la diferencia entre los resultados de las pruebas en ruta y las pruebas en laboratorio para generar factores de ajuste sobre los valores del laboratorio.

Experimentos y objetivos

Todos los experimentos son desarrollados bajo las siguientes condiciones:

- El vehículo siempre estará cargado con arena tal que este al (70 [%]) de su máxima capacidad porque es el valor de referencia que maneja el (SITP)[24] para evaluación de vehículos, todos los vehículos son siempre pesados en la misma balanza (ver anexo A.).
- La velocidad máxima de circulación en las calles es de (60 [km/h]), en las pruebas de desaceleración los valores requeridos para el dinamómetro son de (80 [km/h]), para

obtenerlos son extrapolados de los resultados obtenidos hasta (60 [km/h]).

- Las pruebas mínimo deben tener tres repeticiones para garantizar el mínimo valor de repetitividad, sin embargo, está sujeto a condiciones de tiempo y presupuesto hay experimentos que solo cuentan con dos repeticiones.
- Los vehículos usados son cuatro (4) en los tres primeros experimentos (un bus articulado, una buseta, un micro-bus y una camioneta) y en el cuarto experimento incluye solo la camioneta.
- La ruta de prueba es en Bogotá y comprende la calle (19), la circunvalar desde la Universidad de los Andes hasta la estación de Bomberos del centro histórico, la calle sexta hasta la calle cuarenta y cinco, la calle tercera hasta la carrera sesenta y ocho, finalmente la sesenta y ocho hasta la avenida las Américas. En el caso del vehículo articulado comprende la troncal de la ochenta y suba.

Cuatro (4) experimentos se presentan a continuación, tienen una dependencia jerárquica, es decir para poder llevar a cabo el experimento cuatro (4) completamente se debe haber desarrollado los anteriores tres (3).

Figura 4-1 Diagrama de dependencia de experimentos



Fuente: GICAEPMA

Experimento (1) Fuerzas de resistencia a la rodadura

El objetivo es implementar el estándar SAE (J1263) que permite por medio de pruebas de desaceleración y un pos-procesamiento de datos conocer la energía perdida debido a la presencia de fuerzas de resistencia a la rodadura y arrastre aerodinámico, para después estableceres cual es el valor de carga que se debe programar en el dinamómetro y los valores de los coeficientes aerodinámicos y de resistencia a la rodadura de cada tipología de vehículo.

Las variables de interés son:

- La velocidad
- La aceleración
- Velocidad motor y vehículo

Los instrumentos de implementados son:

- Quinta rueda
- GPS
- Balanza para vehículos

Experimento (2) Consumo en estado estable

El objetivo es establecer la línea base de consumo de combustible en estado estable en el laboratorio sobre el chasis dinamométrico, programado con carga constante y operando el vehículo a velocidad también constante. Teniendo como valor de carga programada el valor calculado en el experimento (1). Estos valores son el primer punto de comparación entre pruebas en ruta y en laboratorio.

Las variables de interés son:

- Consumo de combustible
- Energía entregada al eje
- Velocidad motor y vehículo

Los instrumentos de implementados son:

- Dinamómetro
- Flujómetros

- Balanza para vehículos

Experimento (3) Consumo en estado transitorio

El objetivo es establecer la línea base de consumo de combustible y de energía al eje en estado transitorio en el laboratorio sobre el chasis dinamométrico simulando ciclos de manejo con las cargas calculadas en el experimento (1) y en ruta. Estos datos son comparables entre sí, sin embargo, aún se desconoce la desviación del de consumo de energía al eje en las pruebas de ruta respecto a las pruebas en laboratorio. Las variables de interés son:

- Consumo de combustible
- Energía entregada al eje
- Velocidad motor y vehículo

Los instrumentos de implementados son:

- Dinamómetro
- Flujómetros
- GPS
- Quinta rueda
- Balanza para vehículos

Experimento (4) Factores de corrección modelo y cargas en dinamómetro

El objetivo es desarrollar una prueba en ruta y una prueba en laboratorio con todas las herramientas (ciclos de manejo y modelo de dinámica vehicular) y los factores estimados hasta el momento para establecer la desviación que existe del modelo de dinámica vehicular y de la prueba en laboratorio respecto a la prueba en ruta, la es utilizada como patrón de calibración de los factores del dinamómetro y los factores del modelo de dinámica vehicular.

Adicional en este experimento se desarrolla también la medición de gases de emisión para apreciar la diferencia entre las emisiones registradas en laboratorio y en ruta.

Las variables de interés son:

- Velocidad del motor
- Momento entregado al eje
- Posición del acelerador
- Pendiente del trayecto y pendiente simulada
- Velocidad motor y vehículo
- Emisiones gaseosas

Los instrumentos implementados son:

- Sensor de momento en línea
- Dinamómetro
- Quinta rueda
- Analizador de gases de emisión
- Sistema de medición de flujo de gases de escape
- Balanza para vehículos

Especificaciones técnicas instrumentación

Esta sección se complementa junto con el anexo (A). A continuación, se en listan las características técnicas de los instrumentos.

Tabla 3 Especificaciones técnicas analizador de gases

Especificaciones técnicas analizador de gases Brain Bee AGS-688		
Especificación	Rango	Resolución
Monóxido de carbono (CO)	0 - 9.99 [%] [V/V]	0.01 [%] [V/V]
Dióxido de carbono (CO ₂)	0 - 19.9 [%] [V/V]	0.1 [%] [V/V]
Hidrocarburos sin quemar (HC)	0 - 9999 [ppmVol]	1 [ppmVol]
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	0 - 5000 [ppmVol]	1 [ppmVol]
Oxígeno (O ₂)	0 - 25 [%] [V/V]	0.01 [%] [V/V]
Lambda	0.5 - 5	0.0001
Temperatura aceite	20 - 120 [°C]	1 [°C]
Caudal muestreo (Sonda6[m])	4 [l/min]	0.1 [l/min]
Presión admisible	(85 - 106 [kPa])	No aplica
Drenaje de condensado continuo y automático		
Control automático de flujo mínimo en muestra		
Filtro de protección vapor y agua		
Compensación automática de presión ambiente		

Calibración con botella de gas patrón
Auto cero
Tiempo de calentamiento sistema a (20 [°C]) en (10 [min])
Respuesta de sensores de gases (<15 [s])
Conexión USB / B en modo esclavo vía puerto (RS 232)
Rango de operación de temperatura (5 - 40 [°C])
Peso (5 [kg])

Fuente: Brain Bee

Tabla 4 Especificaciones técnicas sistema medición flujo de gases de escape

Especificaciones técnicas sistema de medición flujo de gases de escape		
Especificación	Rango	Resolución
Medidor diferencial de presión CEM	+ - 35 [kPa]	0.01 [kPa]
Precisión medidor diferencial CEM	No aplica	+ - 0.3 [%]
Linealidad medidor diferencial CEM	No aplica	+ - 0.29 [kPa]
Termopar tipo (K) Poliempack	-200/1372 [°C]	1 [°C]
Caudal máximo	350 [l/s]	0.01 [l/s]
Tubo sonda acero inoxidable calibre (316) (50.8 diámetro 60[mm]) longitud		
Pitot sonda (6 [mm])		

Fuente: GICAEPMA

Tabla 5 Especificaciones técnicas balanza para vehículos

Especificaciones técnicas balanza de vehículos
Ubicada en la ciudad de Bogotá en la Calle (15) N° (88D - 63) presenta un resolución de (+ - 7 [kg]) y una capacidad superior a las (40[Tn]), permite pesar independiente cada eje del vehículo.

Fuente: Ficha técnica balanza

Tabla 6 Especificaciones técnicas computador

Especificaciones técnicas computador ASUS N55JR		
Especificación	Descripción	Resolución
Procesador i7-4700	2.4 [GHz]	No aplica
Memoria RAM	8 [Gb]	No aplica
Tipo sistema	64 [Bits]	No aplica
Sistema operativo	Windows 8	No aplica

Fuente: Ficha técnica computador

Tabla 7 Especificaciones técnica dinamómetro

Especificaciones técnicas dinamómetro MD 400 Mustang		
Especificación	Rango	Resolución
Velocidad máxima	305 [km/h]	0.01 [km/h]
Capacidad máxima en momento	1700 [Nm]	0.01 [Nm]
Capacidad máxima en potencia	522 [Kw]	0.01 [kW]
Celda de carga CELTRON STC-1K	2.9982 [mv/v]	0.001 [mv]
Sensor efecto hall	168 [pulsos]	No aplica
Capacidad máxima	5500 [kg]	No aplica
Diámetro rodillos (0.27 [m])		
Temperatura máxima unidad de absorción de energía (600 [°C]) máximo por (5 [min])		
Extractor de aire caliente (1 [kW])		
Sistema neumático (551 [kPa])		
Programa computador PowerDynePC v208		
Tarjetas NI6221 y Asistente DAQ de National Instruments 2013		
Potencia requerida (230 [VAC], tres fases, 60 (Hz), 40 [Amp])		
Principio de operación: corrientes de Eddy		

Fuente: Ficha técnica Mustang

Tabla 8 Especificaciones técnicas flujómetros

Especificaciones técnicas flujómetro DFM 100 CK		
Especificación	Rango	Resolución
Censa flujo desde	0.5 [l/h]	0.5 [l/h]
Capacidad máxima flujo	3 [l/h]	No aplica
Capacidad máxima flujo	100 [l/h]	No aplica
Error en medida	No aplica	0.001 [%]
Señal de salida pulso	0.7 [v] altura	0.001[mv]
Volumen de combustible por pulso	5 [mm/pulso]	Calibración
Máxima presión	25 [Bar]	No aplica
Consumo voltaje	10 - 50 [V]	No aplica
Consumo corriente	25 [mA]	No aplica
Temperatura operación	-40 / 80 [°C]	No aplica

Fuente: Ficha técnica Technoton

Tabla 9 Especificaciones técnicas quinta rueda

Especificaciones técnicas quinta rueda		
Especificación	Rango	Resolución
Encoder ACCU EPC		
Cantidad de pulsos	1000	No aplica
Voltaje alimentación	4.75 - 28 [VDC]	No aplica

Consumo corriente	100 [mA]	No aplica
Formato de salida	incremental	No aplica
Frecuencia máxima	1 [MHz]	No aplica
Máxima velocidad	8000 [RPM]	No aplica
Acelerómetro ADXL 355		
Sensibilidad ejes	X - Y - Z	No aplica
Voltaje alimentación	1.8 - 3.36 [V]	No aplica
Rango de medida	3 [g]	No aplica
Sensibilidad / eje	300 [mv/g]	No aplica
Estructura		
Cuerpo de movimiento relativo en aleación de aluminio 3004		
Ventosa de doble cuerpo máxima carga (80[kg])		
Barra telescópica en aluminio (1.7 [m])		

Fuente: Ficha técnica GICAEPMA

Tabla 10 Especificaciones técnicas mecanismo registro aceleración

Especificaciones técnicas mecanismo aceleración		
Especificación	Rango	Resolución
Potenciómetro de (1) vuelta	1 [kohm]	0.01[kohm]
Estructura en lamina cold roll cal. 22		

Fuente: Ficha técnica GICAEPMA

Tabla 11 Especificaciones técnicas tarjetas de adquisición

Especificaciones técnicas DAQ NI 6212		
Especificación	Rango	Resolución
Alimentación voltaje	5 [V]	No aplica
Canales análogos diferenciables	8 [unidades]	No aplica
Canales análogos simples	16 [Unidades]	No aplica
Resolución	16 [bits]	No aplica
Rata de muestreo	400 [ks/s]	No aplica
Máximo voltaje señal de entrada	+ - 10 [V]	No aplica
Impedancia por canal	10 [Gohm]	No aplica
Contadores	2 [Unidades]	No aplica

Fuente: Ficha técnica National Instruments

Tabla 12 Especificaciones técnicas flujómetros

Especificaciones técnicas tanque de combustible		
Especificación	Rango	Resolución
Capacidad tanque 1	80 [l]	+ - 1 [l]
Capacidad tanque 2	10 [l]	+ - 1 [l]

Fuente: Ficha técnica GICAEPMA

Tabla 13 Especificaciones técnicas transductor de momento en línea

Especificaciones técnicas transductor de momento en línea		
Especificación	Rango	Resolución
Capacidad transductor	1-1000 [Nm]	+ - 1 [Nm]
Máxima sobrecarga	1500 [Nm]	No aplica
Medida de velocidad	60 [pulsos/rev]	No aplica
Alimentación voltaje	18 - 26 [V]	No aplica
Señal momento	+ - 10 [V]	No aplica

Fuente: Ficha técnica Manual Kistler Sensor 4520

Tabla 14 Especificaciones técnicas unidad de actividad vehicular

Especificaciones técnicas unidad de actividad vehicular		
Especificación	Rango	Resolución
Acelerómetro ADXL 355		
Sensibilidad ejes	X - Y - Z	No aplica
Sensibilidad giro	Pich-yaw-roll	No aplica
Sensibilidad	3000 [mv/g]	No aplica
Capacidad máxima	3 [g]	No aplica
GPS NEO - 6P		
Recepción de canales	50 [Unidades]	No aplica
Frecuencia de operación	GPS L1	No aplica
Sistema de corrección de señales	WAAS - EGNOS	No aplica
Inicio en ambiente frío	32 [s]	No aplica
Inicio en ambiente cálido	32 [s]	No aplica
Inicio en ambiente caliente	1 [s]	No aplica
Sensibilidad	-160/-146 [dBm]	No aplica
Precisión horizontal	2.5 [m]	No aplica
Precisión vertical	2 [m]	No aplica
Precisión en velocidad	0.1 [m/s]	No aplica
Límite de aceleración	4 [g]	No aplica
Límite altitud	50000 [m]	No aplica
Límite velocidad	500 [m/s]	No aplica

Fuente: Ficha técnica GICAEPMA

Experimento (1). Fuerzas resistivas en buses

Caracterizar las fuerzas resistivas (Carga aerodinámica y resistencia a la rodadura) experimentalmente de un vehículo bajo condiciones de operación controladas y repetibles, para ser representadas en el modelo de bicicleta es importante para

garantizar que los resultados presentados sean una representación cercana de la realidad.

Conocer y manejar adecuadamente los métodos para establecer el valor de las fuerzas resistivas, que se oponen al movimiento de un vehículo es importante para observar y analizar diferentes problemas que son de interés en la dinámica de un vehículo, en este caso el consumo de energía, en primera instancia permite caracterizar el fenómeno de cada una de las fuerzas presentes y establecer un comportamiento propio a cada una y servir de fundamento para evaluar el vehículo.

Esta sección presenta la forma en que se caracterizan las fuerzas ya mencionadas de forma experimental y como son modeladas, usando como sustento la recomendación (SAE J1263) [39].

Dentro del diagrama de cuerpo libre del vehículo (Figura 3-1) se pueden identificar aquellas fuerzas que se oponen a la marcha del vehículo, tales como la fuerza aerodinámica, según [38] es de las que tiene mayor impacto en los vehículos, la cual es producto de la interacción entre el cuerpo del vehículo y el aire del entorno el cual posee características tal que produce un arrastre y una fricción viscosa sobre la carrocería que se encuentra en movimiento, en dinámica de fluidos lo analizan como el flujo alrededor de un cuerpo [38] pag.79. Otra de las fuerzas que tienen alto impacto resistivo, es la resistencia a la rodadura y es producto de la interacción de las ruedas del vehículo con el camino, está también el peso del vehículo y por ultimo están las fuerzas resistivas presentadas en los elementos mecánicos del tren de transmisión de potencia del vehículo tales como rodamientos, bujes, juntas, embragues, transmisiones, diferenciales, frenos y por ende las inercias rotacionales propias de cada pieza que no son consideradas dentro del presente modelo pero se presenta un breve marco teórico relacionado con ellas.

Dentro de las pruebas normalizadas consultadas que dan pautas para caracterizar las fuerzas resistivas, se listan varias recomendaciones (SAE), y protocolos desarrollados en Europa,

Normas internacionales ISO, cada una propone metodologías e instrumentación diferente, específica alcances y limitaciones de la prueba. En la literatura se encuentra el manual Bosch para el sector automotriz, donde trabajan un capítulo en dinámica vehicular y propone dos relaciones empíricas que permiten establecer un valor para los coeficientes de arrastre aerodinámico y rodadura. En este numeral se presenta una breve descripción de las pruebas y se hará énfasis en aquellas que conciernen al artículo.

En primera instancia se lista que fuerzas se consideran como resistivas en un vehículo [46] pág. 10:

- Resistencia del aire
- Resistencia a la rodadura
- Resistencia inercial
- Resistencia a pendiente
- Resistencia a la fuerza lateral
- Perdidas de transmisión
- Perdidas por el uso de auxiliares
- Fricción del motor

Los procedimientos y estándares relacionados caracterizan las cargas resistivas listadas, involucrando los diferentes factores que influyen el fenómeno y a la par restringiendo su modelo característico. En común tienen en cuenta la influencia de los parámetros del vehículo, las propiedades del camino, las condiciones climáticas, patrones de manejo y prestan especial atención a las siguientes variables:

- Condiciones ambientales (Temperatura - Humedad - Presión atmosférica)
- Dirección y velocidad del viento
- Efectos aerodinámicos provenientes del entorno asociado al espacio de la prueba (trafico)
- Pendientes del camino
- Condiciones del camino
- Dimensiones y masa del vehículo

Sobre los métodos para determinar la carga por resistencia a la rodadura existen variedad de combinaciones y metodologías que se pueden agrupar en nueve (9) categorías [46] pág. 12: Mediciones en desaceleración: incluyendo los diferentes métodos en orden a medir aceleración.

- Mediciones de fuerza y torque en sistemas de rueda en suspensión o en remolques diseñados especialmente para eso.
- Mediciones de torque en la transmisión
- Mediciones de consumo de combustible
- Mediciones sobre banco de pruebas con principio de amortiguadores de choques
- Mediciones sobre banco de pruebas con principio de fuerza vertical pulsante sobre neumáticos.
- Laboratorio fuera y dentro de tambor usando superficies lisas y ásperas para las ruedas.
- Simulación mecánica de rugosidades y fuerzas laterales basada en propiedades de la rueda y la suspensión.
- Simulación numérica de la dinámica vehicular detalla para diferentes partes usando ecuaciones diferenciales.

Sobre los métodos para determinar la carga por resistencia al arrastre aerodinámico se conocen tres metodologías:

- Mediciones en desaceleración: incluyendo los diferentes métodos en orden a medir aceleración.
- Mediciones en túnel de viento
- Métodos computacionales (CFD)

La norma SAE (J1263) establece el procedimiento para medir las cargas resistivas de un vehículo en un camino recto, a nivel, seco y para velocidades inferiores a (113 [km/h]). La práctica proporciona los procedimientos adecuados para medir la fuerza de resistencia al avance del vehículo como una función de la velocidad y proporciona los datos de resistencia para ser simulados en un banco dinamométrico.

De acuerdo a las características de la prueba y la instrumentación involucrada, trabajar bajo la norma (J1263) permite garantizar un experimento que bajo condiciones controladas sea repetible y los resultados sean comparables.

Modelo usado por SAE (J1263)

El modelo que se utiliza en este artículo se basa en el propuesto por la norma (SAE J1263) [39] que establece un modelo matemático y un experimento que presenta un prueba de desaceleración.

Ecuación 4-1 Modelo SAE (J1263)

$$-mv * \frac{dv}{dt} = Cr * W + 0,5 * A * \rho * C'd * [(V + Vx)^2 + Vy^2]$$

Donde

Ecuación 4-2 Términos Cr y C'd Ecuación 4-1

$$Cr = \mu_0 * (1 + \mu' * V^2)$$

$$C'd = Cd + k * \text{sen}^2(\psi)$$

La Ecuación 4-1 y la Ecuación 4-2 relacionan las fuerzas resistivas de arrastre o resistencia aerodinámica (*f_{ae}*), expresada como $(0.5 * A * \rho * C'd * [(V + Vx)^2 + Vy^2])$ donde un medio del área de la sección transversal del vehículo es multiplicada por la densidad del aire (ρ), por el coeficiente de arrastre ($C'd$) y por el cambio en velocidad del entorno y el vehículo $[(V + Vx)^2 + Vy^2]$ y la fuerza de resistencia a la rodadura (*f_{rrr}* (eje trasero) y *f_{rrf}* (eje delantero) vista como $(Cr * W)$ donde el coeficiente de resistencia a la rodadura es multiplicado por la componente del peso del vehículo.

En la prueba para desaceleración se suspende la fuerza de tracción, porque la prueba es con la caja de velocidad en neutro y el vehículo embragado, tampoco se considera la componente del peso porque se considera el sector de prueba a nivel. Se desprecia el ángulo de giro con respecto al eje perpendicular al plano del suelo (ψ) y la componente de velocidad del viento perpendicular a la dirección de desplazamiento del vehículo (Vy), análogo al ejercicio de hizo CASTRO y JOYA [47] y [48]. De acuerdo con ellos es posible simplificar la Ecuación 4-1 a la Ecuación 4-3.

Ecuación 4-3 Simplificación modelo SAE (1263)

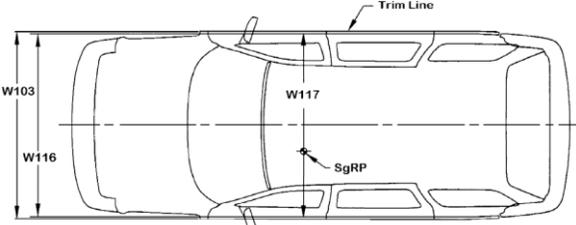
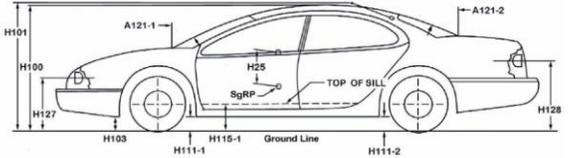
$$mv * \frac{dv}{dt} = M_{e*}a = -Cr * W - 0,5 * \rho * A * Cd * V^2$$

Bajo las siguientes suposiciones:

- Evitar giro del vehículo en torno al eje z (Angulo normal al suelo), en la prueba se debe evitar que el vehículo se salga de su trayecto en línea recta.
-
- Se desprecian los vientos que vienen en dirección perpendicular a la línea de carrera de vehículo, es importante al momento de la prueba evitar que la velocidad del viento en la dirección mencionada sea significativa en comparación con el viento de la línea de ruta.

Para estimar las constantes de masa equivalente (mv) y área frontal (A) se sigue las aproximaciones descritas en el estándar SAE [39] y establece $mv = 1.03 * m$, donde m es la masa medida con ayuda de la balanza (ver anexo A). El 3% de sobrepaso se debe a una estimación del efecto inercial de los componentes rotacionales que transmiten el movimiento desde el motor hasta las ruedas del vehículo que propone la norma. Respecto al área de la sección transversal la definen como $A = 0.8 * H(101) * W(103)(6)$ donde H es medida de la altura y W es el ancho del vehículo. Para una mayor claridad sobre estas medidas se debe buscar en la norma SAE (J1100) [49] donde se indica la forma en que se deben realizar.

Tabla 4-15 Dimensión de área sección transversal vehículo [49]

Dimensión para sección transversal delantera vehículo	
	<p>W103: Distancia mayor lateral desde los extremos del ancho del vehículo incluyendo soportes menos los espejos.</p>
	<p>H101: Medida desde el suelo hasta la parte más alta del vehículo incluyendo soportes. Se tendrá en cuenta el soporte no flexible de una antena</p>

El procedimiento (SAE J1263) establece que el vehículo debe tener ventanas cerradas. En cada prueba el vehículo debe acelerar hasta alcanzar una velocidad superior en al menos ocho (8) [km/h] la velocidad máxima establecida, luego se embraga y se deja la caja en neutro hasta una velocidad que esté por debajo de los valores asignados para las aceleraciones.

Durante este intervalo de tiempo se deben registrar datos de los instrumentos. La velocidad límite usada es de (60) [km/h] la establecida por tránsito, luego es la referencia en este experimento. La prueba se debe desarrollar en ambos sentidos de la pista de pruebas, cinco repeticiones cada una, con el objeto de descartar errores por la pendiente y sentido del viento.

Condiciones del experimento

- Respecto a seguridad el sector de prueba seleccionado debe ser lo más horizontal posible, libre de peatones y obstáculos, seguro respecto a orden público.
- Los sectores de la ciudad seleccionados fueron dos troncales del sistema integrado de transporte público (SITP). La troncal de la carrera treinta entre calles veintiséis y calle ochenta y la autopista norte entre calle ciento veintisiete y ciento setenta, las pruebas desarrolladas en las horas de la madrugada.
- El conductor completamente saludable y consciente de sus cinco sentidos, con papeles al día y seguro. Como las pruebas se desarrollaron con vehículos del sistema integrado de transporte, cada empresa envió un conductor.
- Vehículo completamente al día: papeles y mantenimiento. Se evaluaron seis (6) vehículos: dos vehículos articulados, dos vehículos tipo buseta, un (1) micro-bus y una (1) camioneta Mazada (esta última no hace parte del sistema integrado de transporte). De cada tipología se tomó el registro del mejor vehículo.

- Límites de velocidad bajo regulación dado que la prueba demanda tener el vehículo en movimiento se deben respetar límites y señalización de tránsito, velocidad máxima 60 [km/h].
- Instrumentación los instrumentos involucrados para este ejercicio fueron el GPS y una quinta rueda (ver anexo A).
- La aceleración se obtiene derivando la señal de velocidad usando el método (Ecuación 4-4)

Ecuación 4-4 Método numérico derivación de velocidad

$$f' \cong \frac{-f_2 + 8f_1 - 8f_{-1} + f_{-2}}{12h}$$

Bajo las condiciones establecidas se desarrollaron pruebas de desaceleración en los seis (6) vehículos relacionados, en las siguientes tablas se aprecian los resultados obtenidos por clase de vehículo: articulado, buseta, micro-bus y la camioneta Mazda.

Estimación de coeficientes de arrastre y rodadura

Como se puede ver en la Ecuación 4-3 para obtener los valores experimentales de los coeficientes asociados a las fuerzas resistivas es necesario medir mínimo dos pares de datos de velocidad-aceleración en cierto tiempo. Con esto se obtendrían dos ecuaciones con dos incógnitas que se podrían resolver algebraicamente con gran facilidad. En cada vehículo se desarrollaron mínimo seis (6) desaceleraciones. Para procesar los datos y obtener los coeficientes de cada vehículo se implementa el método de mínimos cuadrados que se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 4-5 Representación matricial para implementar método de mínimos cuadrados por medio de la Ecuación 4-3

$$A^T * A * X = A^T * B$$

Donde (A) es una matriz que contiene la velocidad de forma implícita y (B) es un vector que contiene la aceleración también de forma de forma implícita. (X) es el vector que contiene los coeficientes que se quieren encontrar. A continuación se muestra la estructura de estos (Ecuación 4-6).

Ecuación 4-6 Expansión Ecuación 4-5

$$A = \begin{bmatrix} -0,5 * \rho * A * V_1^2 & -W \\ -0,5 * \rho * A * V_2^2 & -W \\ \vdots & \vdots \\ -0,5 * \rho * A * V_n^2 & -W \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} M_{eq} * a_1 \\ M_{eq} * a_2 \\ \vdots \\ M_{eq} * a_n \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} Cd \\ Cr \end{bmatrix}$$

Se resuelve el sistema para (X) obteniendo la Ecuación 4-7

Ecuación 4-7 Sistema resuelto para (X)

$$X = (A^T * A)^{-1} * (A^T * B) \quad (8)$$

La fuerza de resistencia aerodinámica calculada como se indica en la Ecuación 3-10. La energía perdida por esta fuerza en el vehículo es calculada como el trabajo producido por el desplazamiento del vehículo.

Ecuación 4-8 Trabajo desarrollado por la fuerza aerodinámica (fae)

$$W_{ae} = \int_{S_0}^{S_n} F * ds = \int_{S_0}^{S_n} fae * ds$$

Ecuación 4-9 Perdidas de energía debido a resistencia aerodinámica

$$E_{loss\ fae} = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_{st} * \int_{S_0}^{S_n} (\vec{v}_v - \vec{v}_0)^2 * ds / 3600 ; [kWh]$$

Donde el trabajo en (kilo julios [kJ]) obtenido de la Ecuación 4-9 es convertido a kilovatio-hora dividiendo por tres mil seiscientos (3600).

Análogo es el procedimiento para calcular la energía perdida por resistencia a la rodadura (Ecuación 4-10 y Ecuación 4-11).

Ecuación 4-10 Trabajo desarrollado por la fuerza de resistencia a la rodadura (frr)

$$W_{frr} = \int_{S_0}^{S_n} F * ds = \int_{S_0}^{S_n} frr * ds$$

Ecuación 4-11 Pérdidas de energía debido a resistencia a la rodadura

$$E_{loss frr} = \frac{mur * \int_{S_0}^{S_n} fv * ds}{3600} ; [kWh]$$

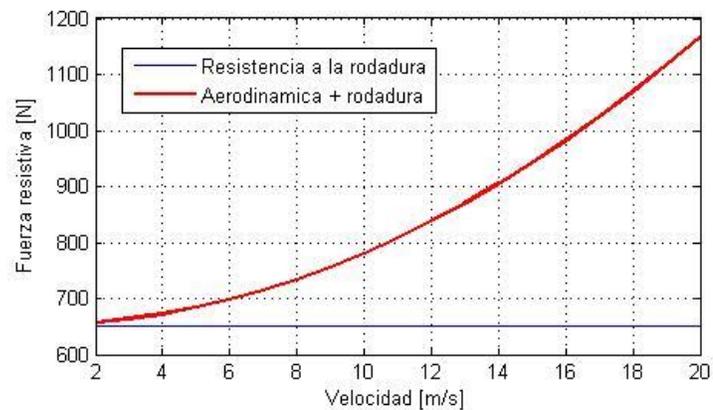
La suma de las dos energías representa la pérdida total por fuerzas resistivas en un perfil de desaceleración. Este valor de pérdidas en la rodadura del vehículo es clave en la programación del ciclo de manejo en el dinamómetro porque permite establecer qué valor de carga se debe programar.

Un valor correcto en la simulación de las fuerzas resistivas en el dinamómetro para un ciclo de manejo garantiza resultados cercanos a los que el vehículo presentaría en operación normal. Estos valores también son base para el modelo de dinámica vehicular y estimar el consumo energético al eje del vehículo para pruebas en ruta a bordo del vehículo.

En el algoritmo SAE (1263) (ver anexo B) se desarrolla el método descrito.

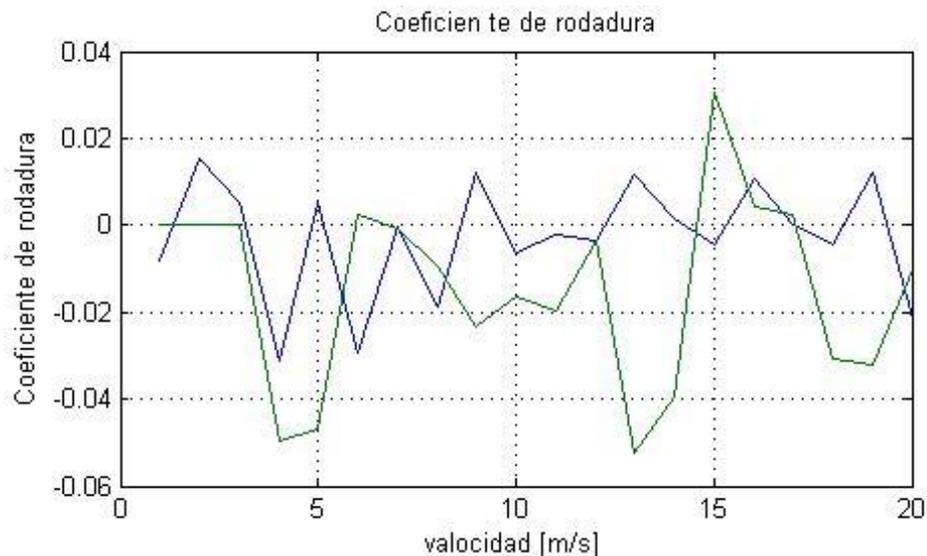
Resultados

En el algoritmo SAE (1263) (ver anexo B) se desarrolla el método descrito. La Figura 4-2 presenta las fuerzas resistivas obtenidas de las pruebas de desaceleración y procesamiento de los datos obtenidos para un vehículo tipo buseta donde la fuerza de resistencia aumenta a medida que lo hace la velocidad como se esperaba y la fuerza de resistencia a la rodadura se mantiene en un valor estable.

Figura 4-2 Perfil fuerzas resistivas buseta Mercedes Benz

Fuente: GICAEPMA

El coeficiente de resistencia a la rodadura se aprecia en la Figura 4-3 para la buseta marca Mercedes Benz (ver anexo E).

Figura 4-3 Coeficiente resistencia a la rodadura de una buseta Mercedes Benz

Fuente: GICAEPMA

Los coeficientes aerodinámicos y de resistencia a la rodadura se presentan en la Tabla 4-16. Los resultados son congruentes en escala con datos presentados en otras publicaciones. Architecture Ogburn [50] y [51] respectivamente, difieren en dimensión porque las condiciones ambientales en Bogotá son diferentes ofreciendo menor resistencia el aire debido a la altura sobre el nivel del mar.

Tabla 4-16 Resultados de experimentos de desaceleración

Resultados de experimentos fuerzas resistivas			
Tipología vehículo	Velocidad promedio viento [m/s] [+0.1]	Coefficiente de arrastre aerodinámico	Coefficiente de resistencia a la rodadura
Articulado ^o	3.5	0.825	0.0182
Buseta	4	0.596	0.013
Microbús	4.2	0.481	0.014
Camioneta ⁷	3.5	0.325	0.014

Fuente: GICAEPMA

La velocidad promedio del tiempo fue registrada de la estación ambiental del salitre. Como resultado los coeficientes promedio de arrastre aerodinámico y resistencia a la rodadura son también usados para calcular la energía perdida.

El dinamómetro con el que cuenta la ciudad de Bogotá, para ser programado con las cargas de fuerzas resistivas solicita conocer la potencia perdida del vehículo debido a fuerzas resistivas a una velocidad de ochenta kilómetros por hora (80[km/h]), sin embargo las pruebas de desaceleración autorizadas alcanzaba ese valor, utilizando la extrapolación y la relación de la Ecuación 3-10 se calculan los valores de pérdidas de energía arrojando los valores listados en la Tabla 4-17 para cada tipología de vehículo.

⁷ El vehículo no corresponde a la tipología (M) buses, sin embargo se tiene en cuenta porque hace parte del experimento de validación del ciclo de manejo.

Tabla 4-17 Resultados pruebas desaceleración extrapoladas a (80 [km/h]) para programar dinamómetro

Resultados pérdidas por fuerzas resistivas a (80 [km/h])				
Tipología vehículo	Potencia máxima dyno [kW] [+1]	Pérdidas en porcentaje debido a fuerzas resistivas [%]	Pérdidas debido a arrastre aerodinámico [%]	Pérdidas debido a resistencia a la rodadura [%]
Articulado	135	23.4	9.79	13.59
Buseta	75	15.6	8.97	6.61
Microbús	60	12.1	6.95	5.09
Camioneta ⁸	53	4.27	2.21	2.06

Fuente: GICAEPMA

Los resultados concuerdan en escala con los datos presentados por [27], donde se presentan un treinta por ciento (30[%]) en pérdidas debido a fuerzas resistivas en condiciones de operación análogas a las desarrolladas en este experimento, excepto las condiciones ambientales que en Bogotá cambian, la densidad del aire al descender produce como efecto una caída en la fuerza de resistencia aerodinámica respecto a la presentada por [27]. En la **Tabla 4-17** se aprecia que las pérdidas en buses son del veintitrés por ciento (23[%]) a ochenta kilómetros por hora (80 [km/h]) para la operación en Bogotá.

En el desarrollo de ciclos para la ciudad de Bogotá, los valores de carga respecto a las fuerzas resistivas que se deben simular en el dinamómetro representan el **(24) (16) y el (12)** por ciento respectivamente para cada tipología del sistema integrado de transporte. De programarse valores superiores se producirá un aumento en consumo de combustible que no será representativo de la operación normal del vehículo.

⁸ Leer nota al pie (7).

Experimento (2). Consumo a carga constante

La medición de consumo de energía en carga constante consistió en poner el vehículo a rodar sobre el chasis dinamométrico a carga constante simulando una ruta con pendiente de (2.5[%]) que corresponde al valor promedio de pendiente en las rutas que operan los vehículos del SITP[24] y con la carga de fuerzas resistivas propuestas en el experimento (1) (ver Tabla 4-17).

Durante un periodo de diez minutos (10 [min]) a una velocidad del motor del sesenta por ciento de la máxima velocidad del motor. Esta prueba se hizo bajo estas condiciones de operación siguiendo lineamientos de la metodología de emisiones de la unión europea para pruebas a carga constante.

Los resultados arrojados en la Tabla 4-18 muestran la primera línea base de consumo de energía al freno, que será la referencia inicial de consumo. Un experimento en estado estable y con carga constante como el presentado en este ejercicio es una referencia de bajo consumo debido a las condiciones de estado estable. Luego es de esperar que el consumo en ciclos de manejo y las pruebas en ruta aumente.

Tabla 4-18 Resumen resultados promedio y desviación estándar para energía al freno a carga constante

Resumen resultados de experimentos carga constante en dinamómetro a (40[km/h]) durante (10 [min])					
Tipología vehículo	Distancia recorrida sobre dyno [km]	Potencia máxima entregada [kW]	Potencia media [kW] registrada	Energía consumida al freno [kWh]	Eficiencia al freno [kWh/km]
Articulado	5.94 +- 0.88	135 +-1	33.75	5.1	0.8
Buseta	6.38 +- 0.32	75 +-1	18.75	3.1	0.50
Microbús	5.7 +-0.16	60 +-1	15	2.5	0.43
Camioneta ⁹	6.3 +-0.49	53 +-1	13.25	2.1	0.33

⁹ El vehículo no corresponde a la tipología (M) buses, sin embargo se tiene en cuenta porque hace parte del experimento de validación del ciclo de manejo.

Fuente: GICAEPMA

Los resultados presentados en la Tabla 4-19 presentan los resultados obtenidos con los flujómetros, es decir energía total.

Tabla 4-19 Resumen resultados promedio y desviación estándar para consumo y eficiencia energética sobre dinamómetro

Resumen resultados de experimentos carga constante en dinamómetro a (40[km/h]) durante (10[min])			
Tipología vehículo	Combustible consumido[L]	Eficiencia real combustible [L/100 km]	Eficiencia [kWh/km]
Articulado	1.48 +-0.082	25.18 +-2.96	2.64 +-0.31
Buseta	1.06 +-0.036	16.66 +-1.36	1.75 +-0.14
Microbús	0.80 +-0.016	12.36 +-0.48	1.30 +-0.05
Camioneta ¹⁰	0.61 +-0.013	10.13 +-1.05	1.06 +-0.11

Fuente: GICAEPMA

Para más detalle ver anexo D.

Experimento (3). Consumo con carga variable

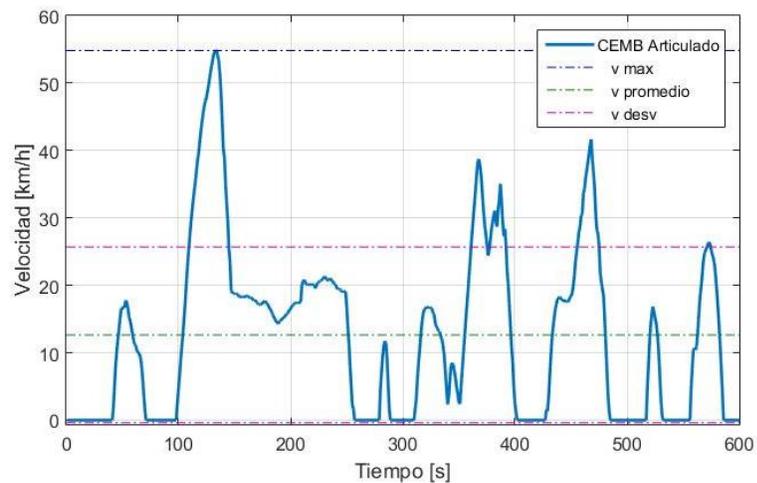
El desarrollo de este experimento se divide en dos etapas: consumo de combustible en pruebas de ruta a bordo del vehículo y consumo en pruebas de laboratorio sobre chasis dinamométrico.

Este experimento se desarrolló con dos ciclos de manejo diferentes porque las tipologías involucradas así lo requerían, luego los ciclos de referencia son:

1. El ciclo de manejo para evaluación de emisiones en vehículos articulados en la ciudad de Bogotá. Este ciclo no fue construido con el método desarrollado con el presente estudio porque aún no existía y las pruebas se debieron hacer de acuerdo al calendario del vehículo. (Figura 4-4 **Error! Reference source not found.**)

¹⁰ Leer (9)

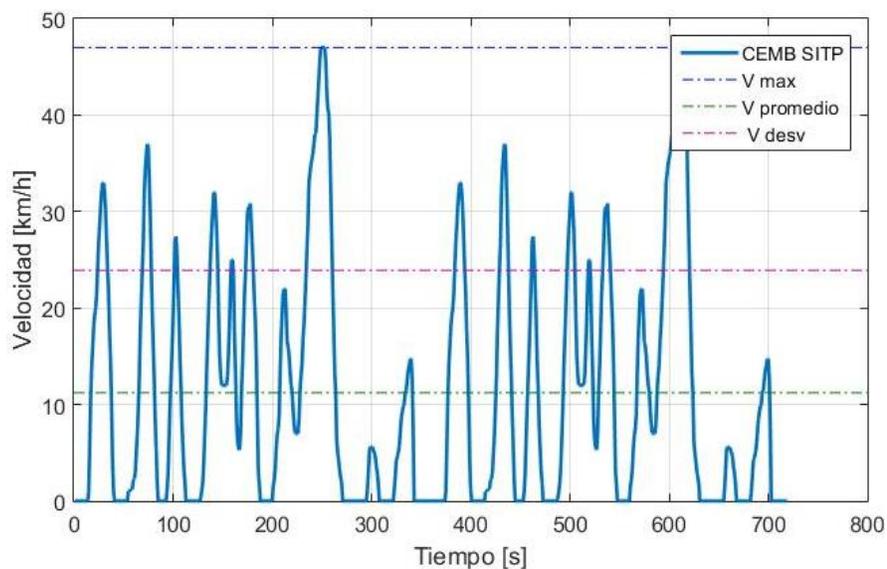
Figura 4-4 Ciclo de manejo para evaluación vehículos articulados (No construido bajo el método acá propuesto)



Fuente: GICAEPMA

2. El ciclo de manejo para evaluación de emisiones en vehículos convencionales del sistema integrado de transporte (SITP) en la ciudad de Bogotá. Este ciclo no fue construido con el método desarrollado con el presente estudio porque aún no existía y las pruebas se debieron hacer de acuerdo al calendario del vehículo. (Figura 4-5)

Figura 4-5 Ciclo de manejo para evaluación vehículos SITP (No construido bajo el método acá propuesto)



Fuente: GICAEPMA

La Tabla 4-20 presenta el resumen de consumo de las pruebas en ruta y las pruebas sobre el chasis dinamométrico, estableciendo la segunda línea base de consumo.

Tabla 4-20 Resumen de consumo para pruebas en ruta y en laboratorio simulando ciclos

Resumen resultados de experimentos velocidad y carga variable					
Tipología vehículo	Consumo en ruta 1 [L/100km]	Consumo en ruta 2 [L/100km]	Consumo en ruta 3 [L/100km]	Ciclo manejo 1 [L/100km]	Ciclo manejo 2 [L/100km]
Articulado	25.31	25.19	24.21	25.26	25.78
Buseta	13.22	15.35	10.54	17.62	18.54
Microbús	11.50	11.70	10.5	13.68	13.74
Camioneta ¹¹	10.1	11.1	11.2	13.39	12.50

Fuente: GICAEPMA

La Tabla 4-20 presenta el resumen estadístico de las pruebas, evidenciando que las medidas en la buseta presentan la mayor desviación estándar en las pruebas de ruta.

Tabla 21 Resumen de estadísticas en pruebas de carga variable.

Resumen estadísticos consumo vehículos				
Vehículo	Ruta		Dinamómetro	
	Promedio [L/100km]	Desviación estándar [L/100km]	Promedio [L/100km]	Desviación estándar [L/100km]
Articulado	24.903	0.603	25.520	0.368
Buseta	13.037	2.410	18.080	0.651
Microbús	11.233	0.643	13.710	0.042
Camioneta	10.800	0.608	12.945	0.629

Fuente: GICAEPMA

También se aprecia que el consumo de la camioneta es muy cercano al del micro bus, esto permite pensar que los demás resultados son también semejantes, sin embargo, no se pueden combinar por tipología.

¹¹ El vehículo no corresponde a la tipología (M) buses, sin embargo se tiene en cuenta porque hace parte del experimento de validación del ciclo de manejo.

Tabla 4-22 Resumen resultados de eficiencias energéticas en vehículos evaluados

Resumen resultados eficiencias energéticas					
Tipología vehículo	Eficiencia ruta 1 [kWh/km]	Eficiencia ruta 1 [kWh/km]	Eficiencia ruta 1 [kWh/km]	Eficiencia Ciclo 1 [kWh/km]	Eficiencia Ciclo 1 [kWh/km]
Articulado	2.65	2.64	2.54	2.65	2.70
Buseta	1.39	1.61	1.11	1.85	1.94
Micro-bus	1.21	1.23	1.10	1.43	1.44
Camioneta ¹²	1.06	1.16	1.17	1.40	1.31

Fuente: GICAEPMA

La Tabla 4-22 presenta los valores de eficiencia energética y la Tabla 4-23 presenta el resumen estadístico de las mismas.

Tabla 4-23 Resumen de estadísticas eficiencia energética

Resumen estadísticos consumo vehículos					
Tipología vehículo	Eficiencia Ruta		Eficiencia Dinamómetro		Error relativo Eficiencia
	Promedio [kWh/km]	Desviación estándar [kWh/km]	Promedio [kWh/km]	Desviación estándar [kWh/km]	
Articulado	2.61	0.06	2.68	0.04	-2.49%
Buseta	1.37	0.25	1.90	0.06	-38.32%
Micro-bus	1.18	0.07	1.44	0.01	-21.61%
Camioneta	1.13	0.06	1.36	0.06	-19.91%

Fuente: GICAEPMA

La Tabla 4-22 muestra la primera desviación entre los resultados en ruta y los resultados en laboratorio sobre dinamómetro, evidenciado dos cosas:

¹² El vehículo no corresponde a la tipología (M) buses, sin embargo se tiene en cuenta porque hace parte del experimento de validación del ciclo de manejo.

1. El ciclo de manejo de los vehículos convencionales del (SITP) no es representativo de las condiciones de operación reales, por tanto se debe implementar un ciclo que cumpla las condiciones requeridas.

Este ciclo como se mencionó no fue diseñado utilizando el método construido en esta investigación. Este ciclo nace de un método que no representa las condiciones de manejo de vehículos de transporte convencionales de Bogotá.

2. El ciclo desarrollado para vehículos articulados si representa con alto grado de precisión la operación real de la tipología. Este valor es esperado porque el método de diseño, utiliza un ciclo europeo de vehículos de carga pesada y buses que operan bajo condiciones semejantes a la de los buses articulados en troncales.

El método que propone esta investigación no parte de un ciclo base, solo usa los datos de (GPS) como referencia. En el experimento (4) se pone en evidencia la utilidad del método.

Experimento (4). Factores de corrección modelo y cargas en dinamómetro

Este experimento recurre exclusivamente a la instrumentación sobre la camioneta Mazda B2000 porque no fue posible desarrollar el ejercicio en un vehículo del sistema integrado de transporte debido al nivel invasivo de la instrumentación.

En este ejercicio se montó en el cardan, entre la salida de la transmisión y la entrada del diferencial un sensor de torque en línea capaz de medir momento estático y dinámico con una resolución de un Newton-metro en momento.

El objetivo es medir el consumo energético en ese punto bajo pruebas en ruta como en pruebas sobre chasis dinamométrico. Al vehículo además se le monto el sistema de medición de gases de combustión, el sistema de medición de flujo de gases de

escape, la quinta rueda, sensor de velocidad en el motor y sensor de posición del acelerador.

De ese modo es posible conocer:

- La energía en el cardan
- La energía en la rueda
- La energía a la salida del motor
- Las emisiones gaseosas
- Porcentaje de aceleración del motor

En este experimento el ciclo de manejo simulado es el desarrollado en el capítulo (2) del presente estudio. De ese modo se puede corregir y ajustar el modelo y las cargas sobre el dinamómetro para un vehículo de esta tipología.

En base a los resultados de este experimento se establecen dos tablas de parámetros para ajustar la carga en el dinamómetro y refinar el modelo de dinámica vehicular respecto a la potencia entregada.

Parámetros de ajuste dinamómetro usando sensor de torque en línea

Para construir la Tabla 4-24 se desarrollaron las pruebas normales de consumo, es decir se desarrolló la prueba de ruta en el sector indicado en la introducción de este artículo, con la instrumentación relacionada, y con la información de velocidad obtenida de la quinta rueda se diseñó un ciclo de manejo.

El cual fue programado en el dinamómetro y se desarrollaron tres simulaciones bajo una carga de cuatro kilovatios (4[kw]) debido a fuerzas resistivas (ver Tabla 4-17).

En la Tabla 4-24 se aprecia que los valores de corrección en potencia al eje del motor son del doce por ciento (12 [%]) por debajo, es decir los consumos de la simulación sobre el dinamómetro son más altos por kilómetro desplazado.

Tabla 4-24 Pruebas en ruta y sobre dinamómetro para ajustar parámetros de carga

Resumen resultados de experimentos sensor torque en línea para pruebas en ruta con pendiente media del (2.5[%]) y pruebas en laboratorio			
Prueba	Energía en dyno [kWh/km]en motor	Energía en dyno [kWh/km]en cardan	Energía en dyno [kWh/km] en rueda
Resultados dinamómetro			
Prueba 1	0.179	0.162	0.158
Prueba 2	0.154	0.136	0.132
Prueba 3	0.179	0.162	0.158
Promedio	0.171	0.153	0.149
Desviación estándar	0.015	0.015	0.015
Resultados ruta			
Prueba 1	0.153	0.145	0.141
Prueba 2	0.151	0.143	0.14
Promedio	0.152	0.144	0.1405
Desviación estándar	0.00	0.00	0.00
Desviación	-12%	-6%	-6%

Fuente: GICAEPMA

Parámetros de ajuste modelo usando sensor de torque en línea

Tabla 4-25 Resumen resultados simulaciones sin ajustar del modelo de dinámica vehicular

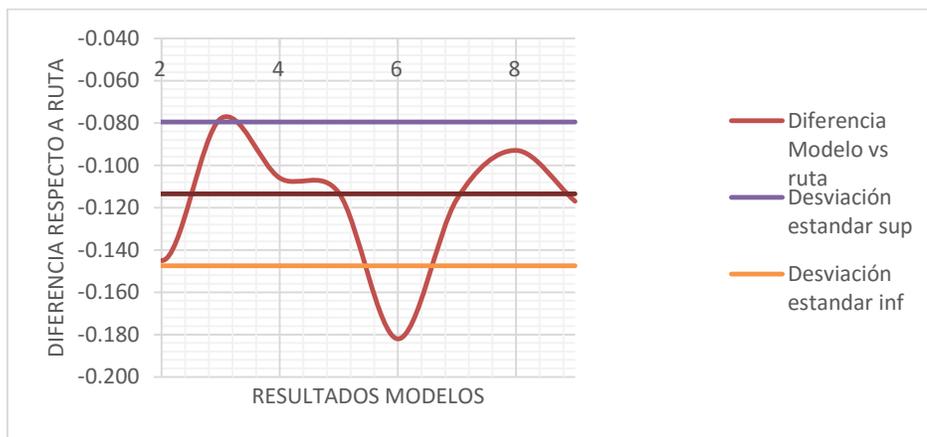
Resumen resultados de experimentos sensor torque en línea para pruebas en ruta con pendiente media del (2.5[%]) y modelo de dinámica vehicular sin ajustar	
Prueba	Eficiencia [kWh/km]
Resultados modelo	

Simulación 1	0.223
Simulación 2	0.297
Simulación 3	0.230
Simulación 4	0.258
Simulación 5	0.265
Simulación 6	0.334
Simulación 7	0.268
Simulación 8	0.245
Simulación 9	0.269
Resultados ruta	
Prueba 1	0.153
Prueba 2	0.151
Promedio	0.152
Desviación estándar	0.0014

Fuente: GICAEPMA

La Tabla 4-25 presenta simulaciones que no están ajustadas en consumo y comparadas con respecto a los valores de las pruebas en ruta casi que las duplican.

Figura 4-6 Diferencia entre eficiencia en ruta (referencia) y eficiencia modelo



Fuente: GICAEPMA

En la **Figura 4-6** se aprecia una diferencia en los resultados promedio de eficiencia en las simulaciones del modelo respecto al valor de eficiencia en ruta de (-0.113 [kWh/km]) este valor representa el setenta y cuatro por ciento menos (-74[%]) del valor de referencia en ruta, es decir los valores de eficiencia

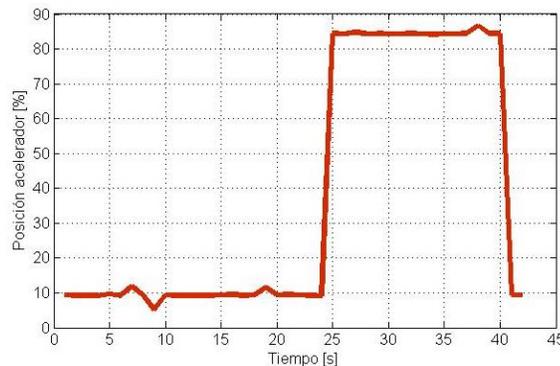
del modelo son altamente conservadores, el modelo en la simulación entrega más energía de la necesaria para recorrer el perfil de velocidad.

Para ajustar el modelo se utilizan dos condiciones: el estado de aceleración máximo impuesto en las simulaciones no debe ser superior el medido en ruta y el error se debe reducir lo más posible.

La Figura 4-7 **Error! Reference source not found.** representa la señal de la posición del acelerador en porcentaje, en el desarrollo de las pruebas en ruta como en las pruebas en laboratorio se apreció una posición máxima del (85[%]) y un valor medio del (67 [%]). Utilizando este parámetro como restricción en el modelo.

La carga del modelo también es corregida para que el vehículo no sea modelado cien por ciento cargado, en lugar sea modelado al setenta por ciento (70 [%]) de la máxima capacidad.

Figura 4-7 Valor máximo de aceleración del vehículo por parte del conductor (85[%])



Fuente: GICAEPMA

Consumo modelo ajustado vs experimento

Bajo las modificaciones descritas en la sección anterior y modificando los valores de modelación de la función motor en el algoritmo de dinámica vehicular se obtienen valores con errores no mayores al diez (10[%]). Como se ilustra en la Tabla 4-26.

Tabla 4-26 Resumen resultados simulaciones modelo ajustado de dinámica vehicular

Resumen resultados de experimentos sensor torque en línea para pruebas en ruta con pendiente media del (2.5[%]) y modelo de dinámica vehicular ajustado	
Prueba	Energía [kWh/km]
Resultados modelo	
Simulación 1	0.165
Simulación 2	0.159
Simulación 3	0.168
Simulación 4	0.168
Simulación 5	0.171
Simulación 6	0.161
Simulación 7	0.153
Simulación 8	0.164
Simulación 9	0.167
Resultados ruta	
Prueba 1	0.153
Prueba 2	0.151
Promedio	0.152
Desviación estándar	0.0014

Fuente: GICAEPMA

Respecto a los factores de emisiones calculados para la camioneta Mazda en pruebas en ruta y en dinamómetro se aprecia una desviación del (20[%]). Este valor elevado no se debe a la energía entregada al eje, este valor se revisó y mostro desviaciones del (12[%]).

Las emisiones ilustradas son un ejemplo breve de factores de emisión por energía consumida al freno por el vehículo.

(ver

Tabla 4-27)

Tabla 4-27 Emisiones Mazda B2000 en pruebas de ruta y pruebas en laboratorio

Resumen resultados de experimentos sensor torque en línea para pruebas en ruta y en laboratorio sobre dinamómetro con ciclo de manejo diseñado relacionado a emisiones				
Prueba en ruta				
Prueba	CO ₂	CO	NO _x	HC
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Prueba 1	1996.05	985.98	0.121	3.28
Prueba 2	1804.15	1086.87	0.124	3.63
Prueba en laboratorio sobre dinamómetro				
Prueba	CO ₂	CO	NO _x	HC
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Prueba 1	1510.53	746.14	0.091	2.49
Prueba 2	1514.81	912.56	0.104	3.05
Promedio y desviación estándar en ruta				
Promedio	1900.10	1036.43	0.12	3.46
Desviación	135.69	71.34	0.00	0.25
Promedio y desviación estándar en laboratorio				
Promedio	1512.7	829.4	0.1	2.8
Desviación	3.0	117.7	0.0	0.4
Error relativo	20.3 %	19.1 %	20.1 %	18.2 %

Fuente: GICAEPMA

Contextualizando el siguiente capítulo

Este artículo ha presentado el análisis experimental desarrollado para evaluar las pruebas en ruta, las pruebas en laboratorio, establecer los parámetros de corrección en el dinamómetro del (12[%]) y en el modelo de dinámica vehicular del (8[%]).

De este modo se han caracterizado todas las partes que componen la metodología y resta presenta la compilación de los resultados. El siguiente capítulo escrito en forma recomendación técnica: presenta la metodología desarrollada y

que es recomendada para establecer un método de medición de eficiencia, consumo y base para obtener emisiones por kilovatio-hora en buses compuesto de dos pruebas: Prueba en ruta y prueba en laboratorio.

Capítulo 5 . Metodología para obtener consumo energético, factores de emisión en [g/kWh] y factores de eficiencia en [kWh/km] de buses bajo pruebas en ruta a bordo del vehículo y pruebas en dinamómetro

Este capítulo presenta la forma final de una metodología desarrollada para obtener: el consumo energético, factores de eficiencia energética y factores de emisión en gramo por kilovatio-hora de vehículos de tipología (M) o buses que tengan motores de combustión interna y que operan en zonas urbanas bajo sistemas integrados de transporte público en la ciudad de Bogotá.

La implementación de la metodología pretende establecer los métodos para estandarizar los factores mencionados soportados por un procedimiento claro, con las debidas restricciones y

alcances para entregar valores que tengan sustento teórico y experimental. El hecho de desarrollar una metodología para este tipo de ejercicio garantiza que los resultados obtenidos tengan un alto grado de confianza y así ser utilizados para ver los efectos reales sobre análisis de economía, consumo e impacto ambiental en el sistema integrado de transporte.

Reseña

El objetivo de la metodología desarrollada en esta tesis fue investigar sobre los métodos de medición de consumo, obtención de eficiencia energética y obtención de factores de emisión por kilovatio-hora en vehículos tipo bus para transporte de pasajeros, para implementarlos en forma de estándar de regulación, normalización y homologación de vehículos en la ciudad de Bogotá. Además establecer que herramientas se necesitaban para garantizar que los métodos de medición en ruta y medición en laboratorio de eficiencia y consumo en vehículos sean:

- Métodos que se puedan implementar en la ciudad de Bogotá
- Métodos que sean complementarios, que la metodología que los respalda siga las pautas de metodologías internacionales.
- Métodos que presenten resultados que sigan pautas internacionales y al mismo tiempo sean representativos de la realidad de las dinámicas del transporte público en Bogotá.

Requerimientos

En el transcurso de la investigación se evidenció la necesidad de establecer una serie de requisitos para garantizar que los métodos son empleados correctamente.

- Previo a la aplicación de la presente metodología en algún estudio de eficiencia y consumo, se debe tener

presente que solo aplica en vehículos para transporte de pasajeros clase (M) o buses.

- La metodología estableció un orden lógico en la aplicación de los métodos, de cambiar el mismo no se garantiza el resultado obtenido.
- Los vehículos que sean objeto de estudio bajo la presente metodología son únicamente aquellos operados con motores DIESEL.

Instrumentación

Dentro de los experimentos desarrollados en la investigación se evaluó la desviación estándar, los valores promedio y los errores relativos entre las diferentes pruebas. Lo cual permitió ver la efectividad de los sensores que se utilizaron y establecer valores de tolerancia permisibles en la implementación de cada método. Los instrumentos necesarios y mínimos para desarrollar un estudio utilizando la metodología acá presentada son (Los instrumentos de medición para emisiones que corresponde a otra metodología no desarrollada en esta investigación NO son contemplados en esta metodología):

- Sistema de posicionamiento global (GPS)

Debe tener en precisión un valor horizontal mínimo de (2.5 [m]) y vertical de (2.0 [m]).

Debe tener una precisión en velocidad de mínimo (0.1 [m/s]).

Debe tener una tasa de muestreo de (1 [Hz]) o su equivalente en tiempo, un dato cada segundo.

Recepción de mínimo (50) canales.

Debe operar bajo frecuencia GPS L1 con sistema de corrección de señales WAAS, EGNOS y MSAS.

Sensibilidad mínima requerida (-160 a -146 [dBm])

- Sensor de posición gobernador motor de combustión interna

El sensor debe ofrecer una resolución de (+- 1 [%])

Debe tener una tasa de muestreo de (1 [Hz]) o su equivalente en tiempo, un dato cada segundo.

Debe tener protección contra agua y polvo excesivo.

- Chasis dinamométrico

En Bogotá actualmente solo se cuenta con un chasis dinamométrico que tiene la capacidad de operar con buses bajo las condiciones que se establecen en esta metodología, sin embargo las restricciones son:

Debe tener una resolución de (+- 1[kW]) Y (+- 1[Nm])

Debe tener una capacidad de carga a lo sumo de seis mil kilogramos (5500 [kg])

Debe tener una capacidad de frenado de al menos (300 [kW])

Debe contar con los protocolos de pruebas de potencia, simulación y programación de diferentes ciclos de manejo.

Debe tener una tasa de muestreo al menos de (1 [Hz]) o su equivalente en tiempo, un dato cada segundo.

- Balanza para vehículos

Debe tener una precisión en velocidad de mínimo (+- 10 [kg])

Debe tener una capacidad para vehículos pesados, mayor a (24 [Tn])

- Flujometros (opcional)

Debe tener una precisión en (+- 5 [ml]).

Al ser un instrumento de montaje invasivo se recomienda utilizar el modelo de dinámica ajustado y la prueba sobre dinamómetro para conocer consumos, porque los montajes de instrumentos invasivos inciden en el resultado y la operación normal del vehículo.

Debe ser seleccionado para cada vehículo basado en el consumo estimado que presenta la ficha técnica del vehículo.

Los instrumentos acá listados deben estar acompañados por:

- Ficha técnica de especificaciones
- Manual de operación y montaje
- Manual de calibración si el instrumento lo amerita o certificado de calibración.

Perfil del personal

- **Perfil profesional:** en la implementación de esta metodología el profesional requerido debe pertenecer al área de ingeniería. Debe contar con experiencia mínima en la evaluación de vehículos, manejo básico de instrumentación, habilidad en procesamiento de datos y criterio de evaluación de resultados (Este último implica que le profesional que desarrolla la metodología debe de antemano saber qué tipo de resultados esperar y tener el criterio de validar o no los datos).
- **Perfil técnico:** en la implementación de esta metodología el profesional requerido debe estar capacitado en el sector automotriz y electrónico. Pues es el quien debe

montar la instrumentación y desarrollar la prueba bajo las pautas indicadas por el profesional en ingeniería.

Condiciones de la prueba en ruta a bordo del vehículo

La metodología desarrollada mostro que:

- La prueba en ruta se debe desarrollar en días de no lluvia, porque el modelo de dinámica vehicular y el método de desarrollo de ciclos de manejo no considera este efecto que produce alto deslizamiento y condiciones de operación del vehículo diferentes.
- La ruta de prueba debe seguir las pautas del estudio para el cual ha sido implementada esta metodología y ser reproducida mínimo tres (3) veces de forma oficial y una vez como reconocimiento.
- La instrumentación montada a bordo del vehículo debe ser asegurada y debe soportar las vibraciones del vehículo.
- El vehículo debe iniciar y terminar en el mismo punto de la ciudad cada repetición.
- En el vehículo deben estar presentes, mínimo el conductor y el personal técnico.

Condiciones de la prueba en laboratorio

La metodología desarrollada mostro que:

- Se deben seguir los protocolos de calibración y calentamiento del chasis dinamométrico para garantizar la correcta operación del equipo (ver anexo F).
- Las llantas del vehículo deben ser usadas y estar infladas hasta la presión sugerida por el fabricante, los estándares SAE recomiendan al menos (3000 [km]) de uso.

- El equipo debe ser operado por el personal técnico o profesional únicamente para garantizar que se desarrolle la prueba de acuerdo a las condiciones de la metodología.
- Durante la operación del dinamómetro se debe controlar la temperatura de las ruedas (no debe ser superior a 95 [°C]) y de la unidad de absorción de energía del dinamómetro (no debe ser superior a 450 [°C]), de lo contrario de debe detener la prueba.
- Previo a la prueba en laboratorio sobre el chasis dinamométrico se debe tener el ciclo de manejo y los valores de carga a programar en kilovatios a obtenidos a una velocidad de (80 [km/h]).

Método

Los métodos estudiados en la metodología propuesta muestran que el orden lógico en la implementación de la misma es:

1. Identificar las características técnicas del vehículo:
 - a. Tipología
 - b. Dimensiones generales: distancia entre ejes, ancho alto, peso en vacío y capacidad de carga.
 - c. Especificaciones técnicas motor, tren de transmisión y ruedas.
2. Montar la instrumentación en el vehículo.
3. Identificar y hacer reconocimiento de la ruta sobre la cual debe ser caracterizado el consumo y la eficiencia del vehículo.
4. Desarrollar las pruebas de desaceleración para caracterizar las fuerzas resistivas según la recomendación SAE(J1263) [39].
5. Desarrollar el método de prueba en ruta a bordo del vehículo sobre la ruta definida, mínimo tres ocasiones.
6. Procesar los datos validar los resultados obtenidos asegurando que la instrumentación opere correctamente.

7. Desarrollar el método de diseño de ciclos de manejo para obtener el perfil de velocidad que se debe programar en el dinamómetro.
8. Simular el vehículo en el perfil de (GPS) filtrado.
9. Programación del ciclo de manejo y cargas de resistencia a la rodadura en el dinamómetro.
10. Desarrollar las pruebas sobre chasis dinamométrico.
11. Procesamiento de datos: filtración y organización de todas las pruebas.
12. Calculo de consumo y factores de eficiencia energética en pruebas en ruta y en laboratorio.
13. Validación de ciclo de manejo y validación de la prueba sobre sobre chasis dinamométrico.
14. Calculo de errores y estadística descriptiva de los resultados obtenidos.
15. Presentación de resultados en formatos diseñados (ver anexo F).

Descripción métodos definidos en metodología

Esta sección presenta la descripción de los métodos implementados en la metodología desarrollada:

Pruebas de desaceleración

Se siguen las pautas establecidas en el capítulo (2) que fueron tomadas del estándar SAE (J1263) y acondicionadas a las condiciones de Bogotá, su capacidad operativa y tecnología.

Como resultado se obtienen coeficientes resistivos y parámetros de carga para el dinamómetro.

Prueba en ruta

Esta prueba para las condiciones de Bogotá, la instrumentación establecida como requisito, las restricciones establecidas y el perfil del personal solicitado. Presenta en sus resultados errores menores al diez por ciento (10 [%]) referenciados a las medidas tomadas en la investigación desarrollada.

La prueba en ruta definida en esta metodología consiste en recorrer mínimo tres veces la ruta predefinida por el estudio que está siendo uso de esta metodología. Bajo las condiciones establecidas en este artículo.

Producto de esta prueba se tiene una primera línea base de consumo y eficiencia energética que son la referencia de la operación real del vehículo.

También se tienen los perfiles de GPS para montar en el modelo de dinámica vehicular ajustado para estimar consumo de energía al eje y al tiempo los perfiles de (GPS) son introducidos en el método de diseño de ciclos de manejo.

Diseño de ciclos de manejo

El capítulo (2) presenta el método y la forma en que los datos de las pruebas en ruta deben ser manipulados para obtener un ciclo de manejo, el cual se recomienda en esta metodología debe ser presentado como se ilustra en Tabla 2-3.

La investigación desarrollada logro que la correlación de los ciclos de manejo con los datos de (GPS) utilizados superara el (90 [%]). Dando así a la prueba que se desarrolle en laboratorio una representación muy cercana a la realidad.

Simulación dinámica vehicular

Presentado en esta metodología como una forma económica, rápida y efectiva de conocer el consumo del vehículo en pruebas de ruta, pretende evitar el uso de flujómetros para conocer el consumo y presentar un valor muy cercano a la realidad de la energía entregada al eje.

Para tener una simulación exitosa las especificaciones técnicas del vehículo deben ser lo más completas posibles. Y el perfil del (GPS) debe ser filtrado con el algoritmo propuesto en el capítulo (2).

Dentro de los resultados de las simulaciones se aprecia un error relativo del (12[%]) en promedio respecto a las medidas experimentales.

Prueba en laboratorio sobre dinamómetro

Esta prueba para las condiciones de Bogotá, la instrumentación establecida como requisito, las restricciones establecidas y el perfil del personal solicitado. Presenta en sus resultados errores menores al diez por ciento (5 [%]) referenciados a las medidas tomadas de las pruebas en ruta. La investigación desarrollada generó un patrón que sirve como criterio de error en este tipo de pruebas.

La prueba en laboratorio definida en esta metodología consiste en desarrollar una prueba de potencia sobre el dinamómetro y seguido simular mínimo tres veces el ciclo diseñado.

¿Qué resultados arroja la implantación de la metodología?

En el capítulo (1) en las dos primeras secciones se argumenta porque es necesario el desarrollo de una metodología para medir consumo y eficiencia en un vehículo.

Producto de los argumentos planteados surgen los objetivos de la metodología y los resultados que deben alcanzar.

Copiado del capítulo (1)

- Establecer factores de eficiencia energética reales (pruebas en ruta).

- Establecer la base energética para los factores de emisión por kilovatio-hora que representan la realidad (pruebas en ruta).
- Establecer factores de emisiones que están desarrollados bajo las mismas condiciones metodológicas internacionales (pruebas en laboratorio sobre dinamómetro), que garantizan repetitividad y normalización y son base para la homologación de vehículos, pruebas de rendimiento y eficiencia.

Contextualizando el siguiente capítulo

La metodología desarrollada cumple con los objetivos para la cual fue diseñada. A continuación, se citan las conclusiones del trabajo de investigación acá desarrollado.

Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

Del ejercicio de investigación desarrollado para generar una metodología robusta en la caracterización energética de vehículos del sistema integrado de transporte en la ciudad de Bogotá. Surgen conclusiones desde varios puntos de vista que aportaron conocimiento nuevo y fortalecieron el presente en el personal que participó del desarrollo de esta tesis.

Conclusiones que aportan tanto al grupo de investigación que financio este trabajo, como al sistema integrado de transporte de la ciudad y a la alcaldía que han utilizado parte de esta metodología y sus resultados en estudios ambientales y económicos.

Conclusiones

La metodología como la ciencia que estudia el método, ha mostrado en el desarrollo de esta tesis que investigar y rediseñar un procedimiento, en este caso para evaluar el consumo energético en vehículos. Asegura que los resultados obtenidos van a tener un respaldo robusto que los hace más confiables y útiles, diferente a un grupo de datos sin respaldo teórico ni experimental validado.

La metodología presentada, aunque sencilla, garantiza que la organización o grupo de trabajo que la utilice conozca bien de donde provienen sus resultados y cuál es el error que traen implícitos.

Respecto a los ciclos de manejo se puede apreciar que el método diseñado entrega ciclos de manejo cuyos perfiles de velocidad son altamente representativos de las condiciones de operación real, presentando factores de correlación mayores al (90[%]). Que es claro y fácil de implementar.

La implementación de la recomendación SAE (J1263) ha permitido establecer valores reales de pérdidas de energía que son inferiores o iguales al (25[%]) del consumo de energía efectivo de los vehículos, evidenciado en el experimento (1).

La simulación de la carga sobre el chasis dinamométrico con las cargas resistivas calculadas, ha permitido caracterizar completamente la realidad de la operación de un vehículo sobre el chasis dinamométrico evidenciado en el experimento (2) y en el experimento (3) donde se presenta el veinte (20 [%]) por ciento como error relativo para los vehículos que han sido evaluados bajo los ciclos de manejo no desarrollados bajo esta metodología, teniendo como referencia la medición de consumo de combustible en ruta y utilizando ciclos de manejo desarrollados bajo la metodología acá planteada, los resultados han mostrado un error relativo a las pruebas en ruta menor al (10 [%]).

Respecto al consumo de combustible, el montaje de los flujómetros es la mejor manera de medir de forma directa. Sin embargo, un montaje mal hecho o un flujómetro mal seleccionado arruinan la prueba, de ahí que el anexo de instrumentación sea tan detallado especificando el montaje del dispositivo.

La propuesta del modelo de dinámica vehicular como un método para estimar el consumo energético del vehículo en pruebas en ruta de modo no invasivo, económico y fácil de implementar con un ajuste sencillo. Ha logrado entregar errores en velocidad en las simulaciones presentadas de (+- 5 [%]) y valores de consumo de energía (+- 10 - 12 [%]).

Al involucrar los dos métodos en esta propuesta, se han logrado varias cosas: conocer el error relativo que existe entre las dos partes, las pruebas en ruta y las pruebas en el laboratorio.

Formular un método efectivo para diseñar ciclos de manejo, programarlos y validar su representatividad del mismo, entregando valores numéricos que describen el ciclo lo mejor posible.

Seguir pautas internacionales de control de emisiones bajo pruebas en laboratorio sobre chasis dinamométrico y establecer los criterios de las pruebas en ruta para conocer valores reales de operación.

Plantear la metodología de esta forma es importante en la actual situación internacional de regulación de emisiones, donde se está

viviendo una reestructuración de las metodologías de emisiones y eficiencia para regulación, donde las pruebas en laboratorio se están dejando de lado por pruebas en ruta a bordo del vehículo.

Recomendaciones

Por mejorar queda todo siempre, porque constantemente las tecnologías, el crecimiento de la población y las dinámicas del transporte no son estables y demandan constantemente medios que la hagan mejor, luego con el tiempo la propuesta acá presentada será obsoleta. Sin embargo establece una base sólida para futuros trabajos relacionados con el desarrollo de metodologías de medición de consumo energético en vehículos.

Respecto al algoritmo de ciclos de manejo desarrollado, el código que está completamente comentado es apto para ser mejorado en el sentido de consumo computacional, el algoritmo programado le toma alrededor de media hora procesar tres horas de datos de GPS.

Respecto al modelo de dinámica vehicular implementar un control más robusto haría menos tedioso ajustar el modelo para que los datos entregados sean realmente útiles.

En el dinamómetro que se desarrolló el presente estudio es posible programar un ciclo de carga para un vehículo, es decir que simule cambiar la pendiente y la carga del vehículo, diseñar un algoritmo que genere ciclos de carga para este dinamómetro se considera que es una herramienta que podría representar mejor las condiciones de operación del vehículo que el actual método de diseño de ciclos.

Bibliografía

- [1] "ISO - ISO Standards - ISO/TC 12 - Quantities and units." [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=46202. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [2] "World Bank Group." [Online]. Available: <http://www.worldbank.org/>. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [3] "Urban Development Overview." [Online]. Available: <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview#1>. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [4] "Public Transport Service and System Integration." [Online]. Available: http://wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2015/09/08/090224b082df94b5/1_0/Rendered/PDF/Public0transpo0d0system0integration.pdf. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [5] "Sistema de Transporte Público de Bogotá - SITP." [Online]. Available: <http://www.sitp.gov.co/>. [Accessed: 06-Jan-2016].
- [6] "EUROPA - EU law." [Online]. Available: http://europa.eu/eu-law/index_en.htm. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [7] U. Nations and I. T. Committee, *Economic and Social Council World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations*, no. January. 2014.
- [8] "Emission Standards: Europe: Heavy-Duty Truck and Bus Engines." [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [9] Diario Oficial de la UE, *Reglamento (CE) 595/2009*. 2009, pp. 1-13.
- [10] U. EPA, *Emission Standards Reference Guide | US EPA*. .
- [11] U.S. Environmental Protection Agency, *Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards*, vol. m, no. March. 2014, pp. 5-9.

-
- [12] "Galvanized by VW Scandal, E.P.A. Expands On-Road Emissions Testing - The New York Times." [Online]. Available: http://www.nytimes.com/2015/11/09/business/energy-environment/epa-expands-on-road-emissions-testing-to-all-diesel-models.html?_r=0. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [13] "How Engineers at West Virginia University Caught VW Cheating - IEEE Spectrum." [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/advanced-cars/how-professors-caught-vw-cheating>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [14] "¿Qué son la repetitividad y la reproducibilidad?" [Online]. Available: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMA09/datapoints_spma09.html. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [15] "Resolución 0910 de 2008." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=31146>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [16] "Norma Técnica Colombiana NTC (5375)." [Online]. Available: <http://tienda.icontec.org/brief/NTC5375.pdf>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [17] "Norma Técnica Colombiana NTC (4231)." [Online]. Available: <http://tienda.icontec.org/brief/NTC4231.pdf>. [Accessed: 08-Jan-2016].
- [18] "Real Academia Española. Diccionario Usual." [Online]. Available: <http://lema.rae.es/drae/srv/search?key=metodolog%C3%ADa>. [Accessed: 20-Jan-2016].
- [19] P. AL-IUDIN and M. ROSENTAL, *Diccionario filosofico Marxista*, 3rd ed. Moscou, 1945.
- [20] D. D. E. L. Consejo, *Directiva 1999/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de Diciembre de 1999*, no. 3. Diario oficial de las Comunidades Europeas, 1999, pp. 1-8.
- [21] United Nations, *Global technical regulation No. 4*, no. 4. 2007.
- [22] P. NEWMAN and J. KENWORTHY, *The end of Automobile Dependence*. Washington: IslandPress, 2015.
- [23] J. STRICKLAND, "Energy Efficiency of different modes of transportation," in *Lecture Notes from AA260 - Sustainable Aviation*, no. July 2006, California, 2009.
- [24] C. Martinez, S. D. De Ambiente, L. G. Erharth, J. L. Hernandez, D. Rodriguez, C. Marcela, C. Baene, S. P. Mendoza, M. Sandoval, and J. C. Melo, "Guía metodológica para la realización de pruebas en autobuses con tecnologías cero o bajas emisiones," Bogotá, 2013.

- [25] U.S.DOE, "Annual Energy Outlook 2015," p. 154, 2015.
- [26] J. L. Jiménez-palacios, "Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing," Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [27] M. Belzile, J. Patten, B. Mcauliffe, W. Mayda, and B. Tanguay, "Technical Report Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses," Ottawa, 2012.
- [28] A. Duran and M. Earleywine, "GPS Data Filtration Method for Drive Cycle Analysis Applications," 2012.
- [29] W. GANDER and H. Jiri, "Smoothing Filters," in *Solving Problems in Scientific Computing Using Maple and MATLAB®*, 4th ed., W. Gander and J. Hrebicek, Eds. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, p. 135.
- [30] X. TOMAS, J. CUADROS, and L. GONZÁLEZ, *Introducción al cálculo numérico*, 1st ed. Barcelona: Institut Químic de Sarria, 2006.
- [31] J. Brandy and M. O'Mahony, "The development of a driving cycle for the Greater Dublin Area Using a Large Database of Driving Data with a Stochastic and Statistical Methodology," *Proc. Irish Transp. Res. Netw.* 2013, p. 24, 2013.
- [32] Z. Dai, D. Niemeier, and D. Eisinger, "Driving cycles: a new cycle-building method that better represents real-world emissions," *U.C. Davis-Caltrans Air Qual. Proj.*, vol. 66, no. 66, p. 37, 2008.
- [33] S. S. Sumit Sharma, Anju Goel, R Suresh, C Sita Lakshami, Richa Mhatta, "Assessment of emission test driving cycles in India: A case for improving compliance," 2013.
- [34] C. Division and U. S. E. P. Agency, "Federal Test Procedure Review Project: Preliminary Technical Report May 1993," 1993.
- [35] E. W. W. Group, "Development of a World-wide Harmonised Heavy-duty Engine Emissions Test Cycle (Draft) Executive Summary Report," 2001.
- [36] T. Barlow, S. Latham, I. Mccrae, and P. Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions," p. 280, 2009.
- [37] ISO 8855, *ISO 8855:2011 Road vehicles -- Vehicle dynamics and road-holding ability -- Vocabulary*. 2011.
- [38] T. D. GILLESPIE, *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers. Inc., 1992.
- [39] SAE, *Road load measurement and Dynamometer simulation using coastdown techniques*, vol. 4970. 2002, pp. 1-39.

-
- [40] G. Details and F. Stroke, "Engine Specifications."
- [41] M. C. Castellví, "Benchmark of Tyre Models for Mechatronic Application," no. August, p. 103, 2011.
- [42] E. M. Khalid, G. Fouad, H. Ouadi, D. Luc, and Z. C. Fatima, "Vehicle longitudinal motion modeling for nonlinear control," 2011.
- [43] K. El Majdoub, F. Giri, H. Ouadi, L. Dugard, and F. Z. Chaoui, "Vehicle longitudinal motion modeling for nonlinear control," *Control Eng. Pract.*, vol. 20, no. 1, pp. 69-81, 2012.
- [44] N. Productos, "Diesel Corriente B2 / B4," pp. 1-3.
- [45] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, vol. 21. 1988.
- [46] U. Hammarström, R. Karlsson, and H. Sörenssen, "Road surface effects on rolling resistance-coastdown measurements with uncertainty analysis in focus," *Deliv. D5 (a). Swedish Road ...*, vol. 5, 2009.
- [47] N. CASTRO N., "Estudio experimental y computacional de la aerodinámica de un vehiculo comercial," Universidad de los Andes, 2012.
- [48] L. A. GARCÍA JOYA, "Efecto de la altura en el desempeño de un vehiculo a gasolina," Universidad de los Andes, 2012.
- [49] M. Vehicle and D. Rev, *VEHICLE RECOMMENDED (R) Motor Vehicle Dimensions*, vol. 4970. 2005, pp. 724-776.

Anexos

Anexo A. Instrumentación

El anexo A presenta las características técnicas, especificaciones de calibración y el montaje de la instrumentación implementada en el desarrollo de esta tesis.

Cada instrumento viene acompañado por su respectiva ficha técnica que la encuentra en el DVD anexo al impreso de este documento.

Analizador de gases



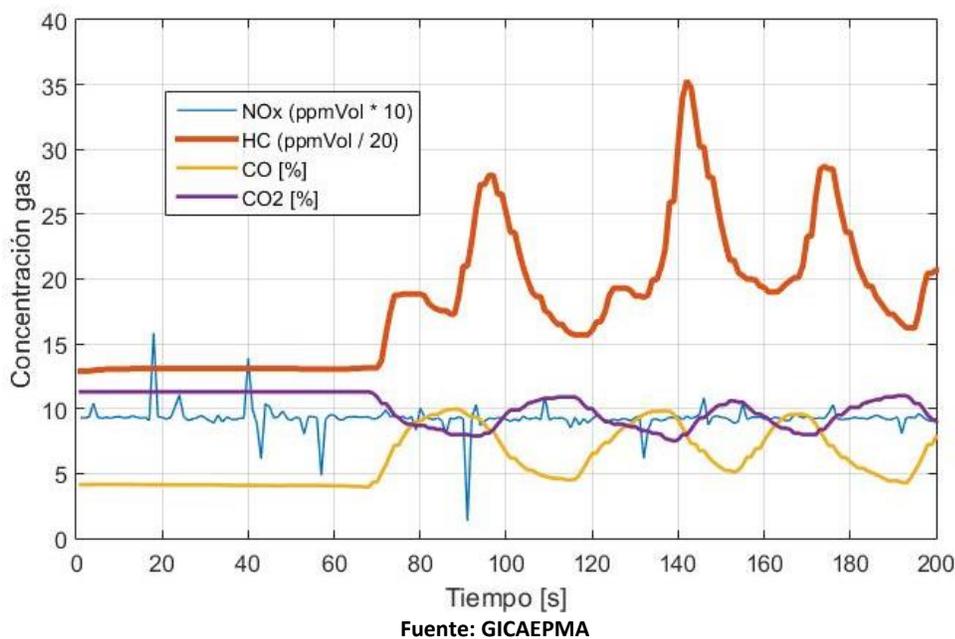
Este instrumento permite medir en tiempo real concentración de cinco (5) gases producto de la combustión en vehículos. Es utilizado en el registro de emisiones en el experimento de la camioneta Mazda B2000. Este instrumento trabaja junto al sistema de medición de flujo de gases de escape.

Especificaciones técnicas analizador de gases Brain Bee AGS-688		
Especificación	Rango	Resolución
Monóxido de carbono (CO)	0 - 9.99 [%] [V/V]	0.01 [%] [V/V]
Dióxido de carbono (CO ₂)	0 - 19.9 [%] [V/V]	0.1 [%] [V/V]
Hidrocarburos sin quemar (HC)	0 - 9999 [ppmVol]	1 [ppmVol]
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	0 - 5000 [ppmVol]	1 [ppmVol]
Oxígeno (O ₂)	0 - 25 [%] [V/V]	0.01 [%] [V/V]
Lambda	0.5 - 5	0.0001
Temperatura aceite	20 - 120 [°C]	1 [°C]
Caudal muestreo (Sonda6[m])	4 [l/min]	0.1 [l/min]

Presión admisible	(85 - 106 [kPa])	No aplica
Drenaje de condensado continuo y automático		
Control automático de flujo mínimo en muestra		
Filtro de protección vapor y agua		
Compensación automática de presión ambiente		
Calibración con botella de gas patrón		
Auto cero		
Tiempo de calentamiento sistema a (20 [°C]) en (10 [min])		
Respuesta de sensores de gases (<15 [s])		
Conexión USB / B en modo esclavo vía puerto (RS 232)		
Rango de operación de temperatura (5 - 40 [°C])		
Peso (5 [kg])		

Muestra de señal obtenida para los gases de combustión CO / CO₂ / HC / O₂. (Gráfica Anexo I)

Gráfica Anexo I Señal emisiones obtenidas del instrumento Brain Bee AGS-688



Sistema de medición de flujo de gases de escape GICAEPMA



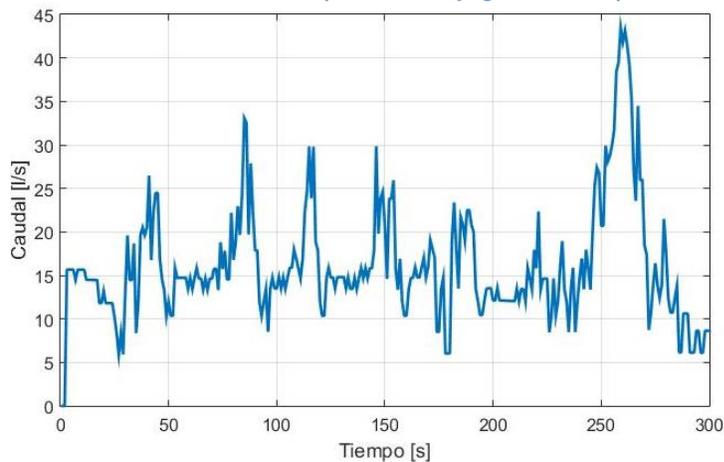
El sistema de medición de flujo de gas está compuesto por un tubo pitot calibrado de (50.8 [mm]) de diámetro en acero inoxidable. Que mide presión estática y presión total para obtener presión dinámica.

Este instrumento cuenta con un sensor de presión diferencial y un termopar para calcular el flujo del gas.

para calcular el flujo del gas.

Especificaciones técnicas flujo de gases de escape		
Especificación	Rango	Resolución
Medidor diferencial de presión CEM	+/- 35 [kPa]	0.01 [kPa]
Precisión medidor diferencial CEM	No aplica	+/- 0.3 [%]
Linealidad medidor diferencial CEM	No aplica	+/- 0.29 [kPa]
Termopar tipo (K) Poliempack	-200/1372 [°C]	1 [°C]
Caudal máximo	350 [l/s]	0.01 [l/s]
Tubo sonda acero inoxidable calibre (316) (50.8 diámetro 60[mm]) longitud		
Pitot sonda (6 [mm])		

Gráfica Anexo II Señal procesada flujo gases de escape



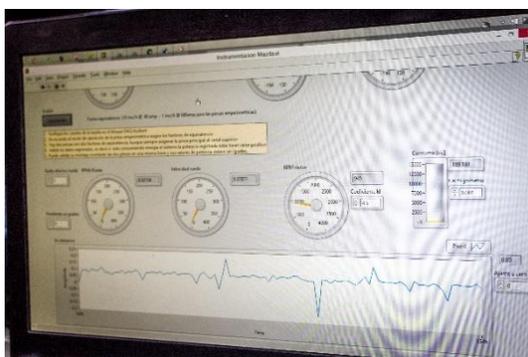
Fuente: GICAEPMA

Balanza vehículos



Ubicada en la ciudad de Bogotá en la Calle (15) N° (88D - 63) presenta un resolución de (+- 7 [kg]) y una capacidad superior a las (40[Tn]), permite pesar independiente cada eje del vehículo.

Computador portátil



En este computador se montó los programas de computador Matlab v2012a y Labview 2011. Para adquirir las señales de los sensores de registro de consumo, velocidad, torque, aceleración. También se montó los arrancadores de los instrumentos de medición de gases de emisión: Brain Bee y

Sistema de medición de flujo de gases.

También se procesaron los datos, se desarrollaron los algoritmos y el presente documento.

Especificaciones técnicas computador ASUS N55JR		
Especificación	Descripción	Resolución
Procesador i7-4700	2.4 [GHz]	No aplica
Memoria RAM	8 [Gb]	No aplica
Tipo sistema	64 [Bits]	No aplica
Sistema operativo	Windows 8	No aplica

Chasis dinamométrico



El dinamómetro es de especial interés dentro de este proyecto, está actualmente ubicado en el tecnoparque de Cazuca en el municipio de Suacha a las afueras de Bogotá, autopista sur Transversal (7) N° (8 - 40).

Este instrumento fue objeto de un ejercicio de tres (3) años de trabajo donde se actualizó, se calibró, se aprendió y se enseñó a programar correctamente y se construyó un protocolo de manejo en torno a este que comprende la base de las pruebas en laboratorio para eficiencia, consumo y emisiones, que en la actualidad maneja la secretaria de ambiente, de movilidad y la Universidad Nacional de Colombia, todos bajo la tutela de GICAEPMA quien ha designado el personal para convertir este instrumento en una herramienta útil.

El anexo (c) ilustra los procedimientos de pruebas en laboratorio sobre dinamómetro.

Especificaciones técnicas dinamómetro MD 400 Mustang		
Especificación	Rango	Resolución
Velocidad máxima	305 [km/h]	0.01 [km/h]
Capacidad máxima en momento	1700 [Nm]	0.01 [Nm]
Capacidad máxima en potencia	522 [Kw]	0.01 [kW]
Celda de carga CELTRON STC-1K	2.9982 [mv/v]	0.001 [mv]
Sensor efecto hall	168 [pulsos]	No aplica
Capacidad máxima	5500 [kg]	No aplica
Diámetro rodillos (0.27 [m])		

Temperatura máxima unidad de absorción de energía (600 [°C]) máximo por (5 [min])
Extractor de aire caliente (1 [kW])
Sistema neumático (551 [kPa])
Programa computador PowerDynePC v208
Tarjetas NI6221 y Asistente DAQ de National Instruments 2013
Potencia requerida (230 [VAC], tres fases, 60 (Hz), 40 [Amp])
Principio de operación: corrientes de Eddy

- Instrucciones de calibración

Este instrumento cuenta con el instructivo relacionado en el anexo (C) sin embargo se separa y resalta en esta sección. Se deben seguir cinco (5) procedimientos previos al desarrollo de cualquier tipo de experimento.

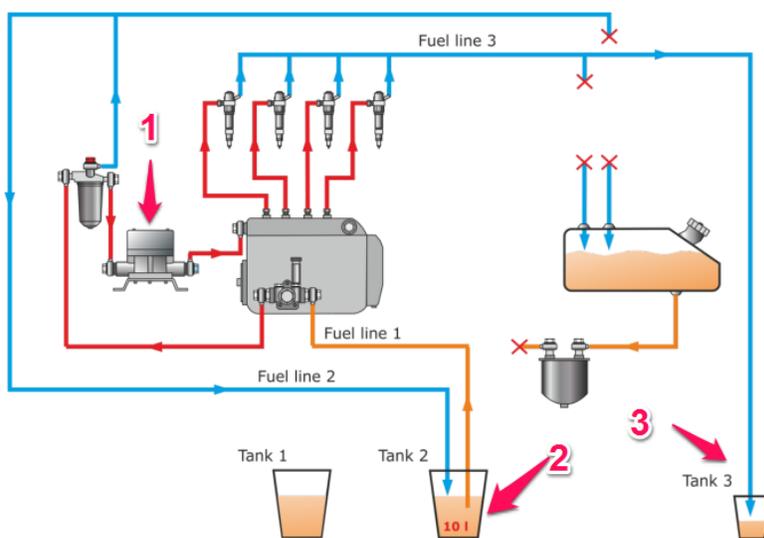
1. Sobre el dinamómetro el vehículo no puede ser frenado en seco, las ruedas que lleve el vehículo deben tener por lo menos más de (3000 [km]) y verificar que estén en buen estado e infladas hasta la presión sugerida por el constructor de las ruedas.
2. Registro del vehículo en el programa del dinamómetro
3. Desarrollo de protocolo para calibración de instrumento, calentamiento y filtración de corrientes parasitas. Tiempo recomendado (10 [min])
4. Calibración celda de carga (100 [Nm] valor de referencia)
5. Calibración velocidad del motor [RPM], como referencia medidor de [RPM] MGT (300). Debe registra velocidad en ralentí y velocidad de gobernación del motor.
6. Calibración velocímetro vehículo respecto a dinamómetro, error recomendado (<5[%]).
7. Registro de cargas resistivas (rodadura y resistencia a la rodadura en kilovatios a (80 [km/h])).

Flujómetros



Los flujómetros (DFM 100CK) están diseñados para medir combustible DIESEL en vehículos de amplio espectro.

Especificaciones técnicas flujometro DFM 100 CK		
Especificación	Rango	Resolución
Censa flujo desde	0.5 [l/h]	0.5 [l/h]
Capacidad máxima flujo	3 [l/h]	No aplica
Capacidad máxima flujo	100 [l/h]	No aplica
Error en medida	No aplica	0.001 [%]
Señal de salida pulso	0.7 [v] altura	0.001[mv]
Volumen de combustible por pulso	5 [mm/pulso]	Calibración
Máxima presión	25 [Bar]	No aplica
Consumo voltaje	10 - 50 [V]	No aplica
Consumo corriente	25 [mA]	No aplica
Temperatura operación	-40 / 80 [°C]	No aplica



El esquema mostrado indica el modo de calibración, involucrando la línea de alimentación, la línea de retorno y el flujometro.

Se debe medir por espacio de (10 [min]) el consumo en los tres (3) puntos como indica la gráfica.

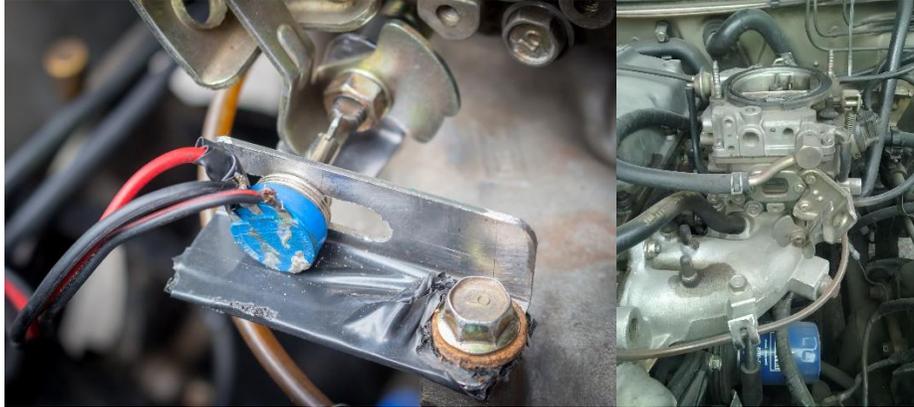
Quinta rueda



Es un dispositivo que registra velocidad y aceleración en el eje del vehículo se utilizó para el desarrollo de las pruebas del estándar SAE (J1263) para evaluar fuerzas resistivas en vehículos.

Especificaciones técnicas quinta rueda		
Especificación	Rango	Resolución
Encoder ACCU EPC		
Cantidad de pulsos	1000	No aplica
Voltaje alimentación	4.75 - 28 [VDC]	No aplica
Consumo corriente	100 [mA]	No aplica
Formato de salida	incremental	No aplica
Frecuencia máxima	1 [MHz]	No aplica
Máxima velocidad	8000 [RPM]	No aplica
Acelerómetro ADXL 355		
Sensibilidad ejes	X - Y - Z	No aplica
Voltaje alimentación	1.8 - 3.36 [V]	No aplica
Rango de medida	3 [g]	No aplica
Sensibilidad / eje	300 [mv/g]	No aplica
Estructura		
Cuerpo de movimiento relativo en aleación de aluminio 3004		
Ventosa de doble cuerpo máxima carga (80[kg])		
Barra telescópica en aluminio (1.7 [m])		

Mecanismo de posición mariposa de aceleración (Otto) y gobernador (Diesel)



Es un dispositivo que registra la posición de la mariposa de aceleración o del gobernador del motor de combustión interna (mci). Establece la aceleración impuesta por el conductor.

Especificaciones técnicas mecanismo aceleración		
Especificación	Rango	Resolución
Potenciómetro de (1) vuelta	1 [kohm]	0.01 [kohm]
Estructura en lamina cold roll cal. 22		

Tarjeta de adquisición de datos National Instruments



La instrumentación montada hasta el momento viene conectada todas sus señales de salida a esta tarjeta de adquisición de datos.

Especificaciones técnicas DAQ NI 6212		
Especificación	Rango	Resolución
Alimentación voltaje	5 [V]	No aplica
Canales análogos diferenciables	8 [unidades]	No aplica
Canales análogos simples	16 [Unidades]	No aplica
Resolución	16 [bits]	No aplica
Rata de muestreo	400 [ks/s]	No aplica
Máximo voltaje señal de entrada	+ - 10 [V]	No aplica
Impedancia por canal	10 [Gohm]	No aplica
Contadores	2 [Unidades]	No aplica

*Revisar ficha técnica DVD anexo para mayor detalle

Tanque auxiliar para medir combustible

Tanque 1



Tanque 2



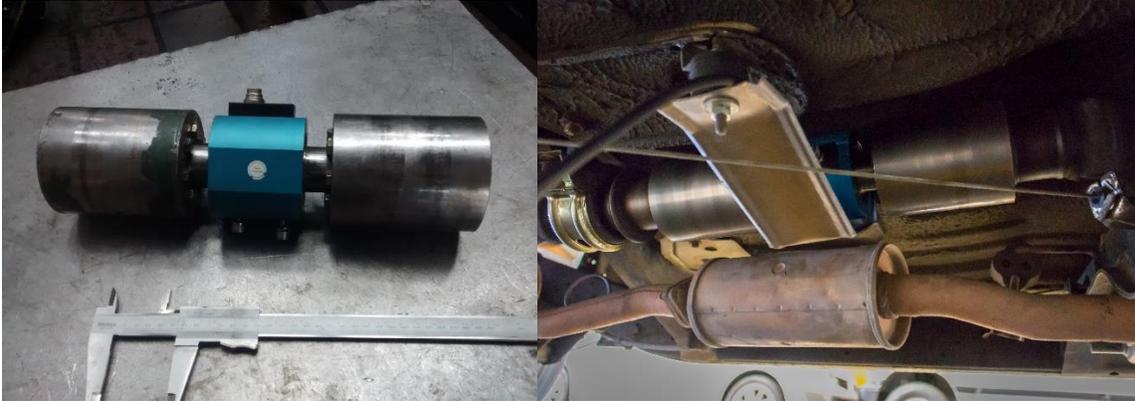
Situaciones en las que el flujometro no era posible de instalar por condiciones de capacidad se vio la necesidad de utilizar tanque auxiliar de combustible. En el caso del vehículo articulado.

Especificaciones técnicas tanque de combustible		
Especificación	Rango	Resolución
Capacidad tanque 1	80 [l]	+ - 1 [l]
Capacidad tanque 2	10 [l]	+ - 1 [l]

Transductor de momento en línea

Conocer el la energía entregada al eje implico el montaje de este instrumento en el cardan de una camioneta Mazda B2000, con el objetivo de conocer el momento de fuerza en pruebas en ruta y el

momento de fuerza en el mismo punto pero sobre el chasis dinamométrico, bajo diferentes condiciones de carga y velocidad.



Especificaciones técnicas transductor de momento en línea		
Especificación	Rango	Resolución
Capacidad transductor	1-1000 [Nm]	+ - 50 [Nm]
Máxima sobrecarga	1500 [Nm]	No aplica
Medida de velocidad	60 [pulsos/rev]	No aplica
Alimentación voltaje	18 - 26 [V]	No aplica
Señal momento	+ - 10 [V]	No aplica

Sistema de posicionamiento global



Este GPS y el acelerómetro se encuentran embebidos en una caja de registro de datos denominada VAM (Vehicle Activity Monitors) Unidad de monitoreo de actividad vehicular que almacena los datos y ofrece la opción de registrar doce (12) señales análogas más.

Especificaciones técnicas unidad de actividad vehicular		
Especificación	Rango	Resolución
Acelerómetro ADXL 355		
Sensibilidad ejes	X - Y - Z	No aplica
Sensibilidad giro	Pich-yaw-roll	No aplica
Sensibilidad	3000 [mv/g]	No aplica
Capacidad máxima	3 [g]	No aplica
GPS NEO - 6P		
Recepción de canales	50 [Unidades]	No aplica
Frecuencia de operación	GPS L1	No aplica
Sistema de corrección de señales	WAAS - EGNOS	No aplica
Inicio en ambiente frio	32 [s]	No aplica
Inicio en ambiente cálido	32 [s]	No aplica
Inicio en ambiente caliente	1 [s]	No aplica
Sensibilidad	-160/-146 [dBm]	No aplica
Precisión horizontal	2.5 [m]	No aplica
Precisión vertical	2 [m]	No aplica
Precisión en velocidad	0.1 [m/s]	No aplica
Límite de aceleración	4 [g]	No aplica
Límite altitud	50000 [m]	No aplica
Límite velocidad	500 [m/s]	No aplica

Algoritmos Labview para lectura de sensores

Los algoritmos diseñados en este programa los encuentra en el DVD anexo, debido a la cantidad de bloques presentes no se aprecian de forma clara en una hoja tamaño carta. Los códigos incluyen

- Instrumentación Mazda
- Quinta rueda
- Revoluciones por minuto
- Flujometros

Dirección DVD

D:\Thesis LGPR>About expetiment\Codes labview

Anexo B. Algoritmos desarrollados en Matlab

Los algoritmos diseñados en este programa los encuentra en el DVD anexo.

- Algoritmo (GPS)
- Algoritmo ciclo de manejo
- Algoritmo filtración y suavización ciclo de manejo
- Algoritmo parámetros Art. Kinema
- Algoritmo SAE (J1263)
- Algoritmo dinámica vehicular

Dirección DVD

D:\Thesis LGPR\Codes\Codes thesis

Algoritmo (GPS)

Algoritmo de preparación datos provenientes de sistemas de posicionamiento global. Este algoritmo corre con un archivo base como el de muestra en el DVD.

```
[archivo,ruta]=uigetfile({'*.txt'},'Abrir registro de datos adquiridos'); % Read data gps
if archivo==0
    return;
else
    fid =fopen([ruta archivo],'r');
    % gps(Hour, deltha t, velocity [km/h] , MAMSL )
    gps=textscan(fid,'%f %f %f %f','headerlines',1);
    gps=cell2mat(gps);
    fclose(fid);
end
```

GPS Data Filtration Method for Drive Cycle Analysis Applications

```
t=1; %[s]
```

1. Time: Remove duplicate records and data with negative values or differential time steps

```

nan=sum(isnan(gps),2);
count_1=0; count_2=2;
gps_draft=ones(size(gps));
for i=1:length(nan)
    if nan(i) ~= 0; gps(i,:)=-1; end
end
for i=2:length(gps(:,1))
    if gps(i,1)==gps(i-1,1); gps_draft(i,:)=0; count_1=count_1+1; end
    if gps(i,1)<0; gps_draft(i,:)=0; count_1=count_1+1; end
    if (gps(i,2)/gps(i-1,2)) ~= 1; gps_draft(i,:)=0; count_1=count_1+1;end
end
gps_filter=zeros(length(gps(:,1))-count_1,length(gps(1,:)));
gps_filter(1,:)=gps(1,:);
for i=2:length(gps_filter(:,1))
    while gps_draft(count_2,:)==0
        count_2=count_2+1;
    end
    gps_filter(i,:)=gps(count_2,:);
    count_2=count_2+1;
end
end

```

2. Velocity: Replace outlying high/low speed values

```

v_max=60;
v_res=.36; % V=0.1 - error=5%
time=(1:length(gps_filter(:,1)))';
gps_filter=horzcat(time, gps_filter);
% gps(Time, Hour, delta t, velocity [km/h] , MAMSL )

gps_filter(1,4)=spline(gps_filter(:,1),gps_filter(:,4),gps_filter(1,4));
for i=2:length(gps_filter(:,1))
    if gps_filter(i,4)>v_max; gps_filter(i,4)=( gps_filter(i-1,4) + gps_filter(i+1,4) )/2;
end
end

```

3. Velocity: Remove zero-speed signal drift when vehicle is stopped

```

for i=1:length(gps_filter(:,1)); if gps_filter(i,4)<v_res; gps_filter(i,4)=0; end; end

```

4. Velocity: Replace false zero-speed records

```

for i=2:length(gps_filter(:,1)-1)
    if gps_filter(i,4) == 0
        if gps_filter(i-1,4) ~= 0 && gps_filter(i+1,4) ~= 0
            gps_filter(i,4)=( gps_filter(i-1,4) + gps_filter(i+1,4) )/2;

            end
        end
    if gps_filter(i,4) ~= 0

        if gps_filter(i-1,4) == 0 && gps_filter(i+1,4) == 0
            gps_filter(i,4) =0;
        end
    end
end

```

```
end
end
```

5. Denoise and condition final signal. 5.1 Acceleration: Repair outlying acceleration/deceleration values

```
a=diff(gps_filter(:,4));
acc=[a;a(end)]/2;
a_res=4;
x=cumtrapz(gps_filter(:,4)*(1000/3600));
% gps(Time, Hour, deltha t, velocity [km/h] , MAMSL, acceleration [m/s^2], x[m] )
gps_filter=horzcat(gps_filter, acc, x);
for i=1:length(gps_filter(:,1));
    if gps_filter(i,6)>a_res; gps_filter(i,6)=4; end;
    if gps_filter(i,6)<-a_res; gps_filter(i,6)=-4; end;

end
vel_filter= sgolayfilt(gps_filter(:,4),1,11);
a=diff(vel_filter);
acc_filter=[a;a(end)]/2;
% gps(1. Time, 2. Hour, 3. deltha t, 4. velocity [km/h] , 5. MAMSL,
% 6. acceleration [m/s^2], 7. x[m], 8. vel_filter [m/s], 9. acc_filter [m/s^2] )
gps_filter=horzcat(gps_filter, vel_filter, acc_filter);
% gps(1. Time, 2. Hour, 3. deltha t, 4. velocity [km/h] , 5. MAMSL,
% 6. acceleration [m/s^2], 7. x[m], 8. vel_filter [m/s], 9. acc_filter [m/s^2],
% 10. x_filter [m])
xx=cumtrapz(gps_filter(:,8)*(1000/3600));
gps_filter=horzcat(gps_filter,xx);
```

6. Slope: Replace outlying high/low slope values

```
MAMSL_filter= sgolayfilt(gps_filter(:,5),3,41);
slope=atan(diff(MAMSL_filter)./diff(gps_filter(:,10)));
slope=[slope;slope(end)];
for i=1:length(slope)
    if slope(i) > pi/8
        slope(i)=0;
    elseif slope(i) < -pi/8
        slope(i)=0;
    end
end
for i=3:length(slope)-2
    if slope(i)>slope(i-2) && slope(i)>slope(i+2) ; slope(i)=( slope(i-2)+slope(i-1) +
slope(i+1) + slope(i+2))/4; end
    if slope(i)<slope(i-2) && slope(i)<slope(i+2) ; slope(i)=( slope(i-2)+slope(i-1) +
slope(i+1) + slope(i+2))/4; end

end
slope_filter_rad= sgolayfilt(slope,3,41);
slope_grade=slope*(180/pi);
slope_filter_grade=slope_filter_rad*(180/pi);
% gps(1. Time, 2. Hour, 3. deltha t, 4. velocity [km/h] , 5. MAMSL,
% 6. acceleration [m/s^2], 7. x[m], 8. vel_filter [m/s], 9. acc_filter [m/s^2],
% 10. x_filter [m], 11. slope [rad], 12. slope_filter_rad [rad], 13. slope_grade [°],
% 14. slope_filter_grade [°])
gps_filter=horzcat(gps_filter, slope, slope_filter_rad,slope_grade,slope_filter_grade);
% gps_data (1 Time [s], 2 velocity [km/h], 3 acceleration [m/s^2], slope[rad])
```

```
gps_data=[gps_filter(:,1) gps_filter(:,8) gps_filter(:,9) gps_filter(:,12)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Algoritmo ciclo de manejo

Los datos base preparados del algoritmo de GPS son usados por este algoritmo para diseñar el ciclo. Este código debe ser montado en el mismo archivo (*.m). Tal como en el anexo del DVD.

Convert to kilometers per hour

```
CC=gps_data(:,2)*1000/3600;
datos_vel=CC;
data_vam=[gps_data(:,1) CC];
```

Cycle Size [s]

```
time_cycle=60*5;
```

Micro-trip Size [s]

```
dur_micro=5;
error=0.05;
```

Call to cycle function

```
[X,Y,cor,mat,mat1]=ciclocond2(data_vam,time_cycle,dur_micro,error);
```

Cycle without filtering and smoothing

```
velocity_cycle=Y;
```

Section initial and ending of cycle

```
velocity_cycle=[0;0;0;0;0;0;0;0;velocity_cycle;0;0;0;0;0;0;0];
```

Correlation factor to real data

```
correlation=cor;
```

Función ciclo de manejo

Develop by Pinilla Luis and Bonilla Marcelo

```
%function [X,Y,cor,Reals data Frequency Matrix ,cycle data Frequency Matrix ] =
ciclocond2(velocity,Size cycle,Size micro-trip,error)
function [X,Y,cor,mat,mat1] = ciclocond2(A,Dc,Dmc,g)
```

Correlation factor between Frequency Matrix $cor=corr2(Z,Ze)$; $mat=[X Y Z]$; $mat1=[Xe Ye Ze]$; $X=D$; $Y=C(:,2)$;

Mean velocity and acceleration calculation

```
a=size(A);
i=1;
% initial variable( Time, Velocity, Aceleration, deltha time)
var=ones(a(1,1),4);
```

Acceleration

```
while i<=a(1,1)
    var(i,1)=A(i,1);
    var(i,2)=A(i,2);
    if i==1;
        var(i,3)=0;
        var(i,4)=0;
    else
        var(i,3)=(var(i,2)-var(i-1,2))/(var(i,1)-var(i-1,1));
        var(i,4)=(var(i,1)-var(i-1,1));
        if var(i,3)==inf
            var(i,1)
        end
    end
    end
    i=i+1;
end

i=1;
tt=0;
while i<=a(1,1)
    tt=tt+var(i,4);
    i=i+1;
end

i=1;
sum_v=0;
sum_a=0;
sum_d=0;
j=0;
k=0;
ta=0;
td=0;
tc=-1;

while i<=a(1,1)
    sum_v=sum_v+var(i,2);
    if var(i,2)==0
        tc=tc+1;
    end
    if var(i,3)<0
        sum_d=sum_d+var(i,3);
        td=td+var(i,4);
        j=j+1;
    elseif var(i,3)>0
        sum_a=sum_a+var(i,3);
        ta=ta+var(i,4);
        k=k+1;
    end
end
```

```

    i=i+1;
end

```

Mean velocity

```

vmed=abs(sum_v/(i-1));

```

Mean decelerate

```

dmed=abs(sum_d/(j));

```

Mean acceleration

```

amed=abs(sum_a/(k));

```

Percentage time accelerating

```

Prom_a=abs(ta/tt);

```

Percentage time decelerate

```

Prom_d=abs(td/tt);

```

Percentage time stopping

```

Prom_idd=abs(tc/tt);

```

Acceleration RMS

```

i=1;
sumsqr=0;
while i<=a(1,1)
    sumsqr=sumsqr+(var(i,3)^2);
    i=i+1;
end
rmsa=(sumsqr/(a(1,1)-1))^(1/2);

```

Percentage reversal of acceleration

```

i=2;
m=0;
while i<=a(1,1)
    if (var(i,3)<0 && var(i-1,3)>0) || (var(i,3)>0 && var(i-1,3)<0)
        m=m+1;
    end
    i=i+1;
end
porc_camb=m/a(1,1);

```

Initial condition error

Mean velocity error

```

Evmed=1;

```

Mean acceleration error

```
Eamed=1;
```

Mean decelarate error

```
Edmed=1;
```

Percentage acceleration error

```
Eproa=1;
```

Percentage decelarate error

```
Eprod=1;
```

percentage time stopping error

```
Eproidd=1;
```

percentage velocity RMS error

```
Ermsa=1;
```

Percentage reversal acceleration error

```
Eporc_camb=1;
```

Frequency calculator

```
vmax=max(var(:,2));
amax=max(var(:,3));
vmin=min(var(:,2));
amin=min(var(:,3));
```

Amount of bins

```
In=25;
dv=(vmax-vmin)/In;
da=(amax-amin)/In;

MF=zeros(In+1,In+1);
MF(1,1)=0;
MF(2,1)=vmin;
MF(1,2)=amin;

k=2;
while k<=In+2
    i=1;
    while i<=a(1,1)
        if var(i,2)<(MF(k,1)+(dv/2)) && var(i,2)>(MF(k,1)-(dv/2))
            p=2;
            while p<=In+2
                if var(i,3)<(MF(1,p)+(da/2)) && var(i,3)>(MF(1,p)-(da/2))
                    MF(k,p)=MF(k,p)+1;
                end
                MF(1,p+1)=MF(1,p)+da;
            end
        end
        i=i+1;
    end
    k=k+1;
end
```

```

                p=p+1;
            end
        end
        i=i+1;
    end
    MF(k+1,1)=MF(k,1)+dv;
    k=k+1;
end

```

Frequency data for to plot

```

Z=[MF(2:In+1,2:In+1)];
X=zeros(In,In);
Y=zeros(In,In);
i=1;
while i<=In
    j=1;
    while j<=In
        X(j,i)=MF(j+1,1);
        Y(i,j)=MF(1,j+1);
        j=j+1;
    end
    i=i+1;
end

```

Selecion micro-trip and assemble cycle

```

while Evmed>=g || Eamed>=g || Edmed>=g || Eproa>=g || Eprod>=g || Eproidd>=g || Ermsa>=g
|| Eporc_camb>=g
    k=randi(a(1,1)-Dmc,DC/Dmc,1);
    C=ones(DC,4);
    i=1;
    l=1;
    m=1;
    while i<=DC
        h=k(l,1);
        j=1;
        while j<=Dmc
            C(i+j-1,1)=m;
            C(i+j-1,2)=var(h+j-1,2);
            C(i+j-1,3)=var(h+j-1,3);
            C(i+j-1,4)=var(h+j-1,4);
            j=j+1;
            m=m+1;
        end
        l=l+1;
        i=i+Dmc;
    end
end

```

Cycle characterization

```

i=1;
b=size(C);
sum_ve=0;
sum_ae=0;
sum_de=0;
j=0;
k=0;
ta=0;
td=0;
tc=0;
tt=0;
while i<=b(1,1)

```

```

        tt=tt+C(i,4);
        i=i+1;
    end
    i=1;

    while i<=b(1,1)
        sum_ve=sum_ve+C(i,2);
        if C(i,2)==0
            tc=tc+1;
        end
        if C(i,3)<0
            sum_de=sum_de+C(i,3);
            td=td+C(i,4);
            j=j+1;
        elseif C(i,3)>0
            sum_ae=sum_ae+C(i,3);
            ta=ta+C(i,4);
            k=k+1;
        end
        i=i+1;
    end
    vmede=abs(sum_ve/(i-1));
    dmede=abs(sum_de/(j));
    amede=abs(sum_ae/(k));
    Prom_ae=abs(ta/tt);
    Prom_de=abs(td/tt);
    Prom_idde=abs(tc/tt);

```

Acceleration RMS for cycle

```

    i=1;
    sumsqrt=0;
    while i<=b(1,1)
        sumsqrt=sumsqrt+(C(i,3)^2);
        i=i+1;
    end
    rmsae=(sumsqrt/(b(1,1)-1))^(1/2);

```

reversal of acceleration for cycle

```

    i=2;
    m=0;
    while i<=b(1,1)
        if (C(i,3)<0 && C(i-1,3)>0) || (C(i,3)>0 && C(i-1,3)<0)
            m=m+1;
        end
        i=i+1;
    end
    porc_cambe=m/b(1,1);

```

Error calculator

```

    Evmed=abs((vmed-vmede)/vmed);
    Eamed=abs((amed-amede)/amed);
    Edmed=abs((dmed-dmede)/dmed);
    Eproa=abs((Prom_a-Prom_ae)/Prom_a);
    Eprod=abs((Prom_d-Prom_de)/Prom_d);
    Eproidd=abs((Prom_idd-Prom_idde)/Prom_idd);
    Ermsa=abs((rmsa-rmsae)/rmsa);
    Eporc_cambe=abs((porc_camb-porc_cambe)/porc_camb);

    t=[Evmed, Eamed, Edmed, Eproa, Eprod, Eproidd, Ermsa, Eporc_camb];

```

Frequency calculator and Frequency data for to plot

```

MFe=zeros(In+1,In+1);
MFe(1,1)=0;
MFe(2,1)=vmin;
MFe(1,2)=amin;

k=2;
while k<=In+2
    i=1;
    while i<=b(1,1)
        if C(i,2)<(MFe(k,1)+(dv/2)) && C(i,2)>(MFe(k,1)-(dv/2))
            p=2;
            while p<=In+2
                if C(i,3)<(MFe(1,p)+(da/2)) && C(i,3)>(MFe(1,p)-(da/2))
                    MFe(k,p)=MFe(k,p)+1;
                end
                MFe(1,p+1)=MFe(1,p)+da;
                p=p+1;
            end
        end
        i=i+1;
    end
    MFe(k+1,1)=MFe(k,1)+dv;
    k=k+1;
end

```

Plotting Frequency

```

Ze=[MFe(2:In+1,2:In+1)];
Xe=zeros(In,In);
Ye=zeros(In,In);
i=1;
while i<=In
    j=1;
    while j<=In
        Xe(j,i)=MFe(j+1,1);
        Ye(i,j)=MFe(1,j+1);
        j=j+1;
    end
    i=i+1;
end

```

Graphics

```

% subplot(2,2,1)
% plot(var(:,1),var(:,2))
% title('ciclo con datos totales')
% grid on
%
% subplot(2,2,3)
% plot(C(:,1),C(:,2))
% title('Sub-Ciclo')
% grid on
%
% subplot(2,2,2)
% mesh(X,Y,Z, 'FaceLighting','gouraud','Linewidth',0.3)
% zlim([0 50])
% title('ciclo con datos totales')
%
% subplot(2,2,4)
% mesh(Xe,Ye,Ze,'FaceLighting','gouraud','Linewidth',0.3)
% zlim([0 20])
% title('Sub-ciclo')

```

```

%hold on
%plot(p,Evmed,'x')
%plot(p,Eamed,'o')
%plot(p,Edmed,'-')
%plot(p,Eproa,'*')
%plot(p,Eprod,'b')
%plot(p,Eproidd,'r')
%plot(p,Ermsa,'c')
%plot(p,Eporc_camb,'y')
%pause(0.1)
%p=p+1;

```

```

end
%hold off

```

Matrix of properties on cycles

```

D=[vmed,vmde,Evmed;amed,amede,Eamed;
dmed,dmede,Edmed;Prom_a,Prom_ae,Eproa;Prom_d,Prom_de,Eprod;Prom_idd,Prom_idde,Eproidd;rmsa
,rmsae,Ermsa;porc_camb,porc_cambe,Eporc_camb];

```

Correlation between real data and cycle data

```

cor=corr2(Z,Ze);

```

GPS frequency matrix

```

mat=[X Y Z];

```

Cycle frequency matrix

```

mat1=[Xe Ye Ze];
X=D;
Y=C(:,2);

```

```

end

```

Suavización y filtración ciclo de manejo

Algoritmo de suavización del ciclo construido por el algoritmo anterior. Se monta en mismo archivo (*.m) Este algoritmo esta anexo en el DVD.

Acceleration

```

aa=diff(velocity_cycle);
acc_cycle=[aa;aa(end)]/2;

max_acc_GPS=max(gps_data(:,3));
delta=zeros(length(velocity_cycle),1);
for i=1: length(velocity_cycle)-1
    if acc_cycle(i)>max_acc_GPS
        delta(i,1)=velocity_cycle(i);
        delta(i,2)=velocity_cycle(i+1);
    end
end
velocity_ref=zeros(length(velocity_cycle)*2,1);
j=0;
kd=2;

for i=2: length(velocity_cycle)

    if delta(i,2) > 0
        j=0;
        v=delta(i,1);
        delta(i,2);
        while v < delta(i,2)-1
            j=j+1;
            v=delta(i,1)+max_acc_GPS*j;
            velocity_ref(kd+j)=v;
        end
        kd=kd+j+1;
    else
        kd=kd+1;

        velocity_ref(kd)=velocity_cycle( i );

    end

end
velocity_ref=velocity_ref(1:kd);

```

Velocity: Replace false zero-speed records

```

for i=2:length(velocity_ref(:,1))-1
    if velocity_ref(i) == 0
        if velocity_ref(i-1) ~= 0 && velocity_ref(i+1) ~= 0
            velocity_ref(i)=( velocity_ref(i-1) + velocity_ref(i+1) )/2;
        end
    end
    if velocity_ref(i) ~= 0
        if velocity_ref(i-1) == 0 && velocity_ref(i+1) == 0
            velocity_ref(i) =0;
        end
    end
end
min_acc_GPS=1.2*min(gps_data(:,3));
delta_1=zeros(length(velocity_ref),1);

```

```

j=0;
kf=2;
velocity_ref_1=zeros(length(velocity_ref)*2,1);
aaa=diff(velocity_ref);
aacc_cycle=[aaa;aaa(end)]/2;
for i=1: length(velocity_ref)-1

    if aacc_cycle(i)<min_acc_GPS
        delta_1(i,1)=velocity_ref(i);
        delta_1(i,2)=velocity_ref(i+1);
    end

end
for i=2: length(velocity_ref)

    if delta_1(i,1) > 0
        j=0;
        v=delta_1(i,1);
        delta_1(i,2);
        while v > delta_1(i,2)+1
            j=j+1;
            v=delta_1(i,1)+min_acc_GPS*j;
            velocity_ref_1(kf+j)=v;
        end
        kf=kf+j+1;
    else
        kf=kf+1;

        velocity_ref_1(kf)=velocity_ref( i );

    end

end
end

```

Velocity: Replace false zero-speed records

```

for i=2:length(velocity_ref_1(:,1))-1
    if velocity_ref_1(i) == 0
        if velocity_ref_1(i-1) ~= 0 && velocity_ref_1(i+1) ~= 0
            velocity_ref_1(i)=( velocity_ref_1(i-1) + velocity_ref_1(i+1) )/2;
        end
    end
    if velocity_ref_1(i) ~= 0
        if velocity_ref_1(i-1) == 0 && velocity_ref_1(i+1) == 0
            velocity_ref_1(i) =0;
        end
    end
end
velocity_ref_1=velocity_ref_1(1:kf);
for i=1:length(velocity_ref_1)
    if velocity_ref_1(i)<0
        velocity_ref_1(i)=0;
    end
end

driving_cycle= sgolayfilt(velocity_ref_1,1,9);
for i=2:length(driving_cycle)-1
    driving_cycle(i)= (driving_cycle(i-1)+driving_cycle(i)+driving_cycle(i+1))/3;
end
for i=1:length(driving_cycle)
    if driving_cycle(i)<2
        driving_cycle(i)=0;
    end
end

```

```

end
aac=diff(driving_cycle);
acc_driving_cycle=[aac;aac(end)]/2;
jerk_1=diff(acc_driving_cycle);
jerk_1_driving_cycle=[jerk_1;jerk_1(end)]/2;

time_driving_cycle=[1:length(acc_driving_cycle)]';
trace_slope=ones(length(time_driving_cycle),1)* ave_slope;
cycle=[ time_driving_cycle driving_cycle acc_driving_cycle ];

```

Parámetros Art. Kinema

Algoritmo de suavización del ciclo construido por el algoritmo anterior. Se monta en mismo archivo (*.m) Este algoritmo esta anexo en el DVD.

Total distance[m]

```

xc=cumtrapz(cycle(:,2)*(1000/3600));
total_distancec=xc/1000

```

Total time [s]

```

time_gpsc=length(cycle(:,1))

```

standing_time [s]

```

t_stc=0;
t_sdc=0;
t_sac=0;
if(cycle(1,2)==cycle(2,2)) && cycle(1,3) == cycle(2,3); t_stc=1; else t_stc=0; end
for i=2:length(cycle(:,1))
    if(cycle(i,2)==cycle(i-1,2)) && cycle(i,3) == cycle(i-1,3); t_stc=t_stc+1; end
end

standing_timec=t_stc
per_standing_time=standing_timec/time_gpsc

```

Drive time spent decelerating [s]

```

desacc_accumulatedc=0;
dtsdc=0;
if cycle(1,3) > cycle(2,3); t_sdc=1; desacc_accumulatedc=desacc_accumulatedc+cycle(2,3);
    dtsdc(1)=cycle(2,3); else t_sdc=0; end
for i=2:length(cycle(:,1))
    if cycle(i,2)<cycle(i-1,2);
        t_sdc=t_sdc+1;desacc_accumulatedc=desacc_accumulatedc+cycle(i,3);
        dtsdc(i)=cycle(i,3); end
end
decelerating_timec=t_sdc
per_decelerating_timec=decelerating_timec/time_gpsc

```

Drive time spent accelerating [s]

```

acc_accumulatedc=0;
dtsac=0;
if cycle(1,3) > cycle(2,3); t_sac=1; acc_accumulatedc=acc_accumulatedc+cycle(2,3);
    dtsac(1)=cycle(2,3); else t_sac=0; end
for i=2:length(cycle(:,1))
    if cycle(i,2)>cycle(i-1,2); t_sac=t_sac+1;
acc_accumulatedc=acc_accumulatedc+cycle(i,3);
    dtsac(i)=cycle(i,3); end
end
accelerating_timec=t_sac
per_accelerating_timec=accelerating_timec/time_gpssc

```

Driving time [s]

```

driving_timec=time_gpssc-standing_timec
per_driving_timec=driving_timec/time_gpssc

```

Cruise time

```

Cruise_timec=driving_timec-decelerating_timec-accelerating_timec
per_Cruise_timec=Cruise_timec/time_gpssc

```

Average speed [km/h]

```

ave_speedc=mean(cycle(:,2))

```

Average speed by trip [km/h]

```

ave_speed_tripc=3.6*total_distancec/time_gpssc

```

Average driving speed [km/h]

```

ave_driving_speedc=3.6*total_distancec/driving_timec

```

Standard deviation [km/h]

```

desv_velocityc=std( cycle(:,2))

```

Percentil 25th - 75th for velocity [km/h]

```

percentil_velc= prctile(cycle(:,2), [ 25 : 75])

```

Maximun speed [km/h]

```

max_velc=max(cycle(:,2))

```

Average total decelerating [m/s²]

```

ave_total_acc=mean(cycle(:,3))

```

Average decelerating [m/s²]

```
ave_desaccc=desacc_accumulatedc/(t_sdc/t)
```

Average accelerating [m/s²]

```
ave_acc=acc_accumulatedc/(t_sac/t)
```

Standard deviation total accelerating [m/s²]

```
desv_total_acc=std( cycle(:,3))
```

Standard deviation decelerating [m/s²]

```
desv_desaccc=std( dtsdc)
```

Standard deviation accelerating [m/s²]

```
desv_acc=std( dtsac)
```

Percentil 25th - 75th accelerating [m/s²]

```
percentil_acc= prctile(cycle(:,3), [ 25 : 75])
```

Number of accelerations [#]

```
acc_numberc=0;
step_acc=0;
j=1;
for i=1: length(cycle(:,3))
step_acc=0;
    for j=i:length(cycle(:,3))-1
        if cycle(j,3) < cycle( j+1, 3)
            step_acc=1;
        else
            i=j;
            break
        end
    end
    acc_numberc=step_acc+acc_numberc;
end
acc_numberc
```

Accelerations per km [# / km]

```
acc_rate=1000*(acc_numberc/ total_distancec)
```

Number stops [#]

```
number_stopc=0;
for i=2: length(cycle(:,2))
if cycle(i,2)==0 && cycle(i,3)==0 && cycle(i-1,2) ~= 0 && cycle(i-1,3) ~= 0
    number_stopc=number_stopc+1;
end
end
number_stopc
```

Average stop duration [s/#]

```
ave_stop_timec=standing_timec/number_stopc
```

RMS value

```
rms_velc=rms(cycle(:,2))
rms_acc= rms(cycle(:,3))
```

Algoritmo SAE (J1263)

Algoritmo de procesamiento pruebas de desaceleración, se recomienda trabajar los datos filtrados de (GPS) o los datos tomados de una quinta rueda. Se monta en mismo archivo (*.m) Este algoritmo esta anexo en el DVD.

Los perfiles de desaceleración se montan en la primera sección de código como se ilustra.

```
%Matriz dat almacena los datos de la deacceleracion, abrir datlab previo a la
%ejecucion del codigo
%Organiza Perfiles de velocidad
vel=[(dat(98:153,3)) (dat(224:(224+153-98),3)) (dat(324:(324+153-98),3))
(dat(599:(599+153-98),3)) (dat(697:(697+153-98),3)) (dat(797:(797+153-98),3))
(dat(961:(961+153-98),3)) (dat(1087:(1087+153-98),3)) (dat(1187:(1187+153-
98),3))]/(1000*3.6); %Datos VAM
ace=[(dat(98:153,4)) (dat(224:(224+153-98),4)) (dat(324:(324+153-98),4))
(dat(599:(599+153-98),4)) (dat(697:(697+153-98),4)) (dat(797:(797+153-98),4))
(dat(961:(961+153-98),4)) (dat(1087:(1087+153-98),4)) (dat(1187:(1187+153-98),4))];
%DATOS VAM
hd=1;

%Derivada de Diferencias Centradas de orden 0(h4)

for j=1:9
    for i=4:size(vel(:,1))-3
        f1=vel((i+1),j);
        f2=vel((i+2),j);
        f2i=vel((i-2),j);
        f1i=vel((i-1),j);
        acde(i,j)=(-f2+(8*f1)-(8*f1i)+f2i)/(12*hd); % Aceleracion producto de derivar la
        velocidad registrada
    end
end

%Constantes
g=9.8; %[m/s^2]
rho=0.8; %[kg/m^3]
M=4800; %[kg]
M_e=1.03*M; %[kg]
W_e=M_e*g; %[N]
H=3; %[m]
W=2.24; %[m]
Ar=0.8*H*W; %[m^2]
```

```

%Adaptacion de datos
% Importación y filtrado de datos de Velocidad
T_vel=size(vel(:,1)); % [s] tiempo igual a T_ac
Z=vel;% [m/s] velocidad

fc=.5;
[b,a]=butter(2,fc, 'low'); % Crea parametros de filtro
V = filter(b,a,Z); % Realiza filtrado de la velocidad con los parametros dados

% Importación y filtrado de datos de aceleración directo
T_ac=size(ace(:,1)); % [s] tiempo igual a T_vel
Y=ace;% [m/s^2] Aceleración

[d,c]=butter(2,fc, 'low'); %Crea parametros de filtro de aceleración
A = filter(d,c,Y); % Realiza filtrado de los datos de aceleración con los parámetros dados

% Importación y filtrado de datos de aceleración derivado
T_ac=size(ace(:,1)); % [s] tiempo igual a T_vel
Yy=acde;% [m/s^2] Aceleración

[d,c]=butter(2,fc, 'low'); %Crea parametros de filtro de aceleración
Ad = filter(d,c,Yy); % Realiza filtrado de los datos de aceleración con los parámetros
dados
%creación de matrices

for i=1:length(V)
Am(i,1)=-0.5*rho*Ar*V(i)^2;
Am(i,2)=-W_e;
end

for i=1:length(Ad)
    B(i,1)=(M_e*Ad(i));
end

%Solución de minimos cuadrados
    x=inv(Am'*Am)*(Am'*B);
%Fuerzas resistivas

% Para datos de aceleracion que se obtuvieron derivando velocidad
for i=1:20
D(i)=.5*rho*Ar*(i^2)*x(1);
Fr(i)=W_e*x(2); % fuerza rodadura
frr(i)=(M_e*ace(i,1)+D(i))/W_e; %coeficiente rodadura
DC(i)=Fr(i)+D(i); %Fuerza resistiva total
end
% Para datos de aceleracion que se obtuvieron directo
for i=1:20
DD(i)=.5*rho*Ar*(i^2)*0.6549;
frD(i)=W_e*1.71e-05;
frr1(i)=(M_e*acde(i,1)+DD(i))/W_e;
end
xx=cumtrapz(gps_filter(:,8)*(1000/3600));

```

Modelo dinámica vehicular

Este algoritmo está compuesto por nueve (9) archivos (*.m), se deben editar las características del vehículo en el archivo

(driving_cycle.m) y para ajustar las condiciones del motor (engine.m)

Longitudinal dynamics for energy analysis in vehicles

This model use the longitudinal dynamic model for calculate the energy consumption, whit the following parameters: the vehicle always run in straight line. It is a bicicle model.

1. Clear and built space
2. Constans and conversions factors
3. Enviromental conditions
4. Driving cycle
3. Variables of analysis for vehicle
4. Characteristics of engine
5. Fuel conditions
6. Characteristics Transmission
7. Vehicle dimentions and capacity
8. Characteristics wheel
9. Model variables, inicial conditions and system solver

1. Clear and built space

```

clc;
clear;
close all
global fvr fvf fvfs fvrs nd ftr fae mur dv_a Te_i Tbr Tbf
global g driving_cycle conv1 conv2 v_shift conv3 conv4 Tes_in
global enviroment engine transmission_v capacity tyre dimensions idle redline Tmax
braking
global RPM_out Tes_out nis_out a_v_out ftrs_out fvfss_out fvrss_out frrfs_out
frrrs_out faes_out wxs_out deltha_acc_out deltha_Te_out
global brake_out

```

2. Constans and conversions factors

Revolution per minute to radians per second

$$\text{rad/s} = \text{rev/min} * 2 * \pi / 60$$

```
conv1=2*pi/60;
```

Radians per second to revolution per minute

$$\text{rev/min} = 60 / (2 * \pi / 60)$$

```
conv2=60/(2*pi);
```

Grades to rarians

$$\text{rad} = \text{grades} * \pi / 180)$$

```
conv3=pi/180;
```

kilometers per hour to meter per second
 $rad = grades * \pi / 180$)

```
conv4=1000/3600;
```

Gravity [m/s^2]

```
g=-9.81;
```

3. Enviromental conditions

Temperature [°C], MAMSL [m], density [kg/m^3], wind speed [m/s]

```
enviroment=[15 2500 0.91 5]';
```

4. Driving cycle

Matriz driving_cycle (Time [s]; Velocity [m/s]; Acceleration [m/s^2], slope [°])

```
%driving_cycle=[0:50; 0:50;0:50;0:50 ]';
```

```
%driving_cycle=[0:20; 0:20;0:20;0:20 ]';
```

```
%driving_cycle=[0:5; 0:5;0:5;0:5 ]';
```

```
%
```

```
% driving_cycle=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34
35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46
47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58
59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82
83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94
95 96 97 98 99
```

```
% 00 0 0 0 0 0 0 0 4 5 8.1
10.1 12.4 14.9 17.5 20.4 23.3 26.3 29.3 32.1 34.4 36.1
36.8 36.8 36.4 35.4 33.7 31.1 27.7 23.7 19.7 16 12.4
8.9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 7.9
9.1 9.4 9 8.3 7.3 0 0 0 0 0 8.7
11.5 15 18.5 22 25 27.5 29.2 29.7 28.9 26.8 23.8
20.3 16.7 13.1 9.5 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 8.9 11 12.9 14.2 14.3 13.5 12.1 10.4
8.6 0 0 0 0 0 0 0 8.1 9.4
% 00 0 0 0 0 0 0 0 0 1.1 0.3
0.3 0.3 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4 0.3 0.2 0.1 0
-0.1 -0.1 -0.2 -0.4 -0.5 -0.6 -0.6 -0.5 -0.5 -0.5 -1.2 0
0 0 0 0 0 0 0 1.1 0.2 0.1 -0.1 -
0.1 -0.1 -1 0 0 0 1.2 0.4 0.5 0.5 0.5
0.4 0.3 0.2 0.1 -0.1 -0.3 -0.4 -0.5 -0.5 -0.5 -0.5 -
1.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.2
```

```

    0.3    0.3    0.2    0    -0.1  -0.2  -0.2  -0.3  -1.2  0    0    0
    0    0    0    1.1  0.2  0.2
%  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01  0.01
    0.01]';

%   base_time=(0:0.1:100)';
%   base_cycle=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,2),0:0.1:100)';
%   base_cycle_acc=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,3),0:0.1:100)';
%   base_cycle_slope=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,4),0:0.1:100)';

base_time=(0:0.1:100)';
base_cycle=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,2),0:0.1:100)';
base_cycle_acc=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,3),0:0.1:100)';
base_cycle_slope=spline(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,4),0:0.1:100)';

%   driving_cycle=[base_time base_cycle base_cycle_acc base_cycle_slope];
derive=diff(driving_cycle(:,2)*1000/3600);
acc_vehicle=[derive(:,1);derive(end,1)];

```

3. Variables of analysis for vehicle

```
Tes_in=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

```
% _Revolution per second of engine_
```

```
RPM_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Torque of engine [Nm]

```
Tes_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Speed relation of trasmission [#]

```
nis_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Vehicle acceleration [m/s^2]

```
a_v_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Traction force rear wheel [N]

```
ftrs_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Vertical force front [N]

```
fvfss_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Vertical force rear [N]

```
fvrss_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Rolling resist front force [N]

```
frrfs_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Rolling resist rear force [N]

```
frrrs_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Aerodynamic force [N]

```
faes_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

X componet weight force [N]

```
wxs_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Deltha acceleration [m/s^2]

```
deltha_acc_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Deltha torque [m/s^2]

```
deltha_Te_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

Brake [signal]

```
brake_out=zeros(length(driving_cycle(:,1)),1);
```

4. Characteristics of engine

Matriz engine (RPM; Torque max to each RPM, Torque min to each RPM)

```
engine=[600 1000 1500 2100 2300 2623 3100; 360 360 349 349 323 310 258; 25 25 20 20 20 20 20]';
```

Power engine [kW]

```
engine_power=engine(:,1).*engine(:,2)*conv1/1000;
```

Maximum power [kW]

```
Pmax=max(engine_power);
```

Thermal and combustion engine efficiency

```
etha_th_e=0.35;  
etha_cb_e=0.95;
```

Idle engine speed [RPM]

```
idle=min(engine(:,1));
```

redline engine speed [RPM]

```
redline=max(engine(:,1));
```

Maximum engine torque [Nm]

```
Tmax=max(engine(:,2));
```

5. Fuel conditions

density [kg/m³] and LHV [kJ/kg]

```
fuel=[860 43900];
```

6. Characteristics Transmission

Vector relationship box and diferencial (n1...ni nd)

```
transmission_v=[6.02 3.626 2.017 1.367 1 6.83; 45 40 35 30 25 45]';
```

Vector base of Limit speed for each relationship

```
v_shift=zeros(length(transmission_v(:,1))-1,1);
```

Limit speed for each relationship RPM on tyre

```
for i=1:length(v_shift)  
    v_shift(i)=(redline/(transmission_v(i,1)*transmission_v(end,1)));  
    v_shift(i)=v_shift(i)*conv1;  
end
```

7. Vehicle dimensions and capacity

Distance between axles [m], width [m], height [m], dragg coefficient

```
dimensions=[3.365 2.115 3.05 0.68]';
```

Load capacity [kg], rear axle capacity [kg], front axle capacity [kg], Fuel tank [kg]

```
capacity=[4782 6600 3100 100]';
```

8. Characteristics wheel

tyre width [mm], aspect ratio [%], Rin diameter [in], wheel track [m]

```
tyre=[215 97 17.5 0.2]';
```

9. Model variables, inicial conditions and system solver

Initial vertical forces [N]

Static rear vertical force [N]

```
fvr=-capacity(2,1)*g;
```

Static front vertical force [N]

```
fvfs=-capacity(3,1)*g;
```

```
braking=0;
```

```
Tbr=0;
```

```
Tbf=0;
```

```
% Front and rear inicial vertical forces [N]
```

```
fvf=fvfs;
```

```
fvr=fvrs;
```

Initial condition for EDOS system and model

Vehicle velocity [m/s]

```
vv=0;
```

Vehicle velocity [m/s] for test vv=20.8;

Rolling resist factor

```
mur=0;
```

Initial Rear traction force [N]

```
ftr=0;
```

Torque traction force [Nm]

```
Te_i=0;
```

Initial aerodynamic force [N]

```
fae=0;
```

Initial acceleration of vehicle [m/s^2]

```
dv_a=0.00;
```

Initial speed Relation

```
nd=transmission_v(end,1);
ni=transmission_v(1,1);
```

Initial conditions

```
CI=vv;
```

Options for improve the edo solver

```
options = odeset('RelTol',1e-3);
```

Time for simulation of vehicle [s]

```
tspan=0:max(driving_cycle(:,1))-1);
```

Solver ode45 for system of equations

```
[t, dv]=ode45(@vehicle, tspan, CI,options);
```

```
Pow_e=conv1*RPM_out.*Tes_out/1000;
RPM_out=[RPM_out;RPM_out(end,1)];
Tes_out=[Tes_out;Tes_out(end,1)];
nis_out=[nis_out;nis_out(end,1)];
a_v_out=[a_v_out;a_v_out(end,1)];
ftrs_out=[ftrs_out;ftrs_out(end,1)];
fvfss_out=[fvfss_out;fvfss_out(end,1)];
fvrss_out=[fvrss_out;fvrss_out(end,1)];
frrfs_out=[frrfs_out;frrfs_out(end,1)];
frrrs_out=[frrrs_out;frrrs_out(end,1)];
faes_out=[faes_out;faes_out(end,1)];
wxs_out=[wxs_out;wxs_out(end,1)];
delta_acc_out=[delta_acc_out;delta_acc_out(end,1)];
delta_Te_out=[delta_Te_out;delta_Te_out(end,1)];
brake_out=[brake_out;brake_out(end,1)];

Pow_e=[Pow_e;Pow_e(end,1)];
for i=2: length(Pow_e)
```

```

if Pow_e(i,1)==0; Pow_e(i,1)=Pow_e(i-1,1);end
if RPM_out(i,1)==0; RPM_out(i,1)=RPM_out(i-1,1);end
if Tes_out(i,1)==0; Tes_out(i,1)=Tes_out(i-1,1);end
if nis_out(i,1)==0; nis_out(i,1)=nis_out(i-1,1);end
if a_v_out(i,1)==0; a_v_out(i,1)=a_v_out(i-1,1);end
if ftrs_out(i,1)==0; ftrs_out(i,1)=ftrs_out(i-1,1);end
if fvfss_out(i,1)==0; fvfss_out(i,1)=fvfss_out(i-1,1);end
if fvrss_out(i,1)==0; fvrss_out(i,1)=fvrss_out(i-1,1);end
if frrfs_out(i,1)==0; frrfs_out(i,1)=frrfs_out(i-1,1);end
if frrrs_out(i,1)==0; frrrs_out(i,1)=frrrs_out(i-1,1);end
if faes_out(i,1)==0; faes_out(i,1)=faes_out(i-1,1);end
if Wxs_out(i,1)==0; Wxs_out(i,1)=Wxs_out(i-1,1);end
end

Pow_e_filter= sgolayfilt(Pow_e(:,1),1,11);
RPM_out_filter= sgolayfilt(RPM_out(:,1),1,11);
Tes_out_filter= sgolayfilt(Tes_out(:,1),1,11);
a_v_out_filter= sgolayfilt(a_v_out(:,1),1,11);
ftrs_out_filter= sgolayfilt(ftrs_out(:,1),1,11);
fvfss_out_filter= sgolayfilt(fvfss_out(:,1),1,11);
fvrss_out_filter= sgolayfilt(fvrss_out(:,1),1,11);
frrfs_out_filter= sgolayfilt(fvrss_out(:,1),1,11);
frrrs_out_filter= sgolayfilt(fvrss_out(:,1),1,11);
faes_out_filter= sgolayfilt(fvrss_out(:,1),1,11);
Wxs_out_filter= sgolayfilt(fvrss_out(:,1),1,11);
dv_out_filter= sgolayfilt(dv(:,1),1,11);
dv_out_filter_km=dv_out_filter*3.6;
xs_out=cumtrapz(dv_out_filter(:,1))/1000;
kwh=cumtrapz(Pow_e_filter(:,1))/3600;
kwh_km=kwh(end,1)/xs_out(end,1);
kwh_eff=kwh(end,1)/(etha_th_e*etha_cb_e);
energy_eff=kwh_eff*3600;    %[kJ]
mass_fuel=energy_eff/fuel(1,2); %[kg]
vol_fuel=(mass_fuel/fuel(1,1))*1000; %[L]
vol_fuel_USA=(mass_fuel/fuel(1,1))*1000/3.78; %[gal]
km_gal=xs_out(end,1)/vol_fuel_USA;

dv_cycle=[dv(:,1);dv(end,1)]*3.6;

```

A. Función vehículo

Code Development

```
function dv=vehicle(t,v)
global conv3 conv4 reff ni nd g mv dr df hae hg etha
global slope_ref vel_ref vel_next enviroment dimensions capacity driving_cycle
global fvr fvf fvfs fvrs mg Trrr Te_i wz fae ftr mur Tbr Tbf braking Tes_in
global RPM_out Tes_out nis_out a_v_out ftrs_out fvfss_out fvrss_out frrfs_out frrrs_out
faes_out wxs_out dv_a deltha_acc_out deltha_acc deltha_Te_out deltha_Te
global brake_out
t
v
```

Reference vehicle velocity [m/s]

```
vel_ref=conv4*interp1(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,2),t);
```

Reference vehicle velocity after deltha t [m/s]

```
vel_next=conv4*interp1(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,2),t+0.2);

%   if vel_ref<=0 && v>2;
%       v=0;
%   end
```

Reference slope [rad]

```
slope_ref=0 *conv3;%interp1(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,4),t);
```

Vehicle mass [kg]

```
mv=0.5*(capacity(2,1)+capacity(3,1));
```

Vehicle weight [N]

```
mg=mv*g;
df=fvrs*dimensions(1,1)/((capacity(2,1)+capacity(2,1))*(-g));
dr=fvfs*dimensions(1,1)/((capacity(2,1)+capacity(2,1))*(-g));
[Tbr,Tbf,braking]=brake(v);
```

Function tyre for calculate mu, mu_r, reff, rg

```
[rg,drt,reff,mur,ftx,fc,s]=tire(v,fvr);

x0 = [fvr;fvf]; % Make a starting guess at the solution
x = fsolve(@fvertical,x0); % Call solver
```

```
fvr=x(1,1);
fvf=x(2,1);
```

Rolling resistance

```
frrr=fvr* $\mu$ r;
frrf=fvf* $\mu$ r;
Trrr=drt*fvr* $\mu$ r;
```

Function transmission for calculate ni

```
[ni,nd,etha,vel]=transmission(v, rg,reff, nd);
Ntf=ni*nd;
```

Component Weight

```
wx=mg*sin(slope_ref);
wz=mg*cos(slope_ref);
```

Equation for calculate inicial torque

```
Te_o=ftr*reff/(ni*nd*etha)+Trrr/(ni*nd*etha);% $-w_x/(ni*nd*etha)$ 
stop=1;
if vel_ref<=0 && v<0
    stop=0;
    Te_o=Te_i;
end
```

Engine function

```
[Te,RPMe,dv] =engine(Te_o,v,Ntf,t,dv_a, mv,Te_i);
```

Tractive force

```
ftr=(Te*ni*nd*etha)/reff;
if ftr >=ftx
    ftr=ftx;
end
```

Aerodynamic drag

```
fae=0.5*dimensions(4,1)*(dimensions(2,1)*dimensions(3,1))*enviroment(3,1)*(v(1)+enviroment(4,1))^2;
```

Gravity center

```
hg=0.2*dimensions(3,1);
```

Center pressure

```
hae=0.5*dimensions(3,1);
```

Torque rolling resistance

```
Trrf=drt*fvf*mur;
```

Vehicle equation

```
dv(1) =((ftr-frrf-frrr-fae+wx-braking*((Tbr/reff)+(Tbf/reff)))/mv)*stop;
dv_a=dv(1);

delta_Tes=delta_Te;
delta_accs=delta_acc;
Tes=Te;
ftrs=ftr;
if v<=0.3

delta_Tes=0;
delta_accs=0;
Tes=0;
ftrs=0;
end
```

Output variables

```
delta_Te_out(fix(t+1))=delta_Tes;
delta_acc_out(fix(t+1))=delta_accs;
RPM_out(fix(t+1))=RPMe;
Tes_in(fix(t+1))=Te_o;
Tes_out(fix(t+1))=Tes;
nis_out(fix(t+1))=ni;
a_v_out(fix(t+1))=dv(1);
ftrs_out(fix(t+1))=ftrs;
fvfss_out(fix(t+1))=fvf;
fvrss_out(fix(t+1))=fvr;
frrfs_out(fix(t+1))=frrf;
frrrs_out(fix(t+1))=frrr;
faes_out(fix(t+1))=fae;
wxs_out(fix(t+1))=wx;
brake_out(fix(t+1))=braking;
```

B. Función sumatoria de momentos en el centro de gravedad del vehículo

```
function F = fvertical(x)
global mur dr df hae hg Wz fae ftr Tbr Tbf braking reff
F = [x(1)*dr+(mur*x(1)+mur*x(2))*hg-x(2)*df-ftr*hg-fae*(hae-hg)+
braking*((Tbr/reff)+(Tbf/reff))*hg;
```

```

x(1)+x(2)+Wz];

% fvr=x(1)
% fvf=x(2) + braking*((Tbr/reff)+(Tbf/reff))*hg

```

C. Función caja de velocidades

Function of the gearbox

```

function [ni,nd,etha,vel]=transmission(v, rg,reff, nd)
global transmission_v v_shift conv1 redline

```

Assigning speed ratios

```

n_1=transmission_v(1,1);
n_2=transmission_v(2,1);
n_3=transmission_v(3,1);
n_4=transmission_v(4,1);
n_5=transmission_v(5,1);
vel=v(1);

```

Option A

```

%if v(1,1)/reff==v_shift(1,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff ;end
% if vel_ref<=4*v_shift(5,1)*reff; ni=n_5;if
v(1)/reff==v_shift(5,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
% if vel_ref<=v_shift(4,1)*reff; ni=n_4;if
v(1)/reff==v_shift(4,1);vel=((redline*0.55)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
% if vel_ref<=v_shift(3,1)*reff; ni=n_3;if
v(1)/reff==v_shift(3,1);vel=((redline*0.5)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
% if vel_ref<=v_shift(2,1)*reff; ni=n_2;if
v(1)/reff==v_shift(2,1);vel=((redline*0.4)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end
%
% if vel_ref<=v_shift(1,1)*reff; ni=n_1;if
v(1)/reff==v_shift(1,1);vel=((redline*0.3)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end

```

Option B

```

%if v(1,1)/reff==v_shift(1,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff ;end
if v(1)>v_shift(5,1)*reff; ni=n_5;if v(1)/reff==v_shift(5,1);end;end
if v(1)<=5000*v_shift(5,1)*reff; ni=n_5;if
v(1)/reff==v_shift(5,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
if v(1)<=v_shift(4,1)*reff; ni=n_4;if
v(1)/reff==v_shift(4,1);vel=((redline*0.55)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
if v(1)<=v_shift(3,1)*reff; ni=n_3;if

```

```
v(1)/reff==v_shift(3,1);vel=((redline*0.5)/ni*nd)*conv1*reff;end;end
if v(1)<=v_shift(2,1)*reff; ni=n_2;if
v(1)/reff==v_shift(2,1);vel=((redline*0.4)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end
if v(1)<=v_shift(1,1)*reff; ni=n_1;if
v(1)/reff==v_shift(1,1);vel=((redline*0.3)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end
```

Option C

```
%
% %if v(1,1)/reff==v_shift(1,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff ;end
% if v(1)<=2*v_shift(5,1)*reff; ni=n_5;if v(1)/reff==v_shift(5,1);end;end
% if v(1)<=v_shift(4,1)*reff; ni=n_4;if v(1)/reff==v_shift(4,1);end;end
% if v(1)<=v_shift(3,1)*reff; ni=n_3;if v(1)/reff==v_shift(3,1);end;end
% if v(1)<=v_shift(2,1)*reff; ni=n_2;if v(1)/reff==v_shift(2,1);end;end
% if v(1)<=v_shift(1,1)*reff; ni=n_1;if v(1)/reff==v_shift(1,1);end;end

%if v(1,1)>v_shift(4,1)*reff; ni=n_5;if
v(1,1)/reff==v_shift(5,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reffend;end;end

% if v(1,1)>v_shift(1,1)*reff; ni=n_2;if
v(1,1)/reff==v_shift(2,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end
% if v(1,1)>v_shift(1,1)*reff; ni=n_2;if
v(1,1)/reff==v_shift(2,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reff ;end;end
% if v(1,1)>v_shift(2,1)*reff; ni=n_3;if
v(1,1)/reff==v_shift(3,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reffend;end;end
% if v(1,1)>v_shift(3,1)*reff; ni=n_4;if
v(1,1)/reff==v_shift(4,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reffend;end;end
% if v(1,1)>v_shift(4,1)*reff; ni=n_5;if
v(1,1)/reff==v_shift(5,1);vel=((redline*0.6)/ni*nd)*conv1*reffend;end;end
```

D. Función frenar

```
function [Tbr,Tbf,brake]=brake(v)
global Tmax transmission_v vel_ref vel_next slope_ref

if v >=vel_ref && vel_ref >= vel_next
brake=1;
else
brake=0;
end
ampl=0.1;
if slope_ref ==0; ampl=8;end

if vel_ref <=15
    ampl=2;
end
if vel_ref <=5
    ampl=12;
end
```

```

if vel_ref <=2
    ampl=15;
end
if vel_ref <=1.2
    ampl=55;
end
if vel_ref <=0.5
    ampl=80;
end

brake
Tb=Tmax*transmission_v(1,1)*v(1)*ampl;
Tbr=0.25*Tb;
Tbf=0.75*Tb;

```

E. Función motor

```

function [Te,RPMe,dv]=engine(Te_o,v,Ntf,t,dv_a,mv,Te_i)

global engine conv2 idle redline Tmax reff conv3 driving_cycle vel_ref
global fvfs fvrs fvf fvr ftr fae ni transmission_v vel_next deltha_Te
global mur deltha_acc slope_ref

RPM=(v/reff)*conv2*Ntf;
idle=min(engine(:,1));
redline=max(engine(:,1));
Tmax=max(engine(:,2));
if RPM<idle
    RPM=idle;
end

if RPM>redline
    RPM=redline;
end
RPMe=RPM;

TeUP=interp1(engine(:,1),engine(:,2),RPMe);
TeDOWN=interp1(engine(:,1),engine(:,3),RPMe);

dv=dv_a;
acc_ref=interp1(driving_cycle(:,1),driving_cycle(:,3),t);
deltha_acc= acc_ref-dv_a;

if acc_ref==0 && vel_next== 0; deltha_acc=0;end

```

decelerate

```
%if v> vel_ref; amp=0.1; end
%if v> vel_ref; amp=2; end
if v> vel_ref; amp=3; end

if v> vel_ref && v<0.5; amp=0.001; end
```

accelerate

```
if v<= vel_ref
    amp=0.8;
end

% if v<= vel_ref
%   amp=0.5;
% end

if v<vel_ref; deltha_acc=deltha_acc*0.1;end
if slope_ref==0; deltha_acc=deltha_acc*2;end

deltha_Te=amp*(mv*deltha_acc*reff)/Ntf;
Te=deltha_Te+Te_o;

%Te=Te_o*(1+0.5*cos(10*conv3*t)); % signal input sin
%Te=Te_o*(1+0.4*sin(10*conv3*t));
%Te=Te_o*(0.65+0.0*t); % signal input constant charge

if Te>TeUP
    Te=TeUP;
end

if Te<0
    Te=0;
end

if v<=0 && vel_ref <=0%%

% Front and rear inicial vertical forces [N]
fvf=fvfs;
fvr=fvrs;
```

Initial condition for EDOs system and model
Vehicle velocity [m/s]

```
dv=0;
```

Rolling resist factor

```
mur=0;
```

Initial Rear traction force [N]

```
ftr=10;
```

Initial aerodynamic force [N]

```
fae=0;
Te=0;
```

Initial speed Relation

```
ni=transmission_v(1,1);
```

```
end
%
```

F. Función rueda

```
%*LuGre tire modeling for longitudinal dynamic*
%
```

Solve the tire problem for longitudinal effort and friction coefficient
El de una tesis en estado static LuGre Distribution (SEE reference thesis)

```
sig0=181.54;
sig2=0.0018;
muC=0.8;
muS=1.55;
vs=6.57;
%fn=1;
fn=1500;
l=0.2;
alpha=0.5;
s=0:0.001:1;
v=9;
g=zeros(length(s),1);
temp=zeros(length(s),1);
fb=zeros(length(s),1);
mu=zeros(length(s),1);
for x=1:length(s)
    g(x)=muC+(muS-muC)*exp(-abs(v*s(x)/vs)^alpha);
    temp(x) = g(x)*abs(1+s(x))/(sig0*l*s(x));
    fb(x)=fn*g(x)*(1+temp(x)*(exp(-1/temp(x))-1))+fn*sig2*v*s(x);
    mu(x)=fb(x)/fn;
```

```
end  
plot(s,mu,'b')  
hold on
```


Anexo D. Tablas de datos

Datos consumo combustible y energía al freno Dinamometro						
		Carga al 25 % velocidad 40 km/h				
Articulado s157 SCANIA	Test	T1	T2	T3	Valor Promedio	Desviación estandar
Distancia recorrida	[km]	6	6.79	5.03	5.94	0.88
Consumo	[ml]	1556.82	1488.36	1392.52	1479.23	82.53
Masa combustible	[kg]	1.34	1.28	1.20	1.27	0.07
Energía asociada al combustible	[kj]	58776.18	56191.54	52573.20	55846.98	3115.81
kWh	kWh	16.33	15.61	14.60	15.51	0.87
Eficiencia real	[kWh/km]	2.72	2.30	2.90	2.64	0.31
	[km/l]	3.85	4.56	3.61	4.01	0.49
	[l/100km]	25.95	21.92	27.68	25.18	2.96
	km/gal	14.57	17.24	13.65	15.16	1.87
Carga al 25 % velocidad 40 km/h						
Buseta z504038 Mercedes benz	Test	T1	T2	T3	Valor medio	Desv
Distancia recorrida	[km]	6.75	6.23	6.17	6.38	0.32
Consumo	[ml]	1018.83	1081.02	1082.13	1060.66	36.23
Masa combustible	[kg]	0.88	0.93	0.93	0.91	0.03
Energía asociada al combustible	[kj]	38464.91	40812.83	40854.74	40044.16	1367.83
kWh	kWh	10.68	11.34	11.35	11.12	0.38
Eficiencia real	[kWh/km]	1.58	1.82	1.84	1.75	0.14
	[km/l]	6.63	5.76	5.70	6.03	0.52
	[l/100km]	15.09	17.35	17.54	16.66	1.36
	km/gal	25.04	21.78	21.55	22.79	1.95
Carga al 25 % velocidad 40 km/h						
Micro-bus Z40 0001 NKR	Test	T1	T2	T3	Valor medio	Desv
Distancia recorrida	[km]	6.29	6.58	6.56	6.48	0.16
Consumo	[ml]	806.85	781.09	813.11	800.35	16.97
Masa combustible	[kg]	0.69	0.67	0.70	0.69	0.01
Energía asociada al combustible	[kj]	30461.81	29489.27	30698.15	30216.41	640.72
kWh	kWh	8.46	8.19	8.53	8.39	0.18
Eficiencia real	[kWh/km]	1.35	1.24	1.30	1.30	0.05
	[km/l]	7.80	8.42	8.07	8.10	0.32
	[l/100km]	12.83	11.87	12.39	12.36	0.48
	km/gal	29.47	31.84	30.50	30.60	1.19
Carga al 25 % velocidad 40 km/h						
Camioneta Mazda B2000	Test	T1	T2	T3	Valor medio	Desv
Distancia recorrida	[km]	6.1	6.54	5.57	6.07	0.49
Consumo	[ml]	608.06	599.2	626.48	611.25	13.92
Masa combustible	[kg]	0.52	0.52	0.54	0.53	0.01
Energía asociada al combustible	[kj]	22956.70	22622.20	23652.13	23077.01	525.40
kWh	kWh	6.38	6.28	6.57	6.41	0.15
Eficiencia real	[kWh/km]	1.05	0.96	1.18	1.06	0.11
	[km/l]	10.03	10.91	8.89	9.95	1.01
	[l/100km]	9.97	9.16	11.25	10.13	1.05
	km/gal	37.92	41.26	33.61	37.60	3.83

Consumo promedio en ruta para vehículos											
Consumo Articulado S157 Scania			Consumo Buseta z504038 Mercedes benz			Consumo Micro-bus Z40 0001 NKR			Camioneta Mazda B2000		
Ruta 1			Ruta 1			Ruta 1			Ruta 1		
distancia (km)	34		distancia (km)	22		distancia (km)	23		distancia (km)	17.2	
km/l	3.95		km/l	7.56		km/l	8.70		km/l	9.90	
km/galon	14.96		km/galon	28.63		km/galon	32.92		km/galon	37.48	
Gal/100km	6.68		Gal/100km	3.49		Gal/100km	3.04		Gal/100km	2.67	
[L/100km]	25.31		[L/100km]	13.22		[L/100km]	11.50		[L/100km]	10.10	
Ruta 2			Ruta 2			Ruta 2			Ruta 2		
distancia (km)	33.60		distancia (km)	22.00		distancia (km)	21.10		distancia (km)	16.50	
km/l	3.97		km/l	6.51		km/l	8.55		km/l	9.01	
km/galon	15.03		km/galon	24.66		km/galon	32.35		km/galon	34.10	
Gal/100km	6.65		Gal/100km	4.05		Gal/100km	3.09		Gal/100km	2.93	
[L/100km]	25.19		[L/100km]	15.35		[L/100km]	11.70		[L/100km]	11.10	
Ruta 3			Ruta 3			Ruta 3			Ruta 3		
distancia (km)	33.60		distancia (km)	21.20		distancia (km)	20.00		distancia (km)	16.80	
km/l	4.13		km/l	9.49		km/l	9.52		km/l	8.93	
km/galon	15.64		km/galon	35.91		km/galon	36.05		km/galon	33.80	
Gal/100km	6.39		Gal/100km	2.78		Gal/100km	2.77		Gal/100km	2.96	
[L/100km]	24.21		[L/100km]	10.54		[L/100km]	10.50		[L/100km]	11.2	
Promedio [L/100km]	23.20		Promedio [L/100km]	13.04		Promedio [L/100km]	9.83		Promedio [L/100km]	10.80	
Desviación	0.60		Desviación	2.41		Desviación	0.64		Desviación	0.61	

Anexo E. Especificaciones vehículos

Las fichas técnicas las encuentra en el DVD anexo en la dirección:
D:\Thesis LGPR>About expetiment\Technical specification\Vehicles

Especificaciones vehículos				
Especificación	Articulado	Buseta	Micro-bus	Mazda
Especificaciones vehículo				
Marca	Scania	MercedesBenz	Chevrolet	Mazda
Modelo	K94 IA6X2	LO 915	NKR	B2000
Año	2006	2010	2008	1990
Especificaciones motor				
Referencia	DC921 /310	DC OM 904 LA	4JJ1 - TC	-----
Pot. Máx. [kW]	230	110	95	42
Mm. Máx. [Nm]	1100	580	330	147
RPM ralentí	650	650	650	720
RPM gobernación	2200	2500	4000	5500
Especificaciones transmisión				
Relación 1	3.43	5.12	5.315	3.622
Relación 2	2.01	2.37	3.053	2.186
Relación 3	1.42	1.42	1.655	1.419
Relación 4	1	1	1	1
Relación 5	0.83	0.77	0.721	
Relación 6	0.59			
Relación diferencial	4.88	5.72	5.125	3.909
Especificaciones de capacidad y dimensiones				
Peso en vacío [Tn]	-----	2670	-----	-----
Eje delantero [Tn]	7500	2600-1520	2900	930
Eje trasero [Tn]	12000	5900-1150	5000	1231
Ref. ruedas	295/80 R22.5	215/75 R17.5	R126/22.5	195R14 C
Dist. entre ejes [m]	12	4.2	3.345	2.7

Anexo F. Protocolo dinamómetro

*Se utiliza la abreviatura DYNO para hacer alusión al chasis dinamométrico.

Indicación A: Asegúrese de que el numeral (I) al (III) sean diligenciados previo al desarrollo de la prueba en el DYNO.

Indicación B: Asegúrese de sacar las piedras, excesos de mugre en las ruedas y revisar su estado y labrado.

Indicación C: Asegúrese de calibrar la celda de carga ANTES del montaje del vehículo sobre el DYNO.

Indicación D: Asegúrese de montar el vehículo sobre los rodillos del DYNO con el elevador arriba y garantizar que el vehículo esta lo más alineado posible con el DYNO.

Indicación E: Instructivo de montaje. Una vez montado el vehículo sobre el DYNO, Recuerde:

1. Centrar el vehículo rodando sobre los rodillos y de forma controlada (vel. <10 km/h), el vehículo tiende a oscilar por un momento, preste atención y evite accidentes, NO olvide bajar el elevador previo a cualquier prueba.
2. Apague el vehículo.
3. Ancle el vehículo al DYNO utilizando el juego de eslingas y cadenas del DYNO, preferiblemente ancle del chasis del vehículo, evite ejes u elementos no portantes, utilice mínimo cuatro (4) puntos para vehículos de dos (2) ejes y seis (6) puntos para vehículos de tres (3) ejes.
4. Fije las cuñas de caucho y madera a las ruedas del eje no tractor, de este modo evita el exceso de movimiento oscilatorio del vehículo e introduce seguridad a la prueba.
5. Monte el ventilador de refrigeración del DYNO apuntando hacia el sistema de refrigeración del vehículo.
6. Monte el medidor de RPM óptico al vehículo siguiendo los protocolos de "Pruebas sobre banco dinamométrico para determinación de factores de emisión".
7. Rodee el perímetro de trabajo del DYNO y de la unidad PAU con cinta de seguridad.
8. El vehículo se encuentra montado y preparado para los procedimientos de calentamiento, calibración y desarrollo de pruebas.

Indicación F: Se utiliza RDI – RDE – RII – RIE para expresar "Rueda Derecha/Izquierda Interna /Externa"

I. Información general del vehículo						
Empresa		Placa veh.		ID veh.		
Odometro lectura inicial [km]			RPM ralenti/gobernación	ejemplo: 560/2500		
Pot. Max. pre filtro [kW @ RPM]		Mm. máx. pre filtro [N*m @ RPM]				
Estado ruedas eje de tracción	Marca	Presión ideal	Presión real	Marca	Presión ideal	Presión real
	RDI			RII		
	RDE			RIE		
Evaluación general vehículo		Estado				
Estado general del sistema de escape		Presenta fugas				
Estado del filtro instalado		Presenta algún tipo de daño a la vista				
Estado motor y sistema de transmisión		Presenta algún tipo de daño a la vista				
Estado ruedas		Cumplen presión - labrado apto - reencauchado				
Observaciones relacionadas con el estado del vehículo: _____						

Indicación G: Reúna a todo el personal, incluido Unal y asistentes para recordarles las mínimas normas de seguridad y comportamiento dentro del espacio limitado para el DYNO.

II. Asistentes a las pruebas					
Nº	Nombre:	Cedula	Representa a:	celular	e-mail
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
Observaciones relacionadas con los asistentes a la prueba: _____					

Indicación G: Por "Estado" en la sección (III) se interpreta como Operativo cuando el equipo está al día y montado, operando adecuadamente, de lo contrario No operativo.

III. Personal de trabajo Universidad Nacional					
Nº	Equipo	Estado	Líder	Apoyo 1	Apoyo 2
1	Analizador de gases Testo	Op /Nop			
2	Analizador de gases BB	Op /Nop			
3	Dinamómetro	Op /Nop			
4	Muestreador de NP - Nanomet	Op /Nop			
5	Muestreador de PM - Dekati	Op /Nop			
6	Opacímetro	Op /Nop			
7	Sonómetro	Op /Nop			
8		Op /Nop			
9		Op /Nop			
10		Op /Nop			
Observaciones relacionadas con el personal de trabajo: _____					

Precaución A. Mantenga personal y asistentes a una distancia moderada de los rodillos y la unidad PAU del DYNO.

Precaución B. Durante las pruebas mantenga inspeccionando temperatura de:

1. Ruedas:
 - a. Rln <17.5 [in] y rueda de labrado alto <100 [°C], Temp. Normal 70 [°C].
 - b. Rln <17.5 [in] y rueda de labrado bajo < 90 [°C] (Labrado <1 [cm]), Temp. Normal 70[°C].
 - c. Rln <22.5 [in] <110 [°C], Temp. Normal 95 [°C].
2. Rodillos
 - a. La temperatura de los rodillos tiende a seguir la temperatura que tenga la rueda.
3. Discos de la unidad PAU

Máxima temperatura 460 [°C] por un intervalo de tiempo NO mayor a 5 [min].

Indicación H: Lineamientos de calibración:

1. Calibre con el vehículo montado un el DYNO las RPM del motor.
2. Tome las muestras de las emisiones de fondo previo al desarrollo de las pruebas.
3. El momento de la unidad PAU con el procedimiento de calibración le debe presentar un valor de **100[Nm]±2[Nm]**.
4. El velocímetro del vehículo de presentar un error relativo mayor al 10% se considera en mal estado.
5. El peso del eje corresponde al eje sin carga. Se recomienda para vehículos livianos montar algunos galones de agua para evitar que el vehículo salte en exceso durante la prueba.

Indicación I: Las curvas características del motor se deben sacar bajo la última marcha del vehículo, se recomienda llegar a esta velocidad con el motor bajo en RPM, una vez alcance esta velocidad si se procede a poner el acelerador a fondo.

IV. Condiciones iniciales prueba						
Emisiones de fondo	ppm CO	ppm NOx	ppm NO	ppm NO2	% CO2	ppm HC
	PM		NP		Temp [°C]	
Desempeño mecánico vehículo	Cal. RPM		si / no	Pot. Max. [kW @ RPM]		
	Cal. Celda de carga		si / no	Mm. Max. [N*m @ RPM]		
	Chequeo Velocímetro		si / no	Vel. Max. [km/h]		
Temp. Ambiente [°C]		Humedad relativa [φ]			T calen. [min]	
Momento PAU [N*m]		Error relativo vel. [%]		<10% Ok	Peso eje [Tn]	
Observaciones:						

Recomendación A. Este formato está destinado para recolectar y seguir los procedimientos producto del protocolo "Pruebas sobre banco dinamométrico para determinación de factores de emisión". Por ende se recomienda leer el protocolo enunciado para garantizar éxito sobre el ejercicio.

Recomendación B. Las pruebas a carga constantes se recomienda desarrollarlas en el siguiente orden: 25% - 50 % - 75% y finalmente 0 % en carga, tal ejercicio permite calentar tanto el vehículo como el DYNO de manera escalonada y presta un mejor servicio el DYNO.

Recomendación C. El aumento progresivo de la carga en el DYNO se debe hacer tal que tanto como Potencia y momento motor se estabilicen, esto evitara ciclos de carga excesivos sobre los ejes del DYNO.

Anexo G. Anexos DVD

En el DVD encuentra tres (3) carpetas, Sobre el experimento, los códigos desarrollados, los artículos consultados y el documento de la tesis.

En las imágenes a continuación encuentra el desplegable de cada carpeta con su debido contenido.

