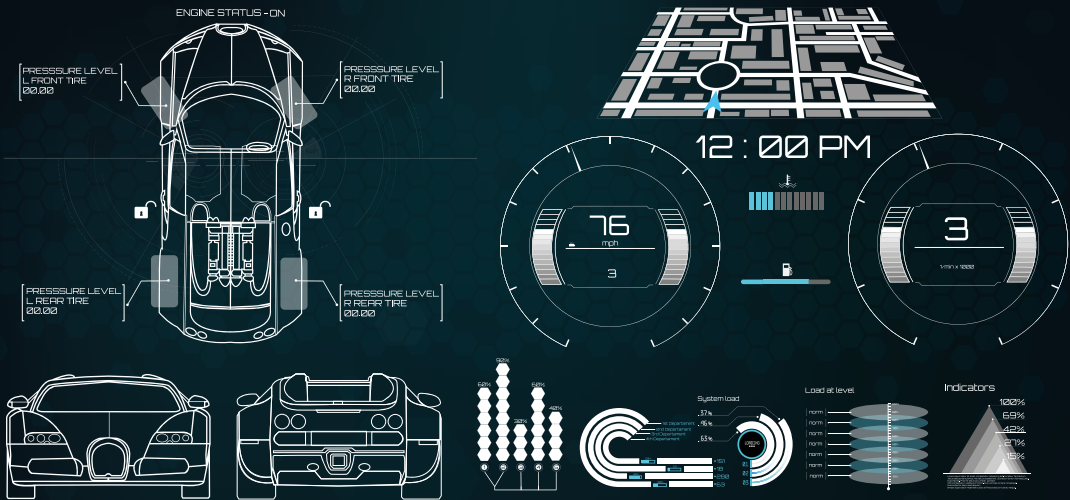


Renato Fierro J. / Andrés Ordóñez S.
Editores

La Ingeniería Automotriz

Clave para el desarrollo sostenible
del Ecuador



Universidad Politécnica Salesiana

La Ingeniería Automotriz
clave para el desarrollo sostenible
de Ecuador

Renato Fierro J.
Andrés Ordóñez S.
Editores

La Ingeniería Automotriz clave para el desarrollo sostenible de Ecuador



2018

LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ CLAVE PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE ECUADOR

© Renato Fierro J. y Andrés Ordóñez S. (Editores)

1ra edición: Universidad Politécnica Salesiana
Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Cuenca-Ecuador
Casilla: 2074
P.B.X. (+593 7) 2050000
Fax: (+593 7) 4 088958
e-mail: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRÍZ

Derechos de autor: 054866

ISBN: 978-9978-10-327-2

Edición, diseño,
diagramación
e impresión Editorial Universitaria Abya-Yala
Quito-Ecuador

Tiraje: 300 ejemplares

Impreso en Quito-Ecuador, noviembre de 2018

Publicación arbitrada de la Universidad Politécnica Salesiana

Comité científico.....	7
Prólogo	9

CAPÍTULO 1 DISEÑO AUTOMOTRIZ

Modelación matemática y simulación en ingeniería automotriz <i>Juan D. Valladolid</i>	17
Diseño y simulación de un atenuador de impactos para vehículo de turismo <i>Renato Fierro J., Adrián Sigüenza R. y Juan Diego Jara</i>	33
Propuesta metodológica para el diseño del chasis de un kart tipo KF4 <i>Wilmer Contreras, Pablo Quezada y Lizzete Ortiz</i>	55

CAPÍTULO 2 CONTROL DE CONTAMINACIÓN

Métodos para determinar factores de emisiones de fuentes móviles en el cantón Cuenca <i>Andrés Esteban Ordóñez Segarra</i>	81
Análisis de los límites de gases contaminantes generados por fallas en un motor utilizando cartas de control <i>Francklin Rivas P., Cristian García G., Anna Pérez M., Mary Vergara P., Néstor Rivera C., Francklin Rivas E. y Ángel Paucar U.</i>	95

CAPÍTULO 3 MOVILIDAD

Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca <i>Javier Vázquez Salazar, Pablo Pérez Llanos y Christian Quito Sinchi</i>	117
Estado del arte sobre determinación de costos en externalidades de la movilidad en vehículos privados <i>Carlos Wladimir Roche Intriago</i>	141

CAPÍTULO 4 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Modelo para la evaluación del desempeño energético de diversas configuraciones de buses eléctricos en la ciudad de Cuenca <i>Daniel Cordero-Moreno, Wilson Zumba Álvarez, Mateo Coello Salcedo y Francisco Torres Moscoso</i>	161
--	-----

Comité científico

ARGENTINA

M.Sc. Daniel Zambrano
Universidad de Buenos Aires
danaz_ar@yahoo.com.ar

BRASIL

Ing. Jamário Santos Souza
Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus
jamario@graduate.org

CANADÁ

Mgs. María Virginia Hernández
Universidad de los Andes
mvirginiah@gmail.com

ECUADOR

M.Sc. Mateo Coello
Universidad del Azuay
mateocoello@gmail.com

Dr. Andrés López
Universidad del Azuay
alopezh@uazuay.edu.ec

M.Sc. Jairo Ortega
Budapest University of Technology and Economics
ing.jairoortega@gmail.com

M.Sc. Celin Padilla
Escuela Politécnica del Chimborazo
c_padilla@esPOCH.edu.ec

M.Sc. José Segnini
Pontífice Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra
jmsegnini@pucesi.edu.ec

VENEZUELA

Dr. Carlos Bloem
Universidad de los Andes
materiales.ula@gmail.com

Dr. Miguel Díaz
Universidad de los Andes
miguediazr@gmail.com

M.Sc. Sara Yépez
Universidad de los Andes
saritayepzv@gmail.com

Dra. Gabriela Pérez
Universidad de los Andes
gabipm23@gmail.com

Prólogo

El texto editado y realizado por los diferentes autores es una importante contribución al desarrollo de la sostenibilidad ecuatoriana, y que mantiene el debate sobre temas del estudio de la Ingeniería Automotriz. El mérito del libro radica en una triple condición: de una parte, alimenta la investigación académica ecuatoriana, por otra parte, contribuye a llenar el vacío de producción científica automotriz direccionada a las necesidades del Ecuador, y finalmente reconoce el esfuerzo de los investigadores que se dedican a la producción académica. La Ingeniería Automotriz es un saber que estudia todo lo relacionado con la industria automotriz: diseño, manufactura, sistemas operativos, control y automatización, control ambiental, eficiencia energética, administración e innovación tecnológica. Consecuentemente, se trata de una ciencia versátil que abarca el conocimiento de varias áreas en una aplicación específica, (el vehículo), obviamente técnica por su naturaleza de invención de soluciones para movilidad humana y acérrimamente evolutiva que supera las necesidades de transporte del ser humano con el avance del tiempo, adicionándole: confort, seguridad y efectividad.

Buscando concertar a investigadores y compartir sus experiencias para orientar a los estudiantes, la Universidad Politécnica Salesiana en su sede Guayaquil, desarrolló en 2018 las Segundas Jornadas Científicas de Ingeniería Automotriz. Este texto es el producto final de ese evento académico, cuyas memorias técnicas son constituidas por ocho resultados de investigaciones en Ingeniería Automotriz que aportarán desarrollo sostenible del Ecuador en áreas tales como: diseño, control de contaminación, eficiencia energética y movilidad.

Las innovaciones tecnológicas automotrices componen propuestas de tecnologías revolucionarias enfocadas a un cambio paradigmáti-

co del sector, que inician a través de la aplicación de diferentes técnicas y herramientas de diseño que se realiza actualmente en entornos virtuales que no solo permiten definir la forma de los objetos sino también su comportamiento, simulando condiciones operativas reales a través de técnicas matemáticas sistematizadas. Así el presente libro inicia describiendo la necesidad de utilización de modelos matemáticos y simulación en la ingeniería como herramienta de estudio para predicción y mejora de prototipos, e inmediatamente se revisan experiencias en casos de aplicación de elementos de seguridad como el travesaño delantero de un vehículo de turismo popular en Ecuador, y el diseño de un chasis de kart utilizando programas computacionales basados en el método de elementos finitos.

El principio de funcionamiento de los motores de combustión, su popularidad de uso gracias al desarrollo de potencia, y la vasta experiencia humana en esta tecnología, ha ocasionado que su uso masificado tenga consecuencias de toda condición. Una de ellas es la incidencia en el incremento lo gases de efecto invernadero, específicamente el bióxido de carbono; por lo que se exponen dos experiencias en este campo: un estado del arte de las diferentes metodologías para la obtención de valores de factores de emisión en un entorno de ensayo y a continuación, un análisis de las emisiones, contrastando valores de funcionamiento óptimo en contra de valores por fallas inducidas a través de las denominadas cartas de control que constituyen la referencia de los valores permisibles.

La movilidad sostenible es un tema de actualidad, en la que se debe mitigar los efectos del uso masivo de vehículos terrestres para la transportación humana o de carga; esto ya constituido en un gran tema hoy en día, abarca la interrelación de los vehículos en funcionamiento con su entorno y la búsqueda de herramientas, estrategias, políticas y tecnología que minimicen sus consecuencias adversas al planeta. Por ello el texto presenta dos experiencias en esta área: iniciando con la determinación de ciclos de conducción con el método de matriz origen destino que obtiene un resultado representativo del comportamiento

de un vehículo particular en recorridos típicos del entorno evaluado, expresados a través de factores de funcionamiento; continuando con un caso de compilación de metodologías para determinar los valores agregados a los procesos de expansión humana, con el fin de obtener el costo externo de la transportación privada e inferir en la preferencia del uso del vehículo particular.

Finalmente, en este recuento investigativo se aborda la eficiencia energética a través del uso de medios de transporte masivos que usan fuentes energéticas amigables con el medio ambiente. La tendencia globalizada del uso del vehículo eléctrico encaminado a una movilidad sostenible ha generado dudas e incertidumbres acerca de sus consecuencias y aplicabilidad en entornos de uso de locomoción tecnológicamente clásica (vehículos de combustión); por ello se expone un modelo para la evaluación del desempeño energético de diversas configuraciones de buses eléctricos en condiciones reales de operación sobre rutas específicas y ciclos de conducción previamente definidos. De acuerdo a la demanda de transporte público del entorno de ensayo, se obtiene el requerimiento energético para cada ruta, como punto de partida en la implementación de movilidad eléctrica y su infraestructura de aplicación.

Este recorrido por varias ramas de la Ingeniería Automotriz muestra al lector múltiples aplicaciones y cambios de paradigmas en la industria automotriz, además de la capacidad investigativa en torno a esta ciencia que en el Ecuador se viene desarrollando, lo que muestra que no somos consumidores de tecnología, somos los productores de la misma, y que el camino que este texto inicia, constituirá el desarrollo de la nueva industria automotriz ecuatoriana.

Ing. Renato Fierro J. MSc.

Dedicado a todos aquellos estudiosos
de la Ingeniería Automotriz: se investiga por pasión,
se educa con amor, se contribuye por deber,
eso nos hace trascender.

Los autores

Capítulo 1

Diseño automotriz

Modelación matemática y simulación en ingeniería automotriz

Juan D. Valladolid¹

Resumen

Este documento discute la necesidad de la generación de modelos matemáticos y simulación en la ingeniería, de manera particular en la ingeniería automotriz, donde tanto los vehículos de combustión interna como en vehículos híbridos y eléctricos ofrecen un espacio de enorme potencial para su estudio. Estas herramientas plantean para el estudiante de ingeniería, una forma de estudio de los sistemas automotrices de manera tal, que podrá generar mejores propuestas para análisis de datos, sistemas de predicción, sistemas de control y mejora en los prototipos. También se incluye en este documento metodología y resultados de modelados y simulaciones de sistemas de suspensión, control de presión y simulación de sistemas de transmisión, haciendo uso de las herramientas Matlab & Simulink.

Palabras claves

Modelado matemático, sistemas automotrices, simulación, vehículo de motor a combustión interna, Vehículo Híbrido VH, Vehículo Eléctrico VE.

Abstract

This document discusses the need for the generation of mathematical models and simulation in engineering, particularly in automotive engineering, where both internal combustion vehicles and hybrid and electric vehicles offer a space of enormous potential for study. These tools are posed for the engineering student, a way of studying the automotive systems in such a way that it can generate better proposals for data analysis, prediction systems, control systems and improvement for the prototypes. In this document there is also included methodology and results of modeling, simulation of suspension systems, pressure control and simulation of transmission systems, using the Matlab & Simulink tools.

Keywords

Mathematical modeling, automotive systems, simulation, internal combustion engine vehicle, Hybrid Vehicle HV; Electric Vehicle EV.

1 Máster en Control y Automatización Industriales, Ingeniero Electrónico. Docente e Investigador del grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. jvalladolid@ups.edu.ec

Introducción

La modelación matemática y la simulación se han convertido en instrumentos muy comunes en el estudio de sistemas y sus comportamientos. El impulso acelerado de las técnicas de computación ha permitido el avance de nuevas estrategias de desarrollo y de propuestas a nivel de ingeniería. Para entender la definición de modelo matemático se recurre a (Bekey, 1977) donde, ya desde 1977 se establece conceptos para el modelado matemático como: “la reconstrucción de algo encontrado o creado en el mundo real, una representación simplificada de una forma más compleja”, por otra parte (Mathematical Modeling and Computer, 2010) se enfoca a modelación matemática como: “proceso o idea, que puede mejorar la comprensión y facilitar la predicción”.

Los modelos matemáticos en la ingeniería parten de modelos físicos que cumplen criterios establecidos para sus características (por ejemplo: el correcto uso de las variables: temperatura, velocidad, tensión fuerza de campo electromagnético, etc.), luego de esto se determina condiciones para su simulación, en este punto, depende fuertemente de este proceso cíclico para un existe en la predicción y comprensión de fenómenos de estudio (Singh, 2009).

En la investigación científica este tipo de estudios referente a los modelados matemáticos se concentra en la descripción matemática del comportamiento del sistema y subsistemas de prototipo bajo investigación. Estas descripciones se llaman modelos matemáticos, en donde sus resultados para determinar su éxito o replanteamiento se establecerán mediante la simulación por computadora. Para la gran industria se utilizan supercomputadores en serie o paralelo (Mathematical Modeling and Computer, 2010; Salett Biembengut, 2004).

En el estudio de la ingeniería automotriz el modelado matemático tiene un espacio de enorme potencial para su estudio. El uso de herramientas matemáticas como: ecuaciones diferencias, espacio de estados, ecuaciones de Euler etc., tienen como resultado la generación de modelos

que describen comportamientos de los diferentes sistemas de vehículo (Pawlus, Nielsen, Karimi, & Robbersmyr, 2010), desde el motor a combustión interna MCI hasta los vehículos híbridos VH y eléctricos VE. En los vehículos MCI existen una serie de subsistemas mecánicos que puede ser evaluados desde el modelado matemático y simulación, por ejemplo: el sistema de suspensión, vibraciones del vehículo, balances, sistemas de presión de combustible y predicción de fallas (Valladolid, 2017).

En comparación con los vehículos MCI, los vehículos VH y VE utilizan más componentes eléctricos, tales como máquinas eléctricas, electrónica de potencia, transmisiones electrónicas de variación continua (CVT), y Controles de tren de potencia integrados (Mohd, Hassan, & Aziz, 2015; Gao, Mi, & Emadi, 2007). Además de ello se incrementa la presencia de dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías, ultra-capacitores y pilas de combustible.

El presente documento se organiza de la siguiente manera: en la segunda sección se exhibirá una metodología propuesta para el modelado matemático. La tercera sección se presentará algunos aspectos y consideraciones para el modelado matemático. La sección cuarta se presenta el modelado de un sistema de suspensión utilizando espacio de estados, además una breve descripción de una simulación de un sistema de movimiento de un vehículo y sistemas híbridos-eléctricos. Finalmente, en la sección quinta se presentará las conclusiones y recomendaciones generadas en este documento.

Modelado matemático

Los modelos matemáticos representan una descripción matemática del modelo físico original, basado sobre leyes generales conocidas de la naturaleza (leyes físicas), datos experimentales y/o constantes conocidas. El modelado matemático facilita la solución de tres problemas principales para el estudio de un sistema o prototipo, estos son: análisis, síntesis y control (Bekey, 1977). La Figura 1 representa a un sistema

como una caja negra, donde interactúan: entradas (E), salidas (S) y su función de transferencia (F).

Figura 1
Representación de un sistema y sus componentes E, S y F



Fuente: Autor

Para el problema de análisis, se considera a E y F como funciones conocidas y S la incógnita, generalmente se considera como un problema directo y con una solución única. Sin embargo, para los problemas de síntesis y control son considerados problemas inversos, lo que resulta que su incógnita está en F y E respectivamente. Un modelo matemático de un sistema es básicamente una herramienta que permite resolver interrogantes sobre este último sin tener que recurrir a la experimentación.

Procesos para la obtención de modelos matemáticos para simulación

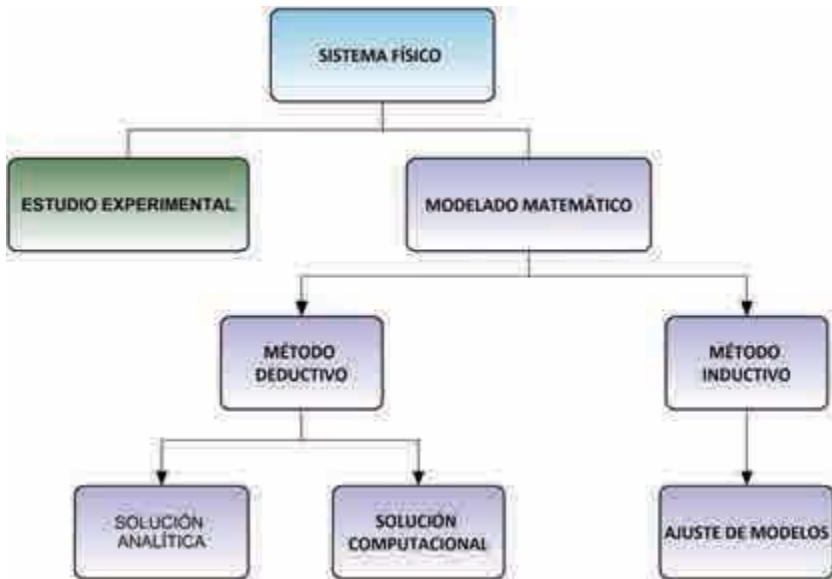
El proceso para la obtención de modelos matemáticos a partir de sistemas físicos se considera:

El análisis teórico o método deductivo, en donde se realiza un estudio cualitativo de los fenómenos físicos relacionados para luego describirlo en relaciones matemáticas concretas y su posterior planteamiento como una ecuación.

El análisis experimental o método inductivo, en donde se construye un modelo matemático a partir de experimentaciones o mediciones realizadas sobre el sistema que se va a estudiar. En este método es importante realizar varias mediciones y a su vez realizar una descripción detallada de su evolución.

La Figura 2 muestra un esquema del proceso de modelado matemático para simulación en ingeniería.

Figura 2
Representación esquemática del modelado matemático en ingeniería



Fuente: Autor

Consideraciones durante el modelado matemático

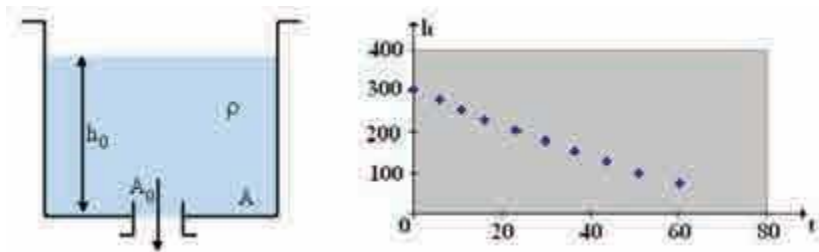
Durante el proceso de modelado matemático en la ingeniería, se debe tener en consideración algunos supuestos de carácter general, que se relacionan con las propiedades del sistema físico original o el

fenómeno bajo investigación. Los supuestos que se consideran en este documento son:

La separabilidad, que hace dividir el sistema original en subsistemas menos complejos y de estudio independiente, por ejemplo, para un sistema denominado vehículo, se puede dividir en subsistemas como: suspensión, transmisión, motor, dirección etc.

La selectividad, permite seleccionar un numero restringido de estímulos o variables durante el proceso de modelado, por ejemplo, durante el proceso del modelo de un sistema descrito en (Brito, Alemán, & Fraga, 2011) y que se muestra en la Figura 3, dependiendo del grado de exactitud se puede elegir una expresión matemática según su ajuste a la curva.

Figura 3
Sistema drenaje de un tanque a través
de un orificio con sus respectivos datos experimentales



Fuente: Brito, Alemán, & Fraga, 2011

El sistema presentado en la Figura 3 es gobernado por la ecuación (1).

$$\rho q = \frac{d(\rho Ah)}{dt}$$

donde:

q : Flujo volumétrico de salida del líquido, en m^3/s

A : Área del fondo del tanque, en m^2

$A0$: Área del orificio, en m^2

h : Altura del líquido en cualquier instante de tiempo, en m

ρ : Densidad del líquido, Kg/m^3

t : tiempo, en s

Si se considera que no hay dependencia entre q y h , esto implicaría que q es constante (c). Entonces el modelo puede ser representado por (2), asumiendo una relación lineal, se tendría un modelo que describe el fenómeno de manera satisfactoria.

$$h(t) = -\frac{c}{A}t + h_0 \quad 2$$

Ahora supongamos la dependencia entre q y h , por lo tanto, $q=bh$ y se tiene una dependencia exponencial. El valor b debe ajustarse a la curva (3). Este método mejoraría el ajuste en la curva, pero complicaría el modelo.

$$h(t) = h_0 e^{\frac{b}{A}t} \quad 3$$

Finalmente, se presenta un tercer modelo con dependencia exponencial entre q y p tal que, $q = kh^n$, resolviendo se puede deducir la expresión (4). Este modelo tiene un mejor ajuste entre el modelo y el fenómeno físico real, pero a una expresión matemática complicada en comparación de (2) y (3).

$$h(t) = h_0 \left[1 - \frac{kt(1-n)}{A(h_0)^{1-n}} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad 4$$

Por lo tanto, para un análisis de un sistema físico mediante el modelado matemático en ingeniería se puede establecer las siguientes precauciones.

- Determinar el grado de exactitud en los valores de los parámetros del modelo.
- Formulación de los modelos matemáticos es la que intrínsecamente está presente en los métodos matemáticos disponibles para su solución (leyes físicas y matemáticas).
- No atribuir al modelo cualidades que no llega a poseer.
- Precisar el intervalo de validez del modelo (linealidades y no linealidades)

Modelado matemático y simulación en sistemas automotrices

El vehículo y los sistemas que lo componen, presentan un gran campo de estudio de su comportamiento. Utilizando herramientas de software (en este caso particular se utiliza la plataforma de Matlab & Simulink) y las premisas para la elaboración de modelos matemáticos, se presentan algunos ejemplos prácticos enfocados en la Ingeniería Automotriz.

Modelado y simulación del sistema de suspensión

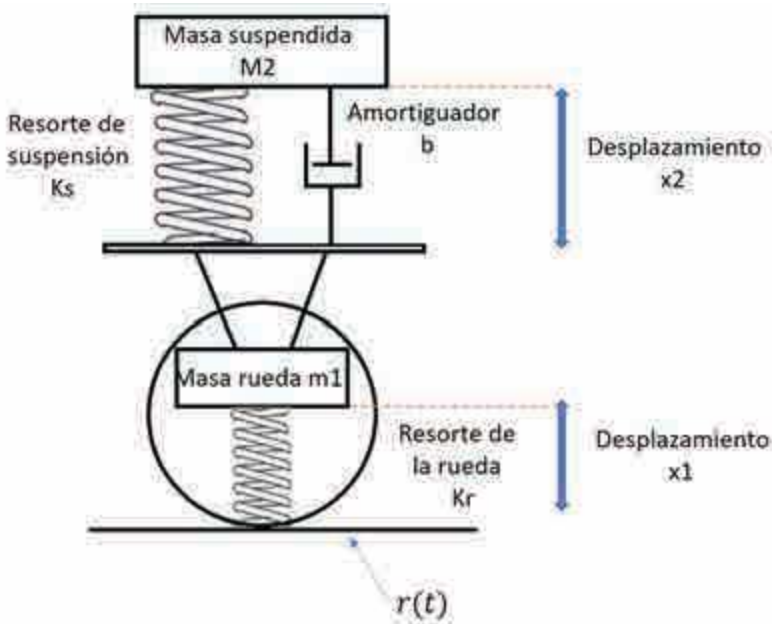
El sistema de suspensión de un vehículo común es considerado como el conjunto de elementos que unen el chasis de un automóvil con la superficie rodante o calzada y tiene como misión mantener el contacto entre la rueda y el suelo, la absorción de fuerzas para mantener un mayor control del vehículo y la comodidad de los ocupantes (Turakhia & Modi, 2016).

La suspensión está constituida como se muestra en la Figura 4:

- Masa suspendida, elementos soportados por el chasis representada por M2
- Masa no suspendida, demás elementos en contacto con el suelo como; rueda disco de freno etc., esta masa está represada por m1.

Figura 4

Esquema general de un sistema de suspensión de cuarto de vehículo



Fuente: Autor

Según lo mostrado en la Figura 4, se puede considerar aplicar las leyes físicas de los elementos y plantear una ecuación por cada masa existente en el esquema. En este caso se aplica un análisis de cuerpo libre para cada masa, dando como resultado las ecuaciones (5) y (6) que describen matemáticamente el sistema de suspensión.

$$M2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{d(x_2 - x_1)}{dt} + Ks(x_2 - x_1) = 0 \quad 5$$

$$m1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{bdx_1}{dt} + x_1(ks-kr) - \frac{bdx_2}{dt} - ksx_2 = kr \quad 6$$

Para obtener un modelo que describa el sistema como se muestra en la Figura 3, se aplica la representación de estados descrito en (7)

$$\dot{X} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad 7$$

El sistema queda finalmente descrito como se detalla en (8).

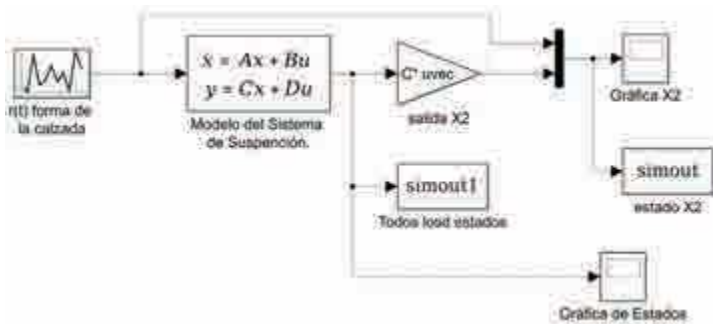
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_1}{M_2} & \frac{-b}{M_2} & \frac{k_1}{M_2} & \frac{b}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{b}{m_1} & \frac{-(k_1+k_2)}{m_1} & \frac{-b}{m_1} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_2}{m_1} \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad 8$$

Esta representación de espacio de estados puede ser implementado en Matlab & Simulink dando como resultado un esquema como se muestra en la figura 5. Los parámetros de simulación son:

- $m_1=64.53 \text{ kg}$
- $m_2=13.51 \text{ kg}$
- $b=1962$ (constante del amortiguador)
- $k_s=16875$ (constante de elasticidad del resorte)
- $k_r=120310$ (constante de elasticidad de la rueda)

Figura 5

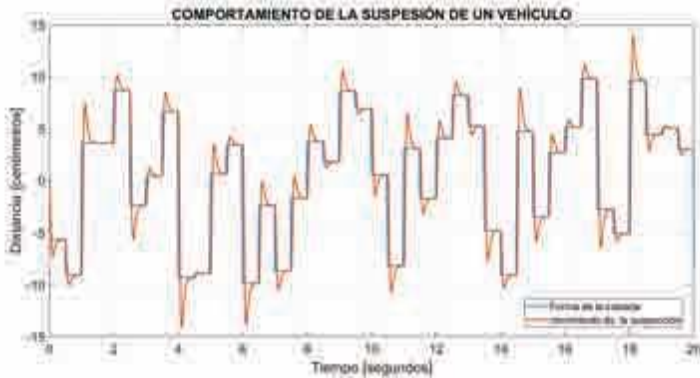
Modelo de suspensión implementado en Matlab & Simulink



Fuente: Autor

Si se aplica una forma de calzada irregular en la entrada del sistema de suspensión su resultado puede apreciarse en la Figura 6, donde se observa que por cada cambio en la forma de la calzada en movimiento de la suspensión tiene correspondencia al comportamiento real de un vehículo, es decir, la suspensión reacciona suavemente ante un cambio drástico en la forma de la calzada.

Figura 6
Respuesta del sistema ante una forma de calzada irregular



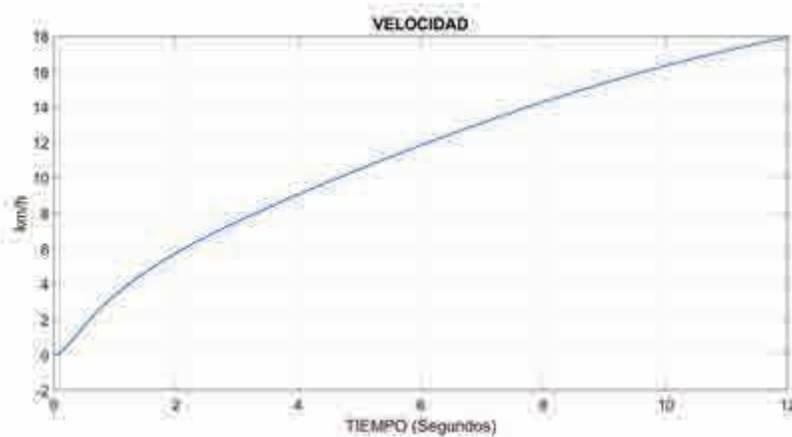
Fuente: Autor

El uso del modelo matemático y su simulación en este sistema de suspensión, abre las posibilidades para un estudio de la dinámica al inicio y durante un diseño.

Simulación del sistema de movimiento de vehículo

Para la simulación de este sistema se ha aplicado el concepto de separabilidad descrito en la sección 3, donde el sistema de movimiento vehículo se lo ha dividido en varios subsistemas capaces de conectarse entre sí, para formar un solo sistema complejo y comprensible como se muestra en la Figura 7.

Figura 9
Curva de consumo de combustible del sistema completo
para el movimiento de vehículo

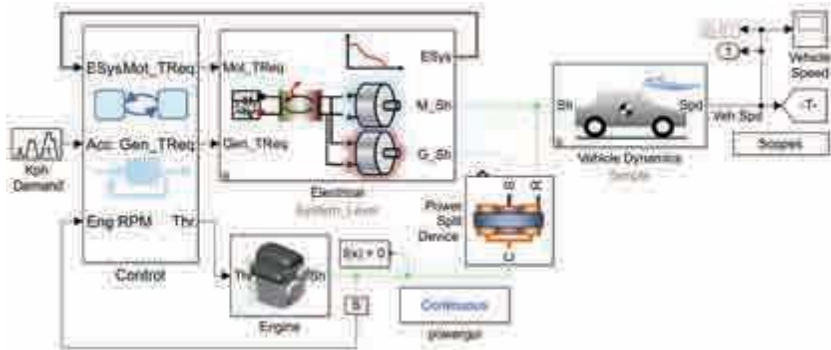


Fuente: Autor

Simulación del sistema de vehículo híbrido

Este ejemplo se presenta desde una simulación desarrollada por (Miller, 2017), el sistema representa un sistema mucho más complejo y elaborado. Contiene un modelo (Figura 10) de vehículo híbrido construido con Simscape, Simscape Electronics, Simscape Driveline y Simscape Power Systems (herramientas de embebidas en Matlab&Simulink), en las que se puede configurar para pruebas de alto nivel del sistema o análisis de calidad de energía.

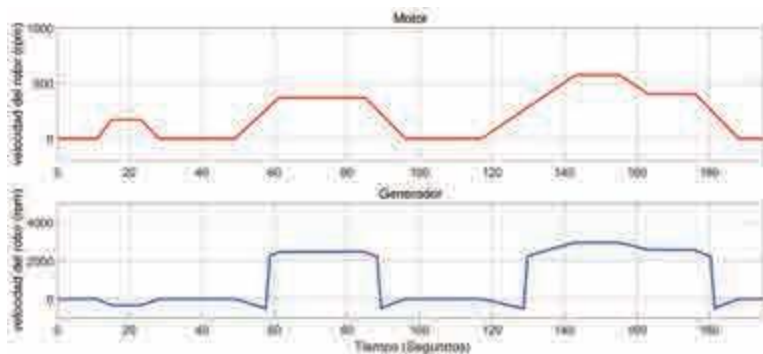
Figura 10



Fuente: Autor

De la misma forma que en el caso de la velocidad del vehículo, se puede obtener varios parámetros del comportamiento global del sistema. Los datos presentados en la figura 11 muestra la evolución de las velocidades del motor y generador eléctrico del sistema híbrido ante una demanda de velocidad en el vehículo.

Figura 11



Fuente: Autor

Conclusiones y recomendaciones

En este documento se presentaron algunos ejemplos en donde se utiliza recomendaciones durante el modelado matemático y la simulación en el campo automotriz, donde, para el caso del sistema de suspensión de cuarto de vehículo no se ha considerado la masa de resorte y tampoco la del amortiguador por ser valores pequeños en referencia a la masa del vehículo. Sin embargo, si se requiera de mayor exactitud, se debe considerar esta característica, y adicionalmente aspectos como: ángulo de inclinación de la rueda, barras estabilizadoras etc.

Durante el proceso de modelo matemático se debe tomar en cuenta el grado de precisión que se requiere, determinar las variables con mayor incidencia en el proceso y descartar la que no tenga gran significado. El modelo matemático del sistema físico debe establecer un “equilibrio” entre exacto y complicado, ya que esto implica también el costo computacional que se demandarán a los simuladores, en este caso Matlab & Simulink.

Referencias bibliográficas

- Bekey, G. A. (1977). Models and Reality. En: G. A. Bekey, *Modeling and Simulation: Theory and Practice* (pp. 59-60). Los Ángeles: Springer.
- Brito, M. L., Alemán, I., & Fraga, E. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 129-139.
- Gao, D. W., Mi, C., & Emadi, A. (2007). Modeling and Simulation of. *IEEE Xplore*, 729-745.
- Mathematical Modeling and Computer (2010). En: B. J. Kogan, *Introduction to Computacional Mathematical Modeling and Computer Simulation* (pp. 11-15). US: Springer.
- Miller, S. (2017, Octubre 12). *Mathworks*. Recuperado de Mathworks: <https://goo.gl/8jkgrL> (febrero 16, 2018).
- Mohd, T., Hassan, M., & Aziz, W. A. (2015). Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 1312-1320.

- Pawlus, W., Nielsen, J. E., Karimi, H. R., & Robbersmyr, K. G. (2010). Mathematical modeling and analysis of a vehicle crash. *Proceedings of the 4th conference on European computing conference* (pp. 194-199). European computing conference.
- Salett Biembengut, M. (2004). *Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática*. México: Santillana.
- Singh, V. (2009). Modeling and Simulation. En: V. Singh, *System Modeling and Simulation* (pp. 9-25). New Delhi: One World.
- Turakhia, T. P., & Modi, M. J. (2016). Mathematical Modeling and Simulation of a Simple Quarter Car Vibration Model. *International Journal for Scientific Research & Development*, 448-450.
- Valladolid, J. (2017). Diseño e implementación de un controlador de presión de un motor otto utilizando realimentación de estados. En: J. Valladolid, *Desarrollo tecnológico en Ingeniería Automotriz* (pp. 37-56). Quito: Abya-Yala.

Diseño y simulación de un atenuador de impactos para vehículo de turismo

Renato Fierro J.¹

Adrián Sigüenza R.²

Juan Diego Jara³

Resumen

En el año 2017 en Ecuador se han producido 28 967 accidentes (Tránsito, 2018), que representan altos índices de siniestralidad en las carreteras, y han hecho despertar la conciencia de los fabricantes de automóviles que no cesan de incorporar nuevas tecnologías con el fin de hacer más seguro y confortable el vehículo, todo ello, con el fin de garantizar la máxima protección de los ocupantes. Sin embargo, al considerar uno de los principales elementos de ensamblaje de la carrocería, como es el travesaño delantero que sirve como elemento atenuador de impactos, es claro notar que no existe un estudio conciso sobre las condiciones que puede soportar uno de los tipos de autos más vendidos en el mercado ecuatoriano como es el modelo de turismo compacto. El propósito de este proyecto es diseñar un prototipo de Atenuador de Impactos considerando diferentes diseños y materiales el cual tenga mejores condiciones en cuanto a desempeño al momento de un impacto frontal en comparación con el diseño de atenuador actual. En el proceso se plantea algunas alternativas en cuanto al diseño del prototipo de atenuador, con el objetivo de disminuir el peso del prototipo y costos. Se compararon algunos parámetros y se determinó el modelo más adecuado a los requerimientos de seguridad de los ocupantes dentro del habitáculo del vehículo, así como también se procedió a levantar geometrías de los tres modelos propuestos basándose en estudios y cálculos cinemáticos, así como de un software que utiliza el método de elementos finitos para evaluar el diseño del mecanismo de atenuador más

- 1 Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería. Ingeniero Mecánico. Director de Carrera de Ingeniería Automotriz. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil-Ecuador. pfierro@ups.edu.ec
- 2 Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente e Investigador del grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. asiguenza@ups.edu.ec
- 3 Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería. Ingeniero Electrónico. Docente e Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEI). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. jjaras@ups.edu.ec

adecuado. El modelo con las mejores prestaciones resultó ser el de material de Policarbonato con el modelo de atenuador diseñado en la geometría número uno.

Palabras clave

Barra frontal, elementos finitos, atenuador de impactos, simulación.

Abstract

The high accident rates in the highways have made awakening the consciousness, of automobiles fabricants that do not stop to add new technologies, aimed to make more comfortable and safe the cars they are producing. All of this actions, tent to warranty, as far as possible, the highest safety and protection for passengers inside cars. Despite of this facts, research studies about the front crossbar, which is one of the main elements of car assembling, are still limited; including the research of this element in the model tourism compact, one of the most popular car in the Ecuadorian Vehicle market, which is produced by Chevrolet in the country. The goal of this research was to design a cushion prototype of collisions, using different kind of designs and material, for improving resistance in frontal crashes. The project settled different alternatives for making a design that could decrease the weight and costs of efficient prototypes. Different parameters were considerate for settling the most adequate model for safety of passengers inside the cabin and the vehicle, it was done with the determination of geometry of three different tentative models, with the support of experimental studies, as well as cinematic calculation with the use of a specialized software that use finite elements for evaluating the mechanic of cushion. The model with the best benefits for this purpose was one, done with polycarbonate material, designed with accurate geometry.

Keywords

Front crossbar, finite elements, impact attenuator, simulation.

Introducción

El incremento de las velocidades de desplazamiento en el trabajo de los vehículos y la segunda guerra mundial, dieron paso a la primera era de la seguridad pasiva, el ingeniero húngaro Bela Barenyi a través de su concepto de habitáculo indeformable dio a conocer una estructura diseñada para absorber la energía del impacto (atenuador de impactos), en donde, el chasis debe contar con un espacio de alta rigidez —idealmente, indeformable—la célula de supervivencia, rodeado de estructuras menos rígidas: las zonas de deformación programada. En 1951 el vehículo Mercedes Benz 220 incorpora el primer atenuador de impactos conocido como el habitáculo de seguridad (International, 2013), a partir de este momento los dispositivos atenuadores de impacto han tenido gran importancia en lo que respecta a salvar vidas. En Ecuador considerando normas de fabricación para dispositivos de seguridad de

vehículos como ISO 26262; en la Universidad Politécnica Salesiana se han realizado diseños y fabricación del atenuador de impactos en un vehículo monoplaza para la fórmula Student (International, 2013; Luna, Pucha, & Valencia, 2013) que van dirigidos a la célula de supervivencia. La simulación de varias geometrías planteadas y materiales propuestos mediante un software matemático en el que se apliquen las cargas estimadas en un impacto frontal permitirá predecir la opción más apta para absorber impactos, a un bajo costo, pero sobre todo evitar pérdidas humanas en un erróneo proceso prueba fallo.

Existe una revisión bibliográfica del diseño y análisis de comportamiento de atenuador de impacto durante un accidente, que compila los diferentes estudios de 2000 a 2015, denominado Diseño y análisis de Atenuador de impacto: Revisión (Agrawal Naman, 2015). En cada uno de ellos se analizan diferentes geometrías y materiales mediante técnicas de elementos finitos y pruebas de métodos experimentales aplicadas; abarcando estudios de: pruebas experimentales, pruebas de simulación y de comparación de las dos técnicas.

El desarrollo y costos de pruebas de los nuevos diseños de atenuadores puede reducirse utilizando simulaciones computacionales. El grado de seguridad de un vehículo puede ser determinado mediante simulaciones (Mayank, & Ved 2014); el análisis por elementos finitos es una herramienta útil para determinar el comportamiento de deformaciones en atenuadores de impacto (Velea, & Lache, 2013).

El investigador Williams indagó la deformación por impacto de la parte frontal de un vehículo deportivo. Se detallan simulaciones llevadas a cabo usando elementos finitos para replicar la prueba de la barrera frontal (atenuador de impacto) a través del método de código Oasys LS-DYNA3D para análisis de elementos finitos (Williams, de Pennington, & Barten, 2000). Permite comprender un evento de impacto de manera general, así como las contribuciones individuales de sus componentes. El resultado es una excelente correlación entre las pruebas y los resultados de simulación.

Por su parte Further Zarei Hamidreza diseña un óptimo amortiguador de impacto involucrando pruebas de choque experimentales:

axiales y oblicuas en los tubos ensamblados tipo panel. Las correlaciones son llevadas a cabo con LS-DYNA con resultados satisfactorios (Zarei, & Kröger, 2006). Técnicas de optimización Multidiseño (MDO) han sido aplicadas para maximizar la absorción de energía de los tubos (cuadrados, rectangulares o redondos). En los diferentes ensayos con variaciones de velocidad y ángulo de la carga se obtuvieron picos de carga de hasta 80 k y cargas medias hasta de 41 kN

Planteamiento del problema

En el Ecuador en el año 2018 hasta marzo, se han reportado por parte de la agencia nacional de tránsito ANT, 6164 siniestros, de los cuales 827 son de estrellamiento y 341 son choques frontales (Tránsito, 2018); en la mayor parte de estos siniestros se generan deformaciones en los atenuadores de impacto frontales de los vehículos, sobre los cuales se efectúan actividades de mantenimiento correctivo, no enfocadas al recambio, por factores económicos de los usuarios, quienes enfocan el mantenimiento a la restauración del dispositivo sin considera el factor seguridad que se ve disminuido de forma crítica en esta acción.

Análisis de restricciones y alternativas de diseño

Restricciones

La implementación del mecanismo planteado debe ser instalado considerando la estructura (compacto) del vehículo, es decir los soportes originales donde se sostiene el atenuador original. Los materiales que den las mejores prestaciones de seguridad, según la simulación realizada, deben de ser en lo posible de fabricantes dentro del país o en su defecto en países que mantengan convenios con el estado ecuatoriano para la importación de los mismos.

En la Tabla 1, se describen los factores considerados como restricciones:

Tabla 1
Factores considerados para restricciones de cálculos

Factor	Descripción	Consideración
Material	Materiales disponibles en el mercado nacional	Aluminio
		Polycarbonato
		Fibra de vidrio
		Poliestireno
		Fibra de Carbono
		Poliuretano
E_{abs}	Energía cinética de absorción (J)	
M	Masa total del vehículo (Kg)	
V	Velocidad inicial antes del impacto (m/s)	
F	Fuerza máxima de impacto	$F=12 \cdot g \cdot m$ (Considerados en prueba de impacto)
A	Aceleración Media(m/s^2), ($80m/s^2$)	Considerando que el vehículo se encuentra a 80 m en 1 segundo.
V_o	velocidad inicial de partida del vehículo (m/s)	
V_f	velocidad inicial de impacto (m/s)	
D	distancia (cm)	
T	Tiempo de deformación	

Fuente: Los autores

Alternativas de diseño

Para la fabricación de atenuadores de impacto el material de fabricación es muy importante, el mismo debe considerar un conjunto de normas y exigencias de fabricación representadas en la figura 1:

Figura 1
Requerimientos para la fabricación de un atenuador de impactos



Fuente: Luna, Pucha, &Valencia (2013).

Considerando los requerimientos necesarios para un atenuador, se definen las alternativas de solución, en función a los materiales de fabricación, las cuales son:

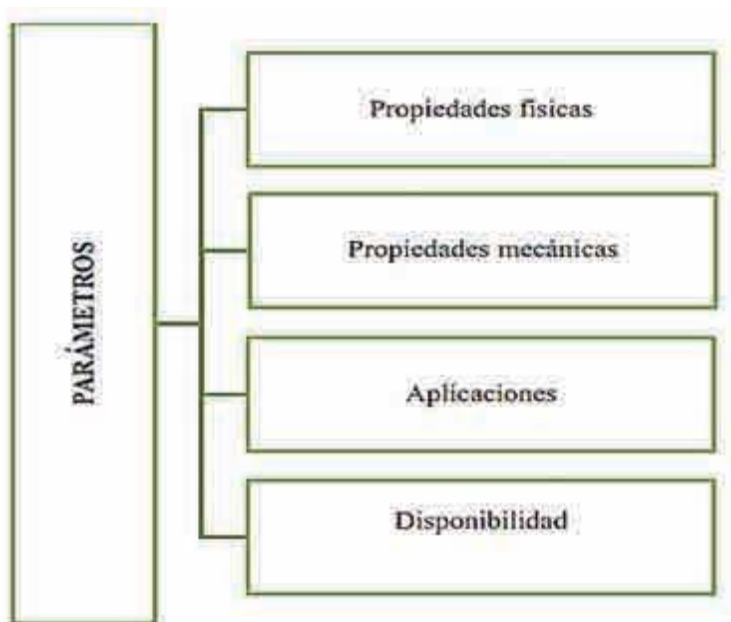
Opción 1: atenuador con base de fabricación en aluminio, con optimización de la estructura

Opción 2: atenuador con base de fabricación en policarbonato, con optimización de la estructura

Opción 3: atenuador con base de fabricación en fibra de carbono, con optimización de la estructura.

En nuestro medio existen materiales que se pueden utilizar para el desarrollo del atenuador de impactos como el aluminio, la balsa, fibra de vidrio, policarbonato, fibra de carbono, etc. Los cuales deben presentar una resistencia coherente con los requerimientos y exigencias dadas por las normas internacionales de fabricación. Para la elección del material, las fábricas realizan análisis de parámetros cruciales para la elección y estudio del diseño de nuevos guardachoques o atenuadores de impacto, los cuales se muestran en la Figura 2.

Figura 2
Parámetros de selección



Fuente: Los autores

Para determinar una alternativa de solución en el rediseño de una atenuador de impactos, se realiza un análisis de características de los diferentes materiales existentes en el mercado, generando una tabla de valoración a cada una de ellas, donde el valor de 1 representa la calificación más baja y 5 la más alta en cuanto a Dureza (D), Resistencia a la Tracción (RT), Resistencia a la compresión (RC), Peso (P), Elasticidad (E) y Costo (C) como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2
Análisis de alternativas de solución

	D	RT	RC	P	E	C	Total
Aluminio	3	3	4	1	4	4	19
Polycarbonato	3	2	3	4	3	3	18
Fibra de Carbono	3	5	4	4	1	5	22

Fuente: Los autores

Al concluir el análisis de los materiales propuestos, tomando en cuenta las características analizadas, y tomando en cuenta los requerimientos que debe poseer el atenuador de soporte de impacto se observa que entre los más económicos y fiables para una producción en serie es el aluminio. Sin embargo, se realizarán los análisis pertinentes que nos llevarán a discernir mediante el análisis del comportamiento del vehículo a un impacto frontal con cada estructura y material de atenuador.

Análisis estructural

Se plantean tres modelos estructurales basados en el atenuador de impactos original del vehículo, cuyo modelo de atenuador se muestra en la figura 3:

Desarrollo de geometrías

Considerando la norma europea UNE-EN 1317 del comité europeo de normalización (UNE, 2012), donde hace referencia a los sistemas

viales de contención de vehículos. la norma determina los niveles de protección de cualquier barrera para garantizar la seguridad de una persona en caso de impacto con la misma, dicho documento regula tanto las condiciones que han de darse en la ejecución del ensayo como los resultados que han de obtenerse a partir de él. En esta norma se implantan algunos criterios de valoración dentro de los cuales nos hemos basado en: “severidad del impacto: medida de las consecuencias del impacto en los ocupantes del vehículo. se utilizan tres parámetros: el índice de severidad de la aceleración (ASI), la velocidad teórica de choque de la cabeza (THIV) y la deceleración de la cabeza tras el choque (PHD)”. De entre todos los criterios y parámetros mencionados anteriormente, en este proyecto se ha tenido en cuenta el cálculo del ASI (Acceleration Severity Index) debido a que únicamente se utiliza la aceleración del vehículo. Para el cálculo del ASI se asume intrínsecamente que el ocupante está continuamente en contacto con el vehículo, lo cual se logra, por regla general, a través del uso del cinturón de seguridad. Por tanto, el valor del ASI aporta una medida de la severidad de la colisión que se asume proporcional al riesgo de los ocupantes (Luna, Pucha, & Valencia, 2013).

Figura 3
Imagen representativa del atenuador de impactos original



Fuente: Los autores

Análisis cinemáticos

La energía de absorción se calcula mediante la Eq. (1) (Serway, 2007):

$$E_{abs} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1)$$

En donde

E_{abs} = Energía cinética de absorción (J)

m = Masa total del vehículo (Kg)

v = Velocidad inicial antes del impacto ($\frac{m}{s}$)

Entonces considerando una masa del vehículo de 750 Kg y una masa promedio del conductor de 100 Kg se obtiene una masa total de 850 Kg.

Considerando entonces una velocidad de 100 Km/h y su equivalente a $27,7 (\frac{m}{s})$, y reemplazando en (1) los valores de masa total y velocidad se obtiene:

$$E_{abs} = \frac{1}{2} * 850 * 27,7^2 = 327.92 \text{ KJ}$$

La fuerza máxima de impacto se calcula mediante la segunda Ley de Newton, Eq.(2) (Serway, 2007):

$$F = m * a \quad (2)$$

En donde:

F = Fuerza máxima de absorción de impacto (N)

m = masa total del vehículo (Kg)

a = aceleración media dada por la norma (m/s^2)($80 * 9.807(m/s^2)$).
(Luna, Pucha y Valencia, 2013) (UNE, 2012)

Por tanto, para los cálculos de la fuerza máxima del atenuador se tiene:

$$F = 850 \text{ Kg} * 80 * 9,807 \frac{m}{s^2} = 666.9 \text{ KN} \quad (2)$$

Para determinar la deformación mínima del atenuador se utiliza las formulas del Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado Eq.(3) [6]:

$$Vo^2 = Vf^2 - 2 * a * d \quad (3)$$

En donde:

Vo = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s)

Vf = velocidad inicial de impacto (m/s)

a = aceleración media

d = distancia (cm)

Despejando de [3] la distancia, se obtiene el valor mínimo en donde empieza la deformación del material, entonces en base a las siguientes consideraciones:

$$Vo = 0 \frac{m}{s} ; Vf = 27,7 \frac{m}{s} ; a = 9,807 \frac{m}{s^2}$$

Despejando “d” de Eq. (3) se obtiene Eq. (4), y reemplazamos los datos anteriores se obtiene:

$$d = \frac{Vf^2 - Vo^2}{2 * a} \quad (4)$$

$$d = \frac{\left(27,7 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 80 * 9,807 \frac{m}{s^2}} \quad d = 48.89 \text{ cm}$$

Para encontrar el tiempo de deformación se utiliza las fórmulas para el movimiento rectilíneo uniformemente variado Eq. (5) (Serway, 2007), teniendo así:

$$d = Vo * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (5)$$

En donde:

Vo = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s)

Vf = velocidad inicial de impacto (m/s)

a = aceleración media

d = distancia (m)

t = tiempo

Considerando la Eq. (6) (Serway, 2007)

$$V_f = V_o + a*t \quad (6)$$

En donde:

V_o = velocidad inicial de partida del vehículo (m/s)

V_f = velocidad inicial de impacto (m/s)

a = aceleración media

t = tiempo(s)

Considerando que un vehículo parte del reposo, la velocidad inicial es nula y por ende las fórmulas del movimiento generado se obtiene:

$$V_f = a*t \quad (7)$$

$$d = \frac{1}{2} * a*t^2 \quad (8)$$

Despejando de la Eq.(7) la aceleración y sustituyendo en la Eq. (8) se obtiene la Eq. (9).

$$t = \frac{2*d}{V_f} \quad (9)$$

Por tanto, reemplazando los resultados anteriores se obtiene:

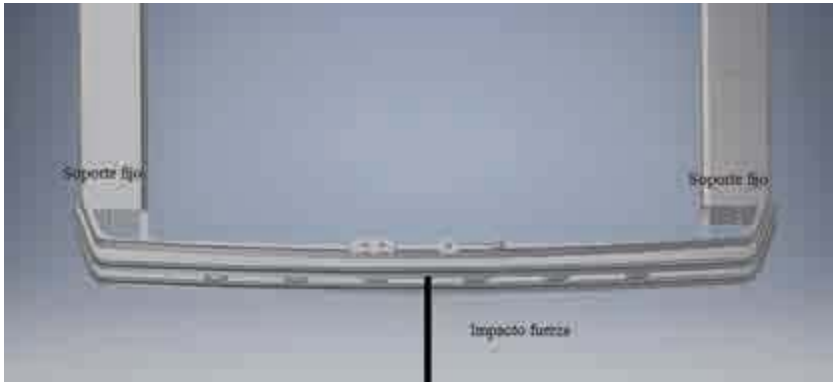
$$t = \frac{2*0,07084}{27,7} = 0.00511 \text{ seg.}$$

Simulaciones

Simulación dinámica

Lo primero es realizar un levantamiento preliminar de lo que son las dimensiones, geometrías, restricciones y fuerzas de trabajo de los modelos o mecanismos planteados; para esta primera etapa se hizo uso del programa Inventor y Workbench para el análisis, obteniendo las siguientes geometrías, desplazamientos y fuerzas involucradas. En la figura 4 se muestran las cargas y restricciones.

Figura 4
Consideraciones de análisis. Carga y restricciones



Fuente: Los autores

Levantamiento de geometrías

Haciendo uso del programa Inventor se procede a levantar las geometrías de los diseños considerando los detalles geométricos y funcionales de acuerdo a los requerimientos del análisis que se refiere, mostrados en la Figura 5:

Figura 5
Geometrías realizadas en Autodesk-Inventor



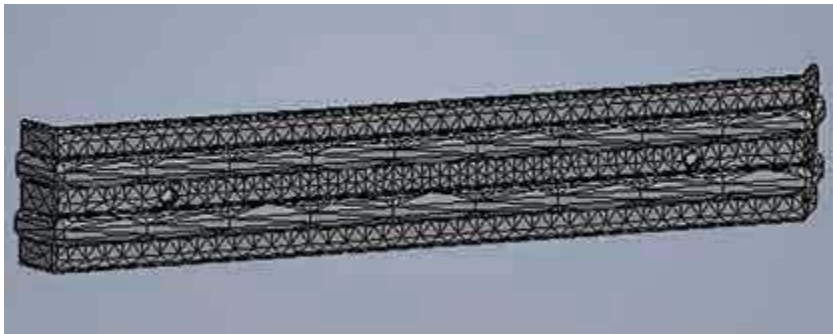
Fuente: Los Autores

Análisis en ANSYS-Workbench

MALLADO

Considerando que en las simulaciones realizadas se analizaron tres tipos de geometrías cada una con material de Aluminio, Fibra de Carbono y Policarbonato, y evaluando tres posiciones de posible aplicación de la fuerza denominadas como Superior, Intermedia y Media.

Figura 6
Ejemplo de mallado para Geometría 1
con 193229 Nodos y 97260 elementos



Fuente: Los autores

La topología del elemento se dispone en automática, de modo que cubra de la mejor forma la geometría.

Al aplicar técnicas de pre y pos procesamiento a través de una plataforma CAE (ANSYS WORKBENCH), de las diferentes condiciones de: diseño de geometría, material y posición de carga, se obtiene la siguiente Tabla 3 donde se presenta un resumen de corridas experimentales en forma aleatoria.

Tabla 3
 Resumen de resultados de simulaciones
 de comportamiento atenuador de impactos en CAE

Material	Geometría	Posición Fuerza	No. Nodos	No. Elementos	Deformación max total(M)	Esfuerzo equivalente max (Pa)	Error estructural Max (J)	Fs	
								Max	Min
Policarbonato	1	Superior	193229	97260	1.19E-02	23.3E+6	1.97E-02	15	12.02
		Intermedia	193618	97409	9.74E-03	15.8E+6	1.67E-02	15	15
		Media	193490	97417	8.11E-03	19.4E+6	7.88E-03	15	14.42
	2	Superior	323445	160332	1.22E-02	28.3E+6	2.47E-02	15	9.883
		Intermedia	323445	160332	9.88E-03	20.4E+6	1.57E-02	15	13.72
		Media	323316	160264	5.57E-03	9.7E+6	1.01E-02	15	15
	3	Superior	444512	222742	1.13E-02	18.5E+6	1.15E-02	15	15
		Intermedia	444512	222742	1.02E-02	15.9E+6	1.27E-02	15	15
		Media	444512	222742	8.42E-03	16.3E+6	2.07E-02	15	15
Fibra de Carbono	1	Superior	193229	97260	1.14E-04	23.0E+6	1.84E-04	15	12.2
		Intermedia	193618	97409	9.33E-05	15.8E+6	1.62E-04	15	15
		Media	193841	97622	7.72E-05	18.6E+6	7.79E-04	15	15

Fibra de Carbono	2	Superior	323445	160332	1.48E-04	27.9E+6	2.81E-04	15	10.04
		Intermedia	323445	160332	1.19E-04	19.9E+6	1.98E-04	15	14.07
		Media	323342	160261	6.70E-05	10.3E+6	6.55E-05	15	15
	3	Superior	444512	222742	1.36E-04	17.8E+6	1.87E-04	15	15
		Intermedia	444512	222742	1.23E-04	15.2E+6	1.60E-04	15	15
		Media	444512	222742	1.01E-04	15.8E+6	2.44E-04	15	15
	1	Superior	193229	97260	4.66E-04	23.0E+6	7.53E-04	15	12.2
		Intermedia	193618	97409	3.81E-04	15.8E+6	6.62E-04	15	15
		Media	194227	97823	3.15E-04	18.6E+6	3.18E-04	15	15
Aluminio	2	Superior	323445	160332	4.81E-04	27.9E+6	9.12E-04	15	10.04
		Intermedia	323445	160332	3.86E-04	19.9E+6	6.42E-04	15	14.07
		Media	1581711	821095	2.19E-04	21.3E+6	4.80E-05	15	13.15
	3	Superior	444512	222742	4.42E-04	17.8E+6	6.06E-04	15	15
		Intermedia	444512	222742	3.99E-04	15.2E+6	5.17E-04	15	15
		Media	444512	222742	3.27E-04	15.8E+6	7.91E-04	15	15

Fuente: Los autores

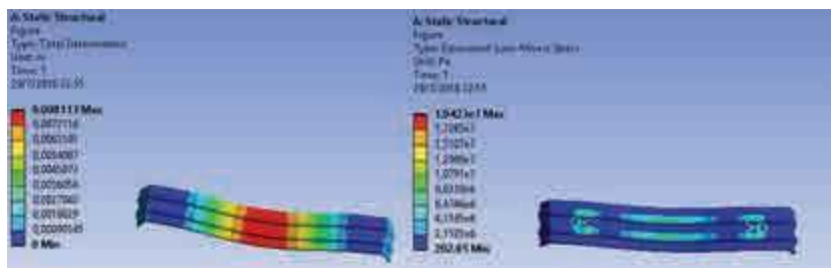
RESTRICCIONES

El atenuador de impactos se sujetará en la realidad a los mismos soportes en el chasis-compacto del vehículo que se sujetará mediante pernos. las restricciones se realizan colocando soportes fijos en los puntos donde irán sujetos al compacto. Para el análisis se ha considerado un porcentaje equivalente al 1% de carga aplicada, debido a que se encuentra dentro de la zona elástica del comportamiento de todos los materiales.

DEFORMACIONES

Al realizar la simulación se puede verificar que la estructura se deforma como era de esperarse considerando el impacto frontal como se observa en la Figura 7, donde se muestra la deformación y Esfuerzo equivalente (von-Mises).

Figura 7
Deformación y esfuerzo equivalente luego de impacto frontal en Geometría: 1, Fuerza: Media, Material: Policarbonato.



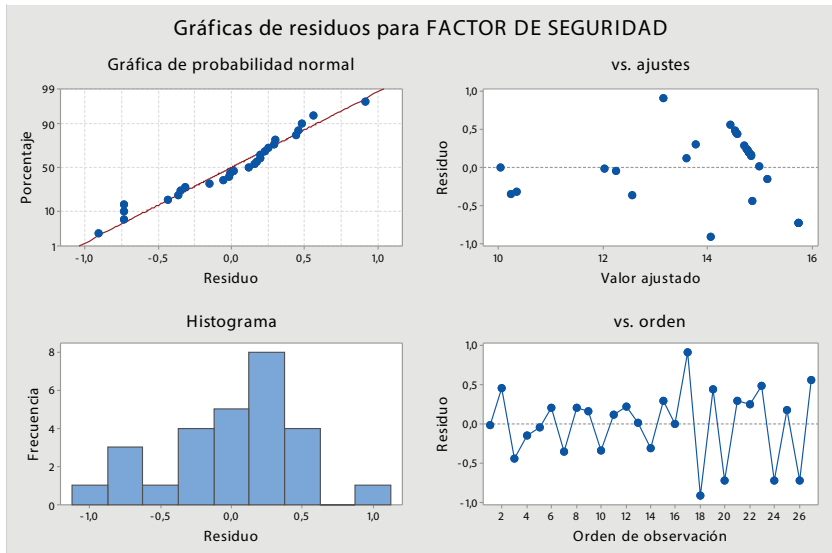
Fuente: Los autores

4.3 Análisis de resultados

Se realiza un análisis de los resultados con la ayuda de un software estadístico (MINITAB), que permite determinar el factor de deformaciones a través de la regresión de superficie de respuesta de: deforma-

ción, esfuerzo, error estructural y factor de seguridad vs. Posición de la carga, material y geometría. El análisis de varianza y gráfica de residuos determina interacciones de las variables de estudio para deformaciones y factor de seguridad que presentan comportamientos normales como se muestra en la Figura 8; podemos determinar un 95% de efectividad del análisis. En la revisión de graficas de efectividad de deformaciones y materiales se determina un cruce en 60% para posición de la fuerza; a fin de limitar el número de materiales, se considera el análisis de interacciones del factor de seguridad, determinando como material recomendable policarbonato en geometría tipo 1, cuyo comportamiento se describe en la Tabla 4.

Figura 8
Interacciones de variables de estudio
para deformaciones y factor de seguridad





Fuente: Los autores

Tabla 4
Resultados de comportamiento de Policarbonato en geometría 1

COMPORTAMIENTO ESTATICO DE POLICARBONATO EN GEOMETRIA 1. MATERIAL RECOMENDADO							
Posición fuerza	No. Nodos	No. Elementos	Deformación max total(m)	Esfuerzo equivalente max (pa)	Error es- tructural max (j)	Fs	
						Max	Min
Superior (0.750)	193229	97260	1,19E-02	23,3E+6	1,97E-02	15	12,02
Intermedia (0.375)	193618	97409	9,74E-03	15,8E+6	1,67E-02	15	15
Media (0.00)	193490	97417	8,11E-03	19,4E+6	7,88E-03	15	14,42

Fuente: Los autores

Conclusiones

La geometría que cumple con las mejores especificaciones durante los análisis de comportamiento estático es la Geometría número uno

de material en Policarbonato con un punto de aplicación central de la fuerza que es el que nos da un factor de seguridad recomendable.

La variación en la consideración del porcentaje de carga aplicada incide en las deformaciones, mas no permite la convergencia de esfuerzos por lo que se considera el 10% de la carga a fin de garantizar convergencia de resultados, manteniendo condiciones dentro de la zona elástica de todos los materiales ensayados.

La distribución de fuerzas aplicadas no está relaciona con la distribución de esfuerzos, por lo que la geometría 1 representa la mejor solución, basados en el diseño más simple

La revisión y análisis de la convergencia de las deformaciones es una fase determinante para aproximación de resultados a un aspecto real de comportamiento.

El análisis del elemento de seguridad vehicular a través de la simulación CAD permite la optimización de recursos en fases de diseño e incrementar factores de variación del comportamiento del elemento.

Referencias bibliográficas

- Agrawal Naman, R. J. (Diciembre de 2015). Design and Analysis of Impact Attenuator: A Review. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2, 12. doi:2348-8360
- International, S. (2013). *SAE International*. Obtenido de 2013 FSAE Rules: <https://goo.gl/eFnNpU>
- Luna, J.L., Pucha, M.V., & Valencia, F.J. (2013).. *Diseño de un atenuador de impactos de un vehículo monoplace formula Student* (tesis de pregrado). Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Mayank, J., & Ved, A. (2014). Study and Design of Impact Attenuator for Passenger Vehicle. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4, 01-04.
- Serway, R. (2007). *Física, conceptos y aplicaciones*. Editorial McGraw Hill.

- Tránsito, A. N. (Marzo de 2018). *Agencia Nacional de Tránsito*. Recuperado de Estadísticas de transporte terrestre y seguridad vial: <https://goo.gl/tQUxMr>
- UNE (2012). Sistemas de contención para carreteras. Parte 5: Requisitos de producto y evaluación de la conformidad para sistemas de contención de vehículos. *UNE-EN 1317-5:2008+A2:2012*. España. Obtenido de AENOR.
- Velea, M., y Lache, S. (2013). Novel Impact Attenuator. *5th International Conference Computational Mechanics and Virtual Engineering*, (pp. 47-51). Brasov, Romania.
- Williams, T.D., de Pennington, A., & Barton, D.C. (2000). The frontal impact response of a space frame chassis sports car. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering UK*, 214, 865-873.
- Zarei H., & Kröger, M. (2006). *Optimum honeycomb filled crash absorber design*. Germany: University of Hannover.

Propuesta metodológica para el diseño del chasis de un kart tipo KF4

Wilmer Contreras¹

Pablo Quezada²

Lizzete Ortiz³

Resumen

En el presente artículo se realiza la explicación de una propuesta metodológica para el diseño del chasis de un Kart KF4, la cual se basa en un estudio que parte de la caracterización de los valores obtenidos del diseño y modelado mediante un software CAD y análisis FEM, siendo valores de: masa, centro de gravedad del prototipo, triangulación y geometría; los mismos que son seleccionados en función al mayor aporte de información, la cual contribuye a determinar el orden de las etapas del proceso de manufactura del chasis.

El análisis por FEM determina que los esfuerzos soportados por el chasis son admisibles y que están dentro de los parámetros de seguridad y diseño al obtener un factor de seguridad mínimo de 1,1. Se desarrolla la metodología en dos prototipos, el primero con 12,36° en el ángulo de avance y un segundo prototipo con 14,10° en el mismo ángulo. Se someten los dos prototipos a pruebas dinámicas de similares características y se obtiene como resultado que la diferencia de tiempo entre ambos modelos es de 2,709 s.

Palabras clave

Kart KF4, diseño tubular, chasis de un kart, triangulación, centro de gravedad.

Abstract

In the present article the explanation of a methodological proposal for the design of a KF4 Kart chassis is explained, which is based on a study that starts from the characterization of the values obtained from

-
- 1 Máster en Sistemas Automotrices, Ingeniero Mecánico Automotriz, docente e Investigador del grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. rcontreras@ups.edu.ec
 - 2 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador.
 - 3 Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador.

the design and modeling using CAD software and FEM analysis, being values of: mass, center of gravity of the prototype, triangulation and geometry; the same ones that are selected based on the greater contribution of information, which helps to determine the order of the stages of the manufacturing process of the chassis.

The analysis by FEM determines that the stresses supported by the chassis are admissible and that they are within the parameters of safety and design to obtain a minimum safety factor of 1.1. The methodology is developed in two prototypes, the first with 12.36° in the angle of advance and a second prototype with 14.10° in the same angle. The two prototypes are subjected to dynamic tests of similar characteristics and the result is that the time difference between both models is 2.709 s.

Keywords

Kart KF4, tubular design, a kart chassis, triangulation, center of gravity.

Introducción

Un Kart KF4, es un vehículo pequeño y ligero que generalmente se usa para competir; de cuatro ruedas sin suspensión o diferencial que están montadas sobre un chasis el cual es modificado en función a las exigencias de una competencia. Existen diferentes áreas en las que se pueden realizar modificaciones importantes al momento de caracterizar el chasis de un karting y distintas formas de evaluar el alcance de las mismas, por ejemplo, en el año 2006 en la universidad Calabria de Italia una investigación propone analizar diferentes tipos de estructuras tubulares, caracterizadas por una tasa específica de deformación, y que se somete a una metodología compuesta de procesos numéricos de modelado geométrico, análisis estructural y dinámico; el resultado de estos análisis permitió construir un modelo matemático FEM preciso que, una vez validado, ha demostrado una capacidad excelente para reproducir el comportamiento estructural del chasis (Muzzupappa, Ma-trangolo, & Vena, (2006). Otro aspecto utilizado para lograr resultados diferentes en la construcción del chasis de un Go-kart es modificar los materiales que se utilizan para su construcción, así lo demuestra una publicación de 2007 realizada por Biancolini, Cerrullo y Reccia; quienes utilizan revestimientos de carbono y núcleo nido de abeja de aluminio como alternativa al metal tradicional usado en el chasis. Los resultados muestran que se puede obtener valores similares de rigidez torsional

y margen de seguridad de la fuerza optimizando la laminación de las capas de carbono (Biancolini, Cerullo, & Reccia, 2007).

Por otro lado, en el año 2016 se propuso una innovación que aumenta el factor de seguridad diseñando un casquillo que es colocado en el paragolpes delantero del chasis; una prueba de colisión valora el aporte de esta alteración realizada al diseño original, puesto que el paragolpes absorbe el 20% de la energía de impacto total y el 80% restante de la energía se transfiere al casquillo (Padhi *et al.*, 2016).

Un parámetro poco considerado a la hora del diseño de la estructura de estos vehículos de competencia es el confort que pueden llegar a ofrecer a la persona que los conduce, pero por lo general el criterio más trascendental para realizar innovaciones ha sido el de mejorar la dinámica del vehículo durante las competencias; considerando esta realidad en el año 2015 investigadores del Instituto Politécnico Azlan Shah de Malasia, publican un estudio que se centra en el diseño de la estructura del chasis de un Go-kart, aplicando el método de Análisis de Elementos Finitos (AEF) en conjunto con un Análisis Modal Experimental (AME), para establecer la frecuencia natural que garantiza la comodidad y salud del piloto durante las competencias (Marzuki, Bakar, & Azmi, 2015). Con respecto al AEF una investigación realizada en el año 2016 sugiere un mallado con 35955 elementos y 70392 nodos, aplicados para un estudio de impacto frontal, lateral y posterior (Kiral Lal & Abhishek, 2016); en el mismo año un nuevo artículo plantea una malla con 154464 elementos y 77632 nodos que a más de los estudios de impacto, adiciona un análisis de torsión (Thakare, P., Mishra, R., Kannav, K., Vitalkar, N., Patil, S. & Malviya, 2016).

Más tarde en 2017, un nuevo artículo dirigido por investigadores del mismo país realiza una corrección del modelo de elementos finitos mediante el método de optimización de primer orden, con el propósito de reducir el porcentaje de error entre (AEF) y (AME) (Abdullah *et al.*, 2017); sobre el mismo tema, se indica que un trabajo desarrollado por el departamento de Ingeniería Mecánica de Mysore –India, concluye que a

través de la aplicación de AEF y AME se determinan las deformaciones máximas, factores de seguridad y su ubicación en el modelo de chasis lo que asegura la fiabilidad de la construcción (HD Patil, SS Bhange & AS Deshmukh, 2018). La metodología planteada a través de FEM y CAE, facilitan la construcción de este tipo de vehículos, sin la necesidad de disponer de tecnología avanzada y materiales de alta gama, obteniendo los parámetros deseados de triangulación, ángulo de caída, etc., consiguiendo un kart de competencia eficiente a bajo costo y ergonómico para el conductor.

Métodos y materiales

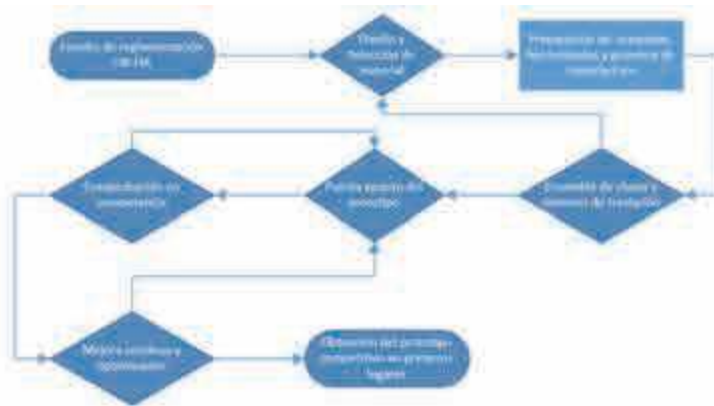
En la presente sección se desarrollan las temáticas principales que tienen que ver con la selección de los parámetros más representativos del diseño y modelado del chasis prototipo, así como la aplicación de la metodología general en la construcción de dos modelos, luego se describen los valores de las pruebas obtenidas de los monoplaza en pista y su posterior análisis.

Metodología general de la investigación

Una vez realizada la introducción y basado en su análisis, se plantea un Flujograma del proceso en el cual se establece el orden y desarrollo de las actividades concernientes al: diseño, análisis estructural y construcción, la comprobación en pista, la optimización y los resultados obtenidos al aplicar el proceso planteado, que se indica en la Figura 1.

En la primera etapa se realiza el análisis de la reglamentación de la Comisión Internacional de Karting (CIK) como también de la normativa publicada por la Federación Internacional de Automovilismo (FIA), de las cuales se extraen principalmente los lineamientos de seguridad y bases de construcción (Regional Rally Sporting Regulations, 2018; Karting Homologation Forms, 2018).

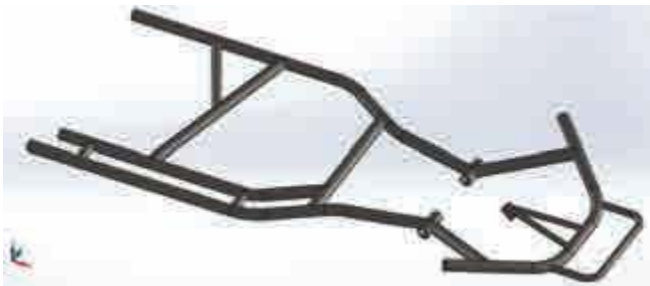
Figura 1
Formulación del proceso de construcción



Fuente: Los autores

En la segunda etapa y basados en la reglamentación se realiza un primer diseño, (ver figura 2), acorde a las exigencias de la competencia como son su peso mínimo y trazado, este último puede cambiar en función a la determinación de los organizadores del circuito y esta es una de las razones por las cuales el diseño debe ser optimizado (Regional Rally Sporting Regulations, 2018).

Figura 2
Primer modelo de chasis



Fuente: Los autores

Los puntos referentes al desarrollo practico de la metodología planteada se detallan en la sección 4.

Materiales

Los materiales que se describen en la tabla 1, corresponden a los que se obtienen del diseño CAD y que comercialmente se pueden conseguir.

Tabla 1
Materia prima para chasis

Descripción	Cantidad	Esfuerzo ultimo de tensión (Pa)	Densidad ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Limite elástico (Pa)	Módulo de Young (Pa)	Poisson
Tubo redondo 3/4"	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Tubo redondo 5/8"	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Tubo redondo 1"	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Tubo redondo 1 1/4"	2	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Plancha de acero de 1 mm, (50x50 cm)	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Plancha de acero de 2mm, (50x50 cm)	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3
Plancha de acero de 4mm, (50x50 cm)	1	4.6 E8	7850	2.5 E8	2 E11	0.3

Fuente: Los autores.

Desarrollo

Determinación del centro de gravedad

Se aplica la metodología mediante modelos de un software de diseño, el cual mediante su herramienta de propiedades físicas permite localizar el centro de gravedad de cada una de los elementos que integran el karting, posterior a esto se realiza un ensamble de todos los elementos ubicándolos en su lugar en el chasis; una vez hecho el ensamble, se aplica la herramienta del software para determinar las coordenadas del centro

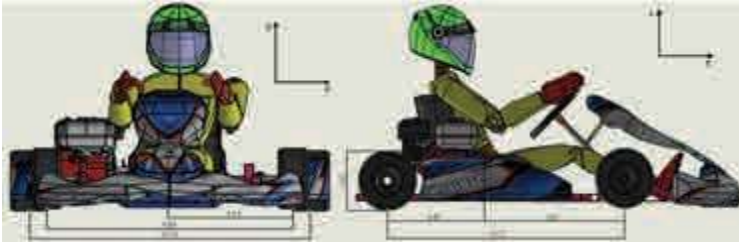
de gravedad del prototipo ensamblado (ver figura 3). Los componentes que han sido seleccionados para el cálculo del centro de gravedad son los más representativos y se listan en la tabla 2.

Tabla 2
Elementos considerados para determinar el centro de gravedad

Detalle	Peso real (kg)	% influencia
Piloto	70	51,58%
Motor	17,7	13,04%
Chasis	13	9,58%
Pernos	4,4	3,24%
Aros y neumáticos posteriores	4	2,95%
Pontones	3,4	2,51%
Asiento	2,9	2,14%
Aros y neumáticos delanteros	2,8	2,06%
Columna de dirección, volante y bieletas	2,2	1,62%
Barra posterior	2,1	1,55%
Eje	1,7	1,25%
Guarda choques laterales	1,4	1,03%
Bandeja de protección	1,2	0,88%
Manguetas	1,2	0,88%
Manzanas posteriores	1	0,74%
Rodamientos	1	0,74%
Porta rodamientos	0,8	0,59%
Conjunto de freno	0,8	0,59%
Porta catalina y catalina	0,7	0,52%
Barra superior del guardachoque frontal	0,7	0,52%
Pedales	0,6	0,44%
Cadena	0,5	0,37%
Babero	0,4	0,29%
Disco y porta disco	0,4	0,29%
Cables y fundas	0,4	0,29%
Soporte del asiento	0,2	0,15%
Soporte del babero	0,2	0,15%

Fuente: Los autores

Figura 3
Coordenadas del centro de gravedad del prototipo

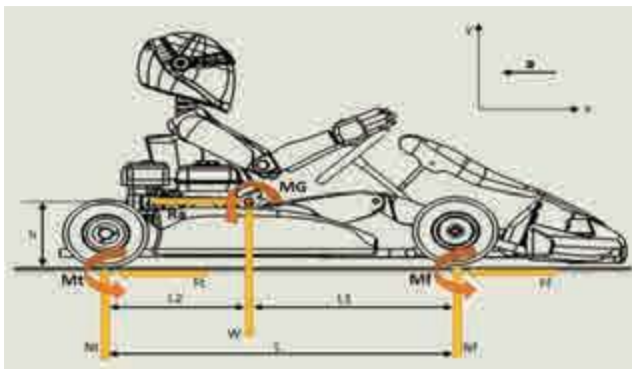


Fuente: Los autores.

Distribución de pesos

Para calcular la distribución del peso en cada eje, se considera al vehículo como un sólido rígido, con movimiento sobre un plano recto horizontal con una aceleración máxima de 0.8 G que depende el coeficiente de adherencia del neumático y sin ningún tipo de aceleración o movimiento lateral; al aplicar las respectivas ecuaciones estáticas en el diagrama bidimensional de la figura 4 se obtienen los resultados de la tabla 3.

Figura 4
Diagrama longitudinal bidimensional del prototipo



Fuente: Los autores.

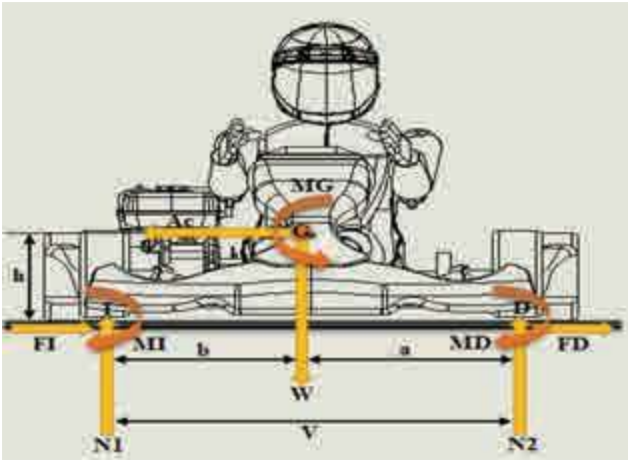
Tabla 3
Reparto de pesos longitudinales

Detalle	Eje delantero	Eje posterior
Reparto del peso estático (N/%)	543.58 / 41.04	780.77 / 58.95
Reparto del peso en aceleración (N/%)	279.78 / 21.12	1047.66 / 79.10
Reparto del peso en desaceleración (N/%)	807.37 / 60.96	513.88 / 38.80

Fuente: Los autores

Para calcular la distribución de pesos laterales del kart, se considera al vehículo como un sólido rígido, con movimiento sobre un plano recto horizontal sin ningún tipo de aceleración o movimiento longitudinal, con una aceleración centrípeta de 0.9 G considerando un peralte de 5°, lo cual determina una velocidad máxima de 30.42 km/h al tomar una curva de radio 7.625 m; al aplicar las respectivas ecuaciones estáticas en el diagrama bidimensional, de la figura 5 se obtienen los resultados de la tabla 4.

Figura 5
Diagrama lateral bidimensional del prototipo



Fuente: Los autores

Tabla 4
Reparto de pesos laterales

Detalle	Rueda derecha	Rueda izquierda
Reparto del peso estático, eje delantero (N/%)	655.19 / 49.47	669.16 / 50.53
Reparto del peso estático, eje posterior (N/%)	656.03 / 49.53	668.32 / 50.47
Reparto del peso en aceleración centrípeta, eje delantero y curva hacia la izquierda (N/%)	308.46 / 23.29	1015.86 / 76.71
Reparto del peso en aceleración centrípeta, eje delantero y curva hacia la derecha (N/%)	1001.89 / 75.65	322.43 / 24.35
Reparto del peso en aceleración centrípeta, eje posterior y curva hacia la izquierda (N/%)	351.13 / 26.51	973.19 / 73.49
Reparto del peso en aceleración centrípeta, eje posterior y curva hacia la derecha (N/%)	960.90 / 72.56	363.29 / 27.44

Fuente: Los autores.

Análisis de la rigidez torsional del chasis mediante MEF

En este apartado se determina la rigidez torsional mediante el análisis de elementos finitos (MEF), para lo cual se utiliza un software de simulación (ANSYS) y las ecuaciones físicas que rigen esta deformación (Singh *et al.*, 2017; Chauhan, Naagar, & Chawla, 2016).

$$k = \frac{F \cdot d}{\phi} \quad ; \quad \phi = \arctan \left(\frac{\delta}{\frac{d}{2}} \right)$$

Donde:

F = Fuerza (N)

ϕ = Ángulo de deformación (°)

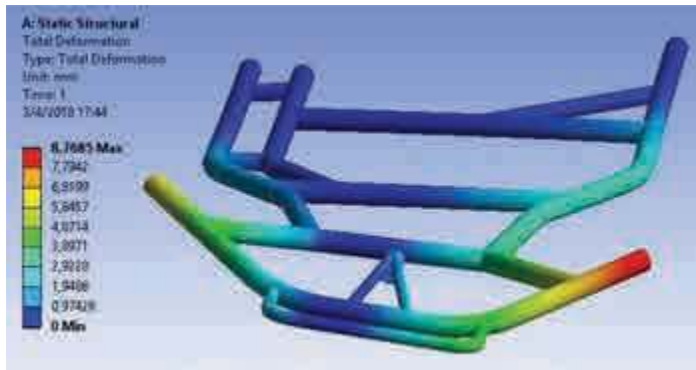
δ = Deformación en (m)

d = distancia entre fuerzas (m)

k = rigidez torsional $\left(\frac{N \cdot m}{^\circ} \right)$

Al aplicar una fuerza de 200 N se obtiene una deformación máxima de 8.7685 mm, como se observa en la figura 6, y al sustituir los valores en las ecuaciones se obtiene una rigidez torsional de $93.00077 \frac{N \cdot m}{^\circ}$.

Figura 6
Deformación máxima en torsión

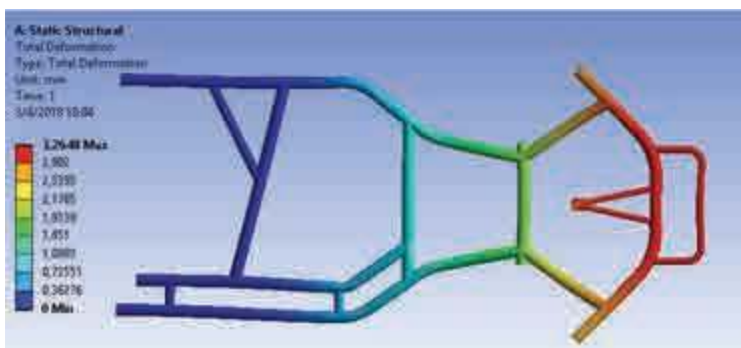


Fuente: Los autores

Impacto frontal

En lo que respecta al estudio de impacto frontal, se determina que la deformación total es de 3.2648 mm, la cual es obtenida al aplicar una fuerza equivalente a 4G, como se ve en la figura 7 (Machado *et al.*, 2015; Johnson *et al.*, 2017).

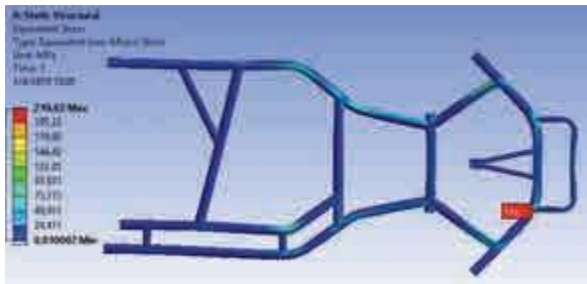
Figura 7
Deformación máxima de impacto frontal



Fuente: Los autores

En cuanto al esfuerzo de Von-Mises, se determina que es 219.62 MPa, (ver figura 8), el cual es menor al límite de rotura del material, lo que indica que el chasis al soportar un impacto frontal, se deforma permanentemente pero no llega a sufrir roturas.

Figura 8
Von Mises de impacto frontal

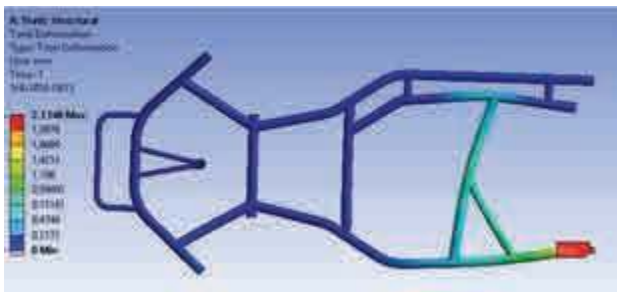


Fuente: Los autores

Impacto lateral

En lo que respecta al estudio de impacto lateral, se determina que la deformación total es de 2.1348 mm, la cual es obtenida al aplicar una fuerza equivalente a 2G, como se ve en la figura 9.

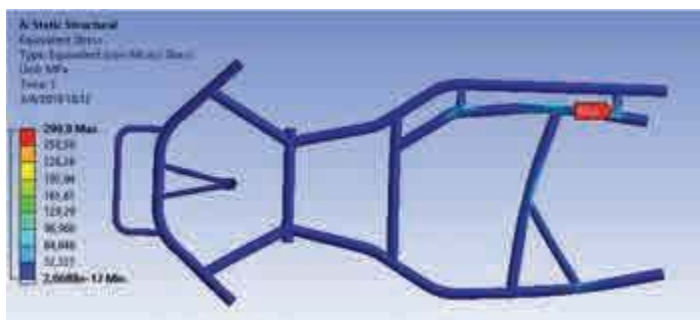
Figura 9
Deformación máxima de impacto lateral



Fuente: Los autores

En cuanto al esfuerzo de Von-Mises, se determina que es 290.9 MPa, (ver figura 10), el cual es menor al límite de rotura del material, lo que indica que el chasis al soportar un impacto frontal, se deforma permanentemente pero no llega a sufrir roturas.

Figura 10
Von Mises de impacto lateral



Fuente: Los autores

Características del control direccional

El tema de la sección anterior, trata el diseño estructural del chasis, de aquí en adelante se consideran los parámetros y mecanismos principales que permiten orientar de manera precisa las ruedas directrices del Kart. Al considerar que este monoplaza carece de suspensión sus ángulos de: caída, convergencia y salida se encuentran en estrecha relación y dependencia del ángulo de avance, por lo que este último se somete a modificación (Rodríguez, Mántaras, & Vera, 2004).

Ángulo de avance

La variación del ángulo de avance se justifica por la necesidad de obtener un par resistente para estabilizar las ruedas direccionales durante las pruebas en pista, para ello se ocupa un primer chasis ensamblado

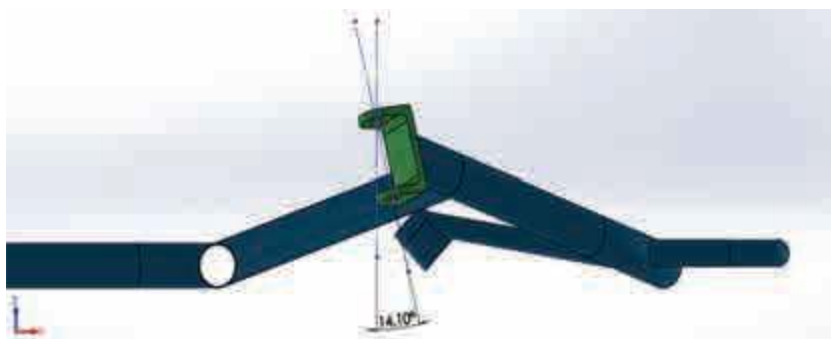
con un ángulo de avance de 12.36° y un segundo modelo ensamblado con 14.10° , como se muestra en las figuras 11 y 12.

Figura 11
Chasis 1, con ángulo de avance de $12,36^\circ$



Fuente: Los autores

Figura 12
Chasis 2, con ángulo de avance de $14,10^\circ$



Fuente: Los autores

Aplicación práctica de la propuesta metodológica

Con respecto a la aplicación de la propuesta metodológica planteada y al realizar el detalle de las etapas constructivas del Flujograma de

la figura 1; en la etapa de preparación de la maquinaria y herramientas, cabe recalcar que se debe contar con una mesa de ensamble, ver figura 13 (a), la cual debe ser completamente nivelada con el plano de construcción impreso en escala 1:1, sobre el cual se coloca cada parte de la tubería del chasis debidamente preparada, específicamente en sus extremos y puntas de anclaje, como lo indica la figura 13 (b), ya que de estas depende la precisión del ensamble para el chasis de estructura tubular; una vez que se coloca la tubería se realiza un proceso de pre-ensamble y corrección de cotas para después ejecutar el proceso completo de soldadura indicado en la figura 13(c) (Harrill Wiggins, 2000).

Figura 13

a) Mesa para ensamble de chasis; b) Extremos de barras terminadas
y c) Chasis completamente soldado



a)



b)



c)

Fuente: Los autores

A continuación, y una vez terminado el chasis, se realiza el montaje de los elementos auxiliares en el siguiente orden:

- Montaje de la columna de dirección y volante.
- Montaje de manguetas.
- Montaje de bieletas de dirección.
- Montaje de neumáticos delanteros.
- Montaje de los porta rodamientos y rodamientos con el eje posterior.
- Montaje del conjunto eje-catalina-disco de freno.
- Montaje de las manzanas y neumáticos posteriores.
- Montaje de la mordaza de freno.
- Montaje de la unidad de potencia (motor).

- Montaje del sistema de transmisión, embrague, piñón y cadenas.
- Montaje de pedales para acelerador y freno con su debido conjunto de cables o varillas.
- Montaje del asiento.
- Montaje de las bases y parachoques.
- Montaje del carenado sobre los plásticos parachoques.

Figura 14
Ensamble del chasis y componentes



Fuente: Los autores

Una vez que el chasis y los elementos auxiliares del kart están ensamblados (ver figura 14), se debe realizar una primera calibración o Set-up inicial, el cual se muestra en la tabla 5.

Tabla 5
Set-up inicial

Chasis	Peso total (kg)	Presión neumáticos delanteros (Psi)	Presión neumáticos posteriores (Psi)	Convergencia (mm)	Trocha delantera (mm)	Trocha posterior (mm)	Angulo de caída (°)	Angulo de avance (°)
1	143.8	15	17	0	1090	1300	0	12.36
2	143.75	15	17	0	1090	1300	0	14.10

Fuente: Los autores.

A continuación, se realiza la comprobación en competencia sobre una pista con longitud total de 930 m y 10 vueltas realizadas en el Kartódromo Dos Hemisferios Quito-Ecuador.

Validación de las muestras

Se presenta en la tabla 6, la comparación de las cargas calculadas con las reales medidas luego de la construcción del prototipo.

Tabla 6
Reparto de pesos longitudinales

Detalle	Eje delantero	Eje posterior
Reparto del peso estático calculado (N/%)	543.58 / 41.04	780.77 / 58.95
Reparto del peso estático real (N/%)	521.71 / 39.10	816.01 / 60.90

Fuente: Los autores.

Como se puede observar en la figura 15, al comparar los pesos mediante un diagrama de bloques se identifica que su magnitud es semejante con una desviación estándar promedio de 1.89, lo que indica que las medias de los valores son equivalentes.

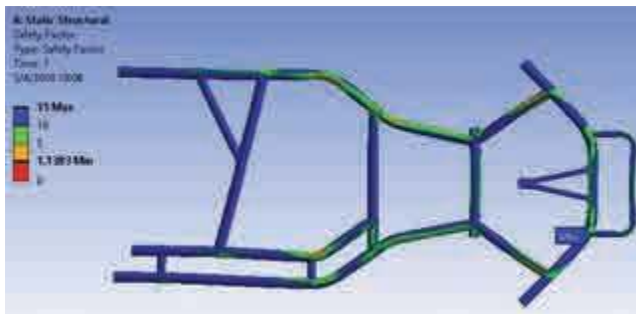
Figura 15
Comparación de reparto de pesos



Fuente: Los autores

Basado en el estudio del impacto frontal, se determina que el factor de seguridad mínimo es de 1.1383, lo que asegura que el chasis no sufre roturas, como se observa en la figura 16.

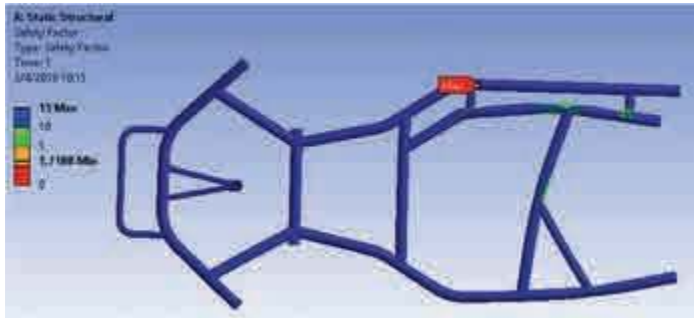
Figura 16
Factor de seguridad de impacto frontal



Fuente: Los autores

En lo que respecta al análisis del impacto lateral, se determina que el factor de seguridad mínimo es de 1.7188, lo que asegura que el chasis no superará el límite de roturas, como se observa en la figura 17.

Figura 17
Factor de seguridad de impacto frontal



Fuente: Los autores

A continuación, se presenta un resumen del análisis FEM, visto en la figura 18, en la cual se identifica la convergencia del modelo, al tomar en cuenta el número de nodos vs la máxima deformación en impacto frontal.

Figura 18
Convergencia impacto frontal



Fuente: Los autores

En lo que respecta a las pruebas dinámicas, se cumplen en total 4 válidas; las 2 primeras cada una con una etapa de clasificación y 3 mangas; mientras que las últimas con una etapa de clasificación y 2 mangas, como se observa en la tabla 7.

Tabla 7
Tiempo por vuelta y velocidad en pista

Valida	Kart	Chasis 1		Chasis 2	
		Mejor tiempo por vuelta (min:s)	Velocidad (Km/h)	Mejor tiempo por vuelta (min:s)	Velocidad (Km/h)
1 Válida	Clasificación	↯	↯	↯	↯
	1 Manga	01:29,463	33,802	01:30,388	33,456
	2 Manga	01:22,361	36,716	01:24,962	35,592
	3 Manga	01:22,506	36,652	01:24,352	35,85
2 Válida	Clasificación	↯	↯	↯	↯
	1 Manga	01:10,038	43	01:18,065	38,737
	2 Manga	01:10,024	43,185	01:09,204	43,697
	3 Manga	01:10,032	43,09	01:22,686	37
3 Válida	Clasificación	↯	↯	↯	↯
	1 Manga	01:13,903	40,919	01:08,560	44,107
	2 Manga	01:04,384	46,968	01:05,456	46,059
4 Válida	Clasificación	01:05,508	46	01:06,198	45,681
	1 Manga	01:06,578	45,42	01:12,234	41,365
	2 Manga	01:05,896	45,89	01:08,385	44,22
Promedios:		01:12,790	41,998	01:15,499	40,485

Fuente: Los autores

A manera de resumen, se indica que la evolución en el tiempo por vuelta en función a cada valida tiene una disminución promedio de 3,6 s para el chasis con 12,36° y de 6,252 s para el chasis con 14,10°; lo que indica que el primer modelo es capaz de completar el recorrido de una vuelta en pista, con menor tiempo que el segundo.

Al evaluar el diseño del chasis con la modificación del ángulo de avance a través de las pruebas dinámicas, se obtiene como resultado que el tiempo por vuelta del chasis 1 es de: 1 min y 12,790 s; mientras que el tiempo por vuelta del chasis 2 es de: 1 min y 15,499 s. La diferencia de tiempos es de 2,709 s, lo que evidencia la relación entre el diseño del chasis y las pruebas en pista.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología detallada de diseño y pruebas mediante FEM, para evaluar las actuaciones dinámicas del chasis de Kart tipo KF-4; se prestó especial atención a la comprensión del comportamiento estructural del marco tubular, que es el elemento más importante en la determinación de rigidez torsional y factor de seguridad.

El diseño y metodología explicada está basada en procesos numéricos y de modelado geométrico, análisis estructural y dinámico, para validar su precisión se llevaron a cabo actividades experimentales de ingeniería inversa geométrica y estructural.

Con la ayuda del análisis FEM, se identifican y rectifican los puntos débiles del chasis y así fortalecerlo con ligeras modificaciones de triangulación y adición de soportes, de hecho, la precisión de los resultados y la flexibilidad operativa es el parámetro fundamental de la evaluación como se observa en la convergencia del modelo.

Para validar y optimizar esta metodología se han construido dos vehículos Kart KF4, puestos a prueba en competencia a nivel interuniversitario, obteniendo una disminución promedio de 3.600 s por vuelta, tomando en consideración que en las 3 últimas pruebas el promedio de disminución es de 0.959 s, lo que indica el límite de las exigencias dinámicas del chasis 1.

En lo que respecta al chasis 2 se obtiene una disminución promedio de 4,926 s por vuelta y de 2,250 s en las 3 últimas pruebas, lo que indica que su respuesta en pista es menos eficiente comparada con el chasis 1.

Referencias bibliográficas

- Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Husain, N. A., Rahman, M. M., & Zaman, I. (2017). Dynamics properties of a Go-kart chassis structure and its prediction improvement using model updating approach. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 14(1).
- Biancolini, M. E., Cerullo, A., & Reccia, L. (2007). Design of a tuned sandwich chassis for competition go-kart. *International journal of vehicle design*, 44(3-4), 360-378.
- Chauhan, A., Naagar, L., & Chawla, S. (2016). Design and Analysis of a Go-kart. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 3(5), 29.
- Harrill Wiggins, J. (2000). *U.S. Patent No. 6,022,049*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Johnson, J., Kumar, K. D., Praneeth, S., & Shankar, R. (2017, February). Design, modeling and development of a go-kart vehicle. *Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS), 2017 International Conference on* (pp. 104-109). IEEE.
- Karting Homologation Forms (2018 de 05 de 04). CIKFIA. Obtenido de CIKFIA: <https://goo.gl/SkFpgZ>
- Kiral Lal, A. O. DESIGN, ANALYSIS AND FABRICATION OF GO-KART. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 429.
- Machado, T., Kulkarni, V., Arora, A., D'souza, A., Esakkimuthu, B., Suvarna, D., & Giri, V. (2015, February). Design and development of a go kart. *Technologies for Sustainable Development (ICTSD), 2015 International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Marzuki, M. A. B., Bakar, M. A. A., & Azmi, M. F. M. (2015). Designing Space Frame Race Car Chassis Structure Using Natural Frequencies Data from Ansys Mode Shape Analysis. *International Journal of Research Aeronautical and Mechanical Engineering*, 1(1).
- Muzzupappa, M., Matrangelo, G., & Vena, G. (2006). Methods for the Evaluation of the Go-Kart Vehicle Dynamic Performance by the Integration of CAD/CAE Techniques. *XVIII International Congress on Graphic Engineering. INGEGRAF*.
- Padhi, A., Joshi, A., Hitesh, N., Rakesh, C., Padhi, A., Joshi, A., & Rakesh, C. Increase Factor of Safety of Go-Kart Chassis during Front Impact Analysis. *International Journal*, 3, 385-390.
- Patil, H. D., Bhange, S. S., & Deshmukh, A. S. Design and Analysis of Go-Kart using Finite Element Method. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 3.

- Regional Rally Sporting Regulations (04 de 05 de 2018). FIA. Obtenido de FIA: <https://goo.gl/ByS7AC>
- Rodríguez, P. L., Mántaras, D. Á., & Vera, C. (2004). *Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico*. Editorial Paraninfo.
- Singh, A., Deol, A., Singh, G., Grewal, A., & Sembhi, A. S. Design and Simulation of Go Kart Chassis. *IJIRST International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 3(10).
- Thakare, P., Mishra, R., Kannav, K., Vitalkar, N., Patil, S., & Malviya, S. Design and Analysis of Tubular Chassis of Go-Kart. *Carbon*, 100, 0-18.

Capítulo 2

Control de contaminación

Métodos para determinar factores de emisiones de fuentes móviles en el cantón Cuenca

Andrés Esteban Ordóñez Segarra¹

Resumen

El estudio del estado del arte revisa diferentes investigaciones y analiza un método idóneo para adquirir valores de factores de emisión en el cantón Cuenca. Como antecedente en la ciudad no se han realizado estudios que apliquen metodologías de obtención de factores sino que utilizan valores del inventario de emisiones publicados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El trabajo inició con estudiar los tipos de métodos de obtención de factores conocidos como método directo y el método indirecto, después se analizó resultados obtenidos de otros estudios a nivel nacional e internacional utilizando diferentes métodos.

Se concluye con la propuesta de aplicación del método indirecto utilizando el modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), además se deberá determinar líneas de base de información para cargar datos al programa, tomando los valores estadísticos de consumo de combustible, flota vehicular, nivel de actividad, etc. existentes del año 2014.

Palabras clave

Factor emisión, método directo, método indirecto, inventario de emisiones, contaminantes.

Abstract

The study of the state of the art reviews different investigations and analyze a suitable method to acquire values of emission factors in the Cuenca county as antecedent in the city have not carried out studies that apply methodologies of obtaining factors but that use values of the inventory of Emissions published by the United States Environmental Protection Agency. The work has begun with studying the types of methods of obtaining factors known as direct method and the indirect method, after which results obtained from other studies at national and international level using different methods were analyzed.

It concludes with the proposal of application of the indirect method using the International Vehicle Emissions Model (IVE), in addition it will be necessary to determine baselines of information to load data to the program, taking the statistical values of fuel consumption, vehicle fleet, level of Activity, etc. Existing in 2014.

Keywords

Emission factor, direct method, indirect method, emissions inventory, contaminants.

1 Magíster en Sistemas Vehiculares. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil-Ecuador. aordonezs@ups.edu.ec

Introducción

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que se realizó en Japón y que en ella se estableció el Protocolo de Kioto resume que se debe disminuir y controlar las emisiones que generan el Efecto Invernadero y las emisiones tóxicas para el ser humano, en un tiempo establecido y con el apoyo de los países desarrollados como líderes del proyecto (Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2004).

Para cumplir los lineamientos mundiales de control de emisiones indicado por las Naciones Unidas, cada país debe realizar y actualizar los inventarios de emisiones generados por fuentes fijas y móviles.

Los factores de emisiones son necesario para la obtención de los inventarios de emisiones, el modo de calcular las emisiones se dan multiplicando el factor de emisión (valor másico del contaminante/distancia) por nivel de actividad (distancia recorrida). (Comisión Nacional del Medio Ambiente, Sectra, 2009).

El desarrollo de inventario de emisiones nos permite la obtención de modelos de calidad de aire, a su vez permite exámenes de las fuentes emisoras de contaminantes para analizar el control de emisiones, el análisis de las tendencias de emisión, el análisis del transporte de las emisiones de una región a otra y crear políticas públicas de mitigación de emisiones contaminantes (Comisión interdepartamental del Cambio Climático, 2011)

En el año 2014, la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV EP) realizó un inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, el análisis fue de fuentes fijas y móviles, el estudio indica que las fuentes móviles son las que más generan emisiones con un 89%, su alcance de los factores de emisión para las fuentes móviles estaba con datos obtenidos del inventario de emisiones dados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EMOV, 2014).

En el mismo informe del inventario de emisiones el parque automotor era aproximadamente de 131 488 vehículo de los cuales el 67,3% corresponden a automóviles, 20,3% a camionetas y furgonetas, 7,9% a motocicletas, 20,3% a taxis, 0,9% pesados (camiones, buses, volquetas y tanqueros) y 0,7% a híbridos (EMOV, 2014)

Con los antecedentes expuestos se plantea realizar un estudio con la siguiente interrogante ¿Qué métodos serían los más adecuados para determinar factores de emisión en el cantón Cuenca?, teniendo presente que no existen estudios previos en la ciudad.

Metodología

La metodología se basa en una revisión bibliográfica y comparación de diferentes trabajos relacionados con la determinación de factores de emisión bajo un análisis de los modelos existentes conocidos como directo e indirecto. El documento se organiza de la siguiente manera: se comienza con un breve estudio de enfoques de la estimación de emisiones y conceptos de los tipos de método; posterior se presenta una descripción de varios trabajos relacionados con la aplicación de los métodos de obtención; finalmente se exponen las conclusiones del estudio.

Desarrollo

Los factores de emisión son la relación entre la cantidad de contaminante emitido al ambiente y una unidad de actividad, en el caso de los vehículos de pasajeros y carga, se basa en el valor másico de emisión de un determinado contaminante por unidad de distancia (gramo/kilómetro o gramo/milla) o valor másico de contaminante por unidad de combustible quemado (gramo/J) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), debido a que los factores de emisión pueden basarse en pruebas de

fuelle, modelado, balance de masa, etc. las calificaciones de los factores pueden variar mucho. Algunos factores se obtienen con un sistema más riguroso que otro. En la determinación de la calificación de los factores intervienen dos pasos. El primer paso es una evaluación de la calidad de los datos y la confiabilidad de los datos básicos de emisión que serán utilizados para desarrollar el factor. El segundo paso es una evaluación de la capacidad del factor para mantenerse como un factor de emisión en un banco anual de actividad. Como se indica en la figura 1 (EPA, 1995).

Figura 1
Enfoque de la estimación de emisiones



Fuente: EPA, 1995.

Cuando se evalúa el factor de emisión se asume que es independiente del tamaño de la fuente y del nivel de actividad de ésta (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007). Su determinación obedece a modelos que reflejan las características locales de la zona analizada, considerando los efectos de varios parámetros tales como las diferentes modalidades de conducción, el tipo de motor, características del combustible, las velocidades de operación del vehículo, niveles variables

de mantenimiento, alteraciones de los sistemas de control de emisiones, la tecnología para el control de emisiones, la temperatura ambiente, altitud, kilometraje y la pendiente del terreno (Caiza Jácome & Portilla Aguilar, 2011).

Para la obtención de los factores de emisión basándose en la confianza creciente del cálculo y los costos crecientes, como se representa en la figura 1, los diferentes estudios han resumido en dos métodos conocidos como: directos e indirectos.

- El método directo adquiere los valores de las emisiones de un vehículo en condiciones reales de funcionamiento, pero el costo de obtención de este método es alto, teniendo presente que se utilizan equipos como: sensor remoto, medición a bordo, equipo analizador de emisiones y banco dinamométrico (Urbina, 2016).
- El método indirecto se basa en cálculos matemáticos que utilizan la información estadística de los métodos directos ajustados a las necesidades de cada región, a la vez se aplican programas computacionales con valores precargados para la obtención de resultados, los programas computacionales más usados son: Mobile, Movie, Copert, e Ive (Urbina, 2016).

Método directo

Se basan en mediciones directamente de la fuente, ejemplos de esta técnica son el uso de monitoreo abordado, las pruebas dinamométricas, etc. Aun cuando la medición en sí puede ser precisa, cualquier diferencia entre el ciclo de prueba utilizado y el uso o condiciones reales de operación de los vehículos puede implicar diferencias considerables en las emisiones. Estas pruebas generalmente, tienen un alto costo de implementación; sin embargo, si se hace una selección apropiada de los vehículos y se cuenta con una cantidad suficiente de ellos para la prueba, se tendrá una muestra representativa con información estadísticamente significativa para determinar los factores de emisión correspondiente a una flota general (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Análisis de métodos directos

En el año 2010 y 2015, en la ciudad de Quito se realizaron dos estudios a vehículos de gasolina, estas pruebas se dividieron en estáticas (Two Idle Speed) y de ciclo de conducción (SAEJ1082-IM-240), para efecto de cálculo de la combustión se desarrolló una fórmula molecular equivalente para el combustible (modelo simplificado de la combustión), como resultado expresan que existe gran diferencia de los valores de factores de emisión entre la prueba estacionaria y de ruta (15,04 gr/km en ruta y 1,59 gr/km en prueba estacionaria de CO a una altura de 2500 msnm), recomendando aumentar el tamaño de la muestra (Recalde, & Revelo 2015).

En la ciudad de Santiago en el año 2007 se realizó un estudio en vehículos a diésel, con una flota de buses y camiones de la ciudad aplicando los ciclos de conducción CTSAL y CTST-1, los resultados experimentales de factores de emisión en camiones indican que los contaminantes son inferiores en un 10% que los valores propuestos por el Modelo COPERT III (programa computacional con lineamientos europeos), y los buses tienen un valor 3,25 veces mayor de contaminantes (Mecánica, 2007)

Existen países que están realizando estudios experimentales para tener una estimación de emisiones más exactas; en Bogotá- Colombia, realizaron ciclos de conducción propios para el transporte público, con coeficientes de correlación calculados de un 65 a 80% a partir de 50 mil datos experimentales por categoría, lo que les permite obtener factores de emisión más reales de la ciudad (Benalcázar, Acevedo, Ossess, Rojas, 2013).

Método indirecto

Con el objetivo de incorporar datos para el cálculo de factores de emisiones generalmente se utiliza un modelo computacional de factor de emisión que incluye los valores de varios parámetros obtenidos por métodos directos (Herrera Murillo, Rodríguez Román, & Marín Rojas, 2012).

El presente estudio revisa y diferencia los modelos más usados y trata de adaptar el más adecuado para la región. Existen varios tipos de

modelos como: Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), modelo Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT).

Modelo Moves

Moves es el Simulador de Emisiones de Vehículos Motorizados de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Se utiliza para obtener factores de emisión tanto para vehículos en carretera y de no carretera. El objetivo de Moves es proporcionar una estimación exacta de las emisiones de automóviles, camiones y otros tipos de fuentes móviles con condiciones definidas por el usuario (EPA, 2016).

CATEGORIZACIÓN VEHICULAR

Su categorización lo realizan dependiendo del número de pasajeros, su actividad o trabajo, distancia recorridas y patrones de operación hora/día (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

A su vez el programa permite generar subcategorías para un análisis y cálculo más detallado, variables como el peso del vehículo, tipo de combustible, cilindrada del motor, año/modelo, tecnología del vehículo, clase, etc.

CONTAMINANTES

El programa Moves analiza una gama alta de contaminantes de efecto invernadero y evaporativas (contaminantes criterio) eso permite que sea más específico el momento de realizar los inventarios de emisiones. Los contaminantes son: N₂O, CH₄, CO₂, HC, CO, NO_x, PM, SO₂, NH₃ y contaminantes tóxicos (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Modelo IVE

El modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) fue desarrollado por el Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sus-

tentables (ISSRC, por sus siglas en inglés) fue diseñado para estimar las emisiones de vehículos motorizados y tiene como principal propósito el ser usado en países en desarrollo. El modelo predice contaminantes atmosféricos locales, gases responsables del efecto invernadero y tóxicos (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

Según datos comparativos de diferentes modelos utilizados para la estimación de emisiones por fuentes móviles, IVE difiere de más/menos 10% comparado a las estimaciones a partir de uso de factores de emisión obtenidos por Mobile (antiguo programa usado antes de Moves) (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

CATEGORIZACIÓN VEHICULAR

El modelo IVE consiste en multiplicar la base de factores de emisión por cada uno de los factores de corrección y por la distancia/vehículo para cada tecnología. El proceso de cálculo interno del modelo para estimar los factores de emisión corregidos se basan en unas formulas con sub conjuntos, estos dependen mucho de la información adquirida (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

CONTAMINANTES

El programa IVE tiene un listado de contaminantes criterio: monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos orgánicos volátiles evaporados (VOC_{evap}), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Óxidos de azufre (SO_x), material particulado (MP_{-c10}). Tóxico: plomo (Pb), 1,3 Butadieno, Acetaldehído, Formaldehído, Amoniacio (NH_3) y Benceno. Y de calentamiento Global: dióxido de carbono (CO_2), Óxido de nitrógeno (N_2O), Metano (CH_4) (International Sustainable Systems Research Center, 2008).

Modelo Copert

El modelo Copert es una herramienta europea para el cálculo de las emisiones del sector del transporte por carretera. Las emisiones

calculadas incluyen los contaminantes regulados (CO , NO_x , VOC , PM) y no regulados (N_2O , NH_3 , SO_2). Una metodología detallada soporta la aplicación de software. Además se suman elementos metodológicos revisados como una interfaz de usuario reelaborada, con el objetivo de compilar complejos inventarios nacionales anuales que incluyan varios países y años en un solo archivo (Gkatzoflias, Kouridis, Ntziachristos, & Samaras, 2012).

CATEGORIZACIÓN VEHICULAR

El modelo estima las emisiones generadas por vehículos de diferentes combustibles para 6 categorías básicas. Empezando desde vehículos de pasajeros hasta motocicletas; a esto se suma la cantidad de pasajeros que pueden transportar y el peso bruto del vehículo (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

CONTAMINANTES

El programa Copert es capaz de estimar el inventario de emisiones de fuentes móviles, una característica del modelo es su capacidad de proporcionar información desagregada por elemento sobre las emisiones de hidrocarburos. Los contaminantes son: N_2O , CH_4 , CO_2 , HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos), CO , NO_x , PM , SO_2 , NH_3 , COP (Contaminantes orgánicos persistentes), COV y metales pesados (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Diferencias entre modelos

Los modelos para el cálculo de emisiones necesitan de información que caracterice a la flota vehicular, la actividad, tipo de combustible, etc. acopladas a las condiciones de la región de estudio. Ahora, Moves se creó enfocado en cubrir los tipos de vehículos, los periodos de tiempo, las áreas geográficas, los contaminantes, las características operativas del vehículo y los tipos de caminos que se modelaran utilizando

la base de datos predeterminada, que resume la información relevante de emisiones para todo Estados Unidos (EPA, 2016), y su par Copert se lo creó analizando los elementos metodológicos con el objetivo de compilar inventarios nacionales anuales complicados que incluyen múltiples países y años en un solo archivo. (Gkatzoflias *et al.*, 2012), solo el modelo IVE puede cubrir ambos (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Figura 2
Diferencias entre modelos computacionales

Modelo	Alcance geográfico		Tipo de análisis	Contaminantes				No. de categorías vehiculares	Tipos de fuentes		Tipos de combustible							Especificaciones tecnológicas						
	Municipal	Estatal o regional		Nacional	Factores de emisión	Inventario de emisiones	Regulados ^a		Tóxicos ^b	Efecto invernadero ^c	Otros ^d	En circulación	Fuera de camino	Gasolina	Diesel	GNC	GLP	Etanol	Metanol	H ₂ gaseoso	H ₂ líquido	Electricidad	Estados Unidos	Europa
MOBILE6	X	X	X	X		X	X	Xa	X	28	X		X	X	X								X	
MOVES4	X	X	X		X			X		13	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
IVE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7	X	X	X	X	X	X	X					X	X	
COPERT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	6	X	X	X	X	X	X							X	

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología, 2009.

Análisis de método indirecto

Un estudio de emisión de contaminantes por fuentes móviles en el país de Costa Rica (2011), con factores de emisión obtenidos del modelo Mobile 6 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y los datos de actividad reportados por la Dirección Sectorial de Energía, se concluyó que el 60,4% corresponde a monóxido de carbono (CO), y son los vehículos particulares y de carga liviana que operan con gasolina las unidades más contaminantes, pues aportan un total del 73% de las emisiones totales (Herrera Murillo *et al.*, 2012).

En el año 2009 se realizó factores de emisión de la ciudad de Santiago de Chile, tomando como base el estudio realizado por CONAMA

(2007), utilizando el programa Modem (modelo computacional desarrollado en Chile) que es muy similar al programa Copert III, se actualizó los valores de factores de emisión para partida en frío, partida en caliente y emisiones evaporativas con un parque vehicular de 25 000 a 50 000 unidades (Comisión Nacional del Medio Ambiente, Sectra, 2009).

Conclusiones

Todos los modelos descritos en este estudio son ampliamente conocidos y tienen una gama extensa de datos preestablecidos que permiten que los factores de emisión y las estimaciones de inventarios de emisiones vehiculares sean realizadas con niveles aceptables de incertidumbre y relativamente poca obtención de datos en campo.

Sin embargo, la aplicación de datos preestablecidos en otros países o regiones puede conducir a la estimación de inventarios con grandes incertidumbres, salvo que haya una fuerte labor para recalibrarlos y modificarlos de tal forma que reflejen las condiciones locales.

Según el análisis de cada estudio, para poder implementar el método directo es necesaria una inversión considerable para la adquisición de equipos de medición que estén homologados, a su vez las pruebas experimentales deberán basarse en el 0,029% del tamaño de la muestra con un nivel de confianza del 95% y un error del 5%, de todo el parque automotor de la ciudad para que los resultados tengan un valor de incertidumbre experimental correcto (Rodríguez Osuna, Ferreras, & Núñez, 2001), analizando la situación económica que se encuentra el gobierno local de la ciudad, es muy poco probable que realicen la inversión.

Para la aplicación del método indirecto, los valores estadísticos existentes en la ciudad de Cuenca como el parque automotor (tipo de vehículo, cilindrada, año de fabricación), el consumo estimado en base a los recorridos medios anuales, ventas de combustibles por año, nos permiten generar líneas de base de datos, con esta información se puede

cargar al modelo IVE y obtener factores de emisión por contaminante o directamente los valores para el inventario de emisiones.

Un problema para la mayoría de métodos es el factor altura, sabiendo que el cantón Cuenca está a 2550 msnm, y a su vez, según estudios por cada 500 msnm las emisiones varían (CO se incrementa un 10%, HC se incrementa 82%, NOx crecen un 35% hasta los 1500 msnm y de ahí decrecen en 23% cada 500 msnm) (Caiza Jácome & Portilla Aguilar, 2011), se deberá tener presente el momento de cargar los datos al modelo IVE.

Discusión

Como se explicó anteriormente, para cumplir con el objetivo del estudio se deberá emplear el método indirecto utilizando el modelo IVE, además se utilizarán los valores estadísticos dados en el informe de calidad de aire del cantón Cuenca, con los datos existentes se cubre los criterios exigidos por el programa. Ver figura 3.

Figura 3
Criterios para definir categorías vehiculares en IVE

Tipo de combustible	Alimentación del combustible	Uso del Vehículo	Tecnología de control de emisiones	Sistema de recuperación de vapores
Gasolina	Carburador	Menos de 79,000 km	Convertidor catalítico de dos vías	Sin control
Diesel				Válvula de ventilación positiva
Gas Natural Comprimido - GNC	Inyección electrónica central o monopunto	Entre 80,000 y 161,000 Km	Convertidor catalítico de tres vías	Válvula de ventilación positiva y control en el tanque de combustible
Gas Licuado de Petróleo - GLP	Inyección electrónica múltiple		Vehículos de baja emisión	
Etanol		Más de 161,000 km	EURO I, II, III, IV y V	Control de emisiones evaporativas

Fuente: Institute, 2013

A su vez se para estimar el inventario de emisiones para la región de estudio, tomando en cuenta los tipos de contaminantes y categorías vehiculares, IVE requiere los insumos que se muestran en la figura 4.

Figura 4
Insumos requeridos por IVE

Insumo	Insumo
Temperatura ambiental	Uso del aire acondicionado
Humedad relativa	Altitud sobre el nivel del mar
Desglose detallado de actividad (KRV) por categoría vehicular	Distribución de la flota vehicular por tecnología (de acuerdo con el cuadro 3.8)
Información sobre características de la gasolina (azufre, plomo, benceno y oxigenantes)	Número de arranques, por día y categoría vehicular, y tiempo entre arranques consecutivos
Información sobre características del diesel (azufre)	Factores de emisión para cada tecnología bajo las condiciones locales de operación
Programa de inspección y mantenimiento	Distribución de Potencia Específica Vehicular de la zona de estudio

Fuente: Institute, 2013

Referencias bibliográficas

- Benalcázar, L. C., Acevedo, H., Ossess, M., & Rojas, N. (2013). *Construcción de los ciclos de conducción de Bogotá para la estimación de factores de emisión vehiculares y consumo de combustible*. Disponible en <https://goo.gl/S2Awid>
- Caiza Jácome, P. G., & Portilla Aguilar, Á. A. (2011). *Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de Ciclo Otto de inyección electrónica a gasolina*. (Tesis de Maestría en Sistemas Automotrices). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), versión 1*, 0-66.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente, Sectra, M. de S. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*.

- Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2004). Los diez primeros años.
- EMOV (2014). Inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca. Cuenca.
- EPA, A. de P. A. (1995). Ap 42, fifth edition compilation of air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources.
- _____. (2016). MOVES2014a User Interface Reference Manual.
- Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2012). COPERT 4. *Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport*. European Environment Agency, (February).
- Herrera Murillo, J., Rodríguez Román, S., & Marín Rojas, J. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 25(506), 10. Recuperado de <https://goo.gl/nXNkXC>
- Institute, C. A. (2013). Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos.
- International Sustainable Systems Research Center (2008). Manual del usuario del Modelo IVE, 55.
- Mecánica, D. de I. U. de C. (2007). Actualización de factores de emisión para buses y transporte de carga de la región metropolitana. Informe Final.
- Recalde, M., & Revelo, R. (2015). *Análisis de emisiones en vehículos a gasolina utilizando pruebas estacionaria y dinámica mediante el ciclo IM-240*. (Tesis Maestría en Sistemas Automotrices). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Rodríguez Osuna, J., Ferreras, M. L., & Núñez, A. (2001). Inferencia estadística, niveles de precisión y diseño muestral. *Reis, Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 54 139-166.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología (2007). “Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas”.
- _____. (2009). Modelos empleados en la elaboración de inventarios de emisiones vehiculares, 53-73.
- Urbina, A. (2016). *Comparación de factores de emisión vehicular al utilizar ciclos de conducción IM240 y on board en la ciudad de Quito*. (Tesis Maestría en Sistemas Automotrices). Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Análisis de los límites de gases contaminantes generados por fallas en un motor utilizando cartas de control

Francklin Rivas P.¹
Cristian García G.²
Anna Pérez M.³
Mary Vergara P.³
Néstor Rivera C.²
Francklin Rivas E.⁴
Ángel Paucar U.²

Resumen

En este trabajo, se presenta un análisis de los límites de contaminación generada a raíz de las fallas en un motor de encendido por chispa asociadas al bajo voltaje de encendido y al cambio en la relación aire/combustible, utilizando cartas de control. Para esto, se recolectan los datos de emisión de gases generados en el vehículo en condiciones de operación normal y de falla. Posteriormente, se realizan cartas de control para la media y el rango de cada tipo de agente contaminante. A partir de los límites definidos en condiciones normales de funcionamiento del motor, se prueba la sensibilidad de estas cartas para la detección de valores fuera de control, obtenidos a partir de la inducción de las fallas mencionadas. Los resultados obtenidos muestran que, en condiciones de operación normal, los límites superiores de control, no difieren significativamente de los valores máximos admisibles

-
- 1 Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Carrera de Ingeniería Industrial. Mérida-Venezuela francklin190@gmail.com
 - 2 Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz. Grupo de Investigación de Ingeniería en Transporte (GIIT). Cuenca-Ecuador cgarciag@ups.edu.ec, nrivera@ups.edu.ec, apaucar@ups.edu.ec
 - 3 Universidad de Los Andes, Escuela de Estadística y Escuela de Ingeniería Mecánica. Mérida-Venezuela gabipm23@gmail.com, vmaryjose@gmail.com
 - 4 Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Informática. Chile frivas@inf.utfsm.cl

establecidos en regulaciones ambientales internacionales, y que los valores más altos registrados de emanaciones contaminantes junto con los cambios súbitos sobre las cartas de control desarrolladas, se presentan para el dosado rico y por consiguiente deben considerarse como críticas todas aquellas fallas que generen este tipo de mezcla debido al impacto que genera en el ecosistema.

Palabras clave

Gases contaminantes, fallas, motor, cartas de control.

Abstract

In this paper, an analysis of the pollution limits generated due to faults in a spark ignition engine associated to the low ignition voltage and to the change in the air/fuel ratio, using control charts is presented. For this, the emission data of gases generated in the vehicle is collected in normal operation and failure conditions. Subsequently, control charts are made for the mean and the range of each type of polluting agent. From the limits defined in normal operating conditions of the engine, the sensitivity of these cards for the detection of out-of-control values, obtained from the induction of the aforementioned faults, is tested. The obtained results show that, under normal operating conditions, the upper control limits obtained do not differ significantly from the maximum admissible values established in international environmental regulations, and that the highest values registered of polluting emissions together with the sudden changes on the developed control charts, they are presented for the rich dosage and therefore all failures that generate this type of mixture must be considered as critical due to the impact it generates in the ecosystem.

Keywords

Engine emissions; fault; engines; control charts.

Introducción

Un tema de gran importancia a nivel mundial, es la disminución de las toneladas de dióxido de carbono (CO_2) existentes en el aire a consecuencia del parque automotor. Por esto, es importante contar con niveles máximos establecidos en cada país que regulen las emisiones provenientes de fuentes móviles, determinando de esta manera, que los vehículos cuyas emisiones superen los valores máximos, deben someterse a una revisión que permita determinar el origen de la emisión elevada de agentes contaminantes, y aplicar las acciones correctivas pertinentes para disminuir el impacto ambiental que ellos generan.

En la industria automotriz, es de amplio uso distintas técnicas de control estadístico de la calidad, de hecho, en el seno de importantes marcas asociadas a esta industria se han generado programas especiales

de vigilancia y monitoreo de la calidad, tal como lo señala Montgomery (2008). Besterfield (2009), advierte que toda organización debe implementar procesos de vigilancia, medición, análisis y mejoramiento, para demostrar la conformidad del producto o servicio, donde se debe considerar la interacción con el medio ambiente.

Uno de los procedimientos de vigilancia y monitoreo, son los gráficos de control también conocidos como cartas de control. El objetivo básico de un gráfico de control, es observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo, para distinguir variaciones por causas aleatorias o causas atribuibles (Gutiérrez y De la Vara, 2009), de tal manera que son herramientas de detección de fallas, que permiten identificar cambios en una variable y la magnitud de esos cambios.

Las cartas de control han sido utilizadas en diferentes tipos de mantenimiento para mejorar diferentes procesos considerando las fallas en el tiempo. Así, Xie, Goh y Ranjan (2002), realizan una revisión exhaustiva del uso de cartas de control para monitorear fallas y número de defectos, haciendo énfasis en el número de fallas en un intervalo fijo de tiempo, mientras que Vargas y Montaña (2005), desarrollan un diagrama de control basado en el valor esperado condicional desarrollando una metodología para estudiar la confiabilidad, tiempo de vida útil o tiempo de falla de una serie de productos empleando distintos tipos de restricción.

Por otra parte, Gupta *et al.* (2009), incorporan una modalidad importante de las cartas de control ya que identifican acciones de mantenimiento correctas a partir del análisis de fallas pasadas y recurrentes, y planifican y programan acciones dirigidas a mejorar la eficiencia de la función de mantenimiento. Estas modalidades de aplicación de las cartas de control en mantenimiento son expandidas por otros desarrollos como los presentados por: Quintana, Pisani, & Casal (2015), Kisić, Durović, & Petrović (2017) y Aslam, Arif, & Jun (2017), donde los primeros autores se centran en evaluar el desempeño de los diagramas a través de tres métricas, la longitud promedio de corrida y dos de ellas no convencionales, incorporando para ello el concepto de variabilidad

lateral para monitorear los procesos. Los segundos autores diseñan un experimento basado en la aplicación de cartas de control para comparar la efectividad que tendrá sobre la vida útil, el aplicar técnicas de mantenimiento predictivo, con diagnóstico de los procesos de degradación y los últimos autores diseñan una carta de control que utiliza la prueba de muerte súbita asumiendo que el tiempo de vida/falla de un producto sigue la distribución de Weibull. También, Zhou *et al.* (2017) estudian un sistema de cola de servidor único con diferentes niveles de consumo de energía en los estados de ejecución asociados para abordar el conflicto entre el consumo de energía y la demora del cliente, desarrollando un modelo de mantenimiento que minimiza el costo total esperado a largo plazo del sistema basado en el consumo de energía y el uso de cartas de control.

Por otro lado, es importante resaltar que, en América Latina, es común el uso de vehículos con motores de combustión de encendido por chispa, los cuales son causantes de las emanaciones de gases contaminantes al ambiente y por lo tanto es imperativo controlar dichos gases, llevándolos a las menores magnitudes posibles. Así, esta investigación se centra en definir mediante cartas de control, los límites de contaminación del Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos no combustionados (HC), Dióxido de Carbono (CO₂) y los niveles de Oxígeno (O₂) presentes en los gases emanados por los motores de encendido por chispa. Lo que permitirá contar con valores actualizados de lo que emana al ambiente un vehículo con fallas en el sistema de encendido, ampliando el uso de las cartas de control en pro de la mejora del medio ambiente.

Se plantea trabajar en base a datos que se obtendrán a partir de un proceso de simulación en el cual se le inducirán tres tipos de fallas a estos motores, dos de ellas se consiguen a través de las alteraciones en la presión del combustible y la tercera con una variación en la distancia del electrodo de las bujías. A partir de esas fallas se medirán las emanaciones de gases generadas por el motor, comparando los resultados obtenidos con las mediciones realizadas con el motor en condiciones normales de operación; esto con el fin de establecer los niveles de contaminación que se presentan a partir de la aparición de una falla.

Este trabajo está organizado en tres secciones, la primera describe la metodología con una parte experimental desarrollada por Rivera *et al.* (2017) y las etapas previas a la obtención y análisis de los datos. En la segunda fase se desarrollan las cartas de control y se prueba la sensibilidad de dichas cartas para detectar valores extremos de emisiones cuando se inducen al motor tres tipos de fallas en el sistema de combustión: aumento en la presión del combustible, disminución en la presión media de combustible, y bajo voltaje en el encendido. En la última sección se presentan las conclusiones más relevantes, donde se encuentra que el punto de funcionamiento más crítico se localiza cuando la mezcla aire/combustible es rica, ya que se generan los máximos valores de gases contaminantes.

Metodología

En base a la opinión de expertos se logró determinar que las fallas de interés para la realización de esta investigación se refieren a la variación en la presión del combustible y al desgaste de las bujías. Es por ello, que se generan tres tipos de fallas en el motor para determinar el efecto de los factores sobre las emanaciones del sistema de escape.

El procedimiento experimental utilizado para la obtención de los datos, es el desarrollado por Rivera *et al.* (2017), donde se utilizó un banco dinamométrico MAHA LPS 3000 y un analizador de gases NGA 6000 descrito en la tabla 1. Las pruebas se desarrollaron en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, en Ecuador.

La investigación se realiza implementando las tres fases descritas a continuación:

Primera fase

Contempla el desarrollo del experimento y la puesta a punto para la primera corrida con el motor en condición normal de funcionamien-

to. Este motor, pertenece a un vehículo marca Chevrolet, modelo Corsa Evolution 1.4L, con una cilindrada de 1388 cc, distancia nominal de las bujías de 0.8 mm, presión nominal de combustible de 50 psi, un consumo 6.81/100 km y un sistema de inyección multipunto. El ensayo se realiza en el banco de pruebas dinamométrico nombrado y se miden las emisiones de los gases CO, HC, CO₂ y O₂, con el NGA 6000.

Tabla 1
Analizador de gases NGA 6000

Característica	Rango	Sensibilidad	Unidad
Monóxido de Carbono	0.00 - 0.99	0.01	%
Hidrocarburos	0 - 9999	1	Ppm
Dióxido de Carbono	0.0 - 20	0.10	%
Oxígeno	0.0 - 25	0.01	%
Óxidos Nitrosos	0 - 5000	1	Ppm
Lamba	0 - 2.000	0.001	-
Relación aire/combustible	0.0 - 99.0	0.1	-

Fuente: Los autores

Segunda fase

Aquí se realizan las corridas experimentales en condiciones de fallo incorporando cambios en la presión de combustible y alteración en el espacio del electrodo de las bujías como se detalla en la tabla 2, a fin de simular fallos asociados a la mezcla aire/combustible y encendido. Se toman como mediciones de mayor importancia los gases contaminantes emanados por el motor de un Corsa Evolution y se consideran para el análisis 225 mediciones con 5 réplicas del experimento.

Las condiciones de estudio se han codificado considerando la operación normal y las tres fallas del funcionamiento del motor de la siguiente manera: 0: estado del motor en condiciones normales de funcionamiento, 1: alteración en la presión de combustible, presión 60 psi,

2: alteración en la presión de combustible, presión 40 psi y 3: alteración en el espacio del electrodo de las bujías, espacio del electrodo 1,3 mm.

Tabla 2
Fallos inducidos para la simulación

Código	Descripción de la falla	Valor
0	Condición normal	-
1	Falla 1. Dosado rico	60 PSI
2	Falla 2. Dosado pobre	40 PSI
3	Falla 3. Bajo voltaje de encendido	1.3 mm de apertura de las bujías

Fuente: Los autores

Tercera fase

En esta etapa se realizan las cartas de control para las emisiones promedio (\bar{x} y R). Se hacen las cartas de control para las emisiones promedio de CO, HC, CO₂ y O₂ con la finalidad de establecer los límites de prueba, para ello se analizan las mediciones en condiciones óptimas de funcionamiento. Una vez obtenidos los límites de prueba se verifica la sensibilidad de éstos ante la presencia de fallas.

Resultados y discusión

En cada medición se obtienen registros de las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂); siendo éste último no contaminante pero interviene en el proceso de combustión del vehículo. Estas muestras se obtuvieron aplicando un tipo de muestreo sistemático, que permite muestrear secuencialmente un archivo de datos como el obtenido del banco de pruebas. Con este tipo de muestreo la temporalidad de las mediciones no se pierde.

Con el uso del software estadístico SPSS versión 20 (2017), se realizaron los diagramas de control para la media y el rango (como medida

de dispersión) de las variables incluidas en la investigación, utilizando para ello los datos del motor sin falla para poder establecer los límites de prueba. Por la naturaleza de la investigación, el límite superior de control resultante para los diagramas de los gases analizados, puede establecerse como referencia máxima permisible; mientras que el límite inferior de control puede sugerir la referencia de funcionamiento, pero si un valor se encuentra por debajo de este valor para los gases contaminantes no debería interpretarse como una situación fuera de control. Los resultados se muestran a continuación.

Monóxido de Carbono CO

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) se reportan en %. Al observar el diagrama de control para la media de CO (figura 1a), se evidencia la agrupación de las observaciones alrededor de la línea central, lo que puede sugerir una posible estratificación. No obstante, por las características propias del motor analizado y los resultados reportados por el banco dinamométrico, las mediciones suelen ser muy homogéneas o parecidas, por lo tanto, no se esperan fluctuaciones o variaciones importantes en las emisiones de CO.

Al inicio de la prueba, se observa un grupo de mediciones por debajo de la línea central que se originan al momento de iniciar proceso de aceleración hasta alcanzar las condiciones de funcionamiento requeridas, posteriormente, las mediciones oscilan alrededor de la línea central, pero con pequeñas variaciones, y al final de la prueba (en las últimas 4 o 5 mediciones) disminuye ligeramente la emisión de CO. En el diagrama de control para la media, el límite superior de control es de 0,606% e indica que el vehículo en condiciones óptimas de funcionamiento puede generar emisiones de CO por debajo de 1,2%.

Al examinar el diagrama para el rango (figura 1b), se observa un comportamiento que sugiere que el proceso de emisiones de CO está bajo control. De hecho, el patrón que exhiben las mediciones se corresponde a un sistema estable de causas aleatorias, y las oscilaciones alrededor de

la línea central se aprecian mejor que en el diagrama para la media de las emisiones de CO, por lo tanto el fenómeno de la estratificación presente en dicho diagrama no se detecta con tanta intensidad en el diagrama del rango. Tal como se comentó anteriormente, las mediciones para un estudio de estas características producirán mediciones homogéneas.

Hidrocarburos HC

Las emisiones de hidrocarburos (HC) se reportan en partes por millón (ppm). Al observar el diagrama de control para la media de HC (figura 2a), se evidencia la agrupación de las observaciones alrededor de la línea central (similar a la reportada para las emisiones de CO), lo que puede sugerir una posible estratificación. No obstante, por las características propias del motor analizados y los resultados reportados por el banco de pruebas, las mediciones de las emisiones de HC suelen ser muy homogéneas o parecidas, y además las mediciones en condiciones sin falla deberían reportar ese comportamiento. Así, las emisiones promedio de HC están bajo control estadístico, pero indica que un vehículo en condiciones óptimas de funcionamiento puede generar emisiones de HC por debajo de 220 ppm. Este límite superior de control perfectamente podría establecerse en 220 ppm.

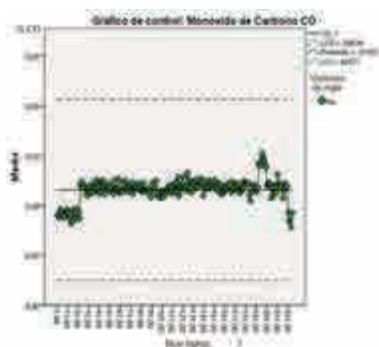


Figura 1a

Diagrama de Control para la media

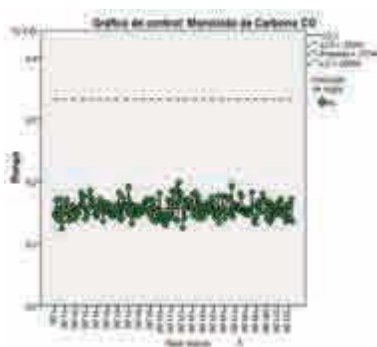


Figura 1b

Diagrama de Control para el rango

Fuente: Los autores

El límite inferior de control obtenido es 158,91 ppm, este límite podría utilizarse como referencia de buen funcionamiento; emisiones por debajo de este valor deberán interpretarse como emisiones menos contaminantes de HC.

Al examinar el rango en la figura 2b, se observa un comportamiento que sugiere que el proceso de emisiones de HC está bajo control. El patrón que exhiben las mediciones se corresponde a un sistema estable de causas aleatorias, y las oscilaciones alrededor de la línea central se aprecian mejor que en el diagrama para la media de las emisiones de HC, por lo tanto, el fenómeno de la estratificación presente en dicho diagrama no se evidencia con tanta intensidad en el diagrama del rango. Tal como se comentó anteriormente, las mediciones para un estudio de estas características producirán mediciones homogéneas.

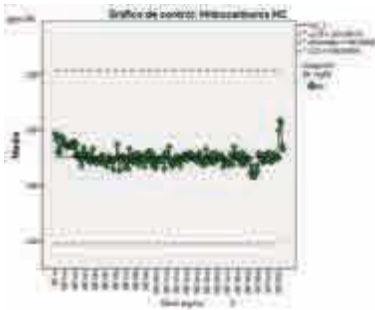


Figura 2a

Diagrama de Control para la media

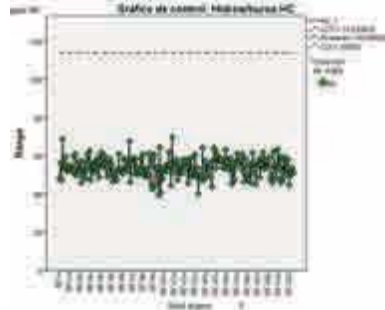


Figura 2b

Diagrama de Control para el rango

Fuente: Los autores

Dióxido de Carbono CO₂

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) se reportan en %. Al observar el diagrama de control para la media de CO₂ (figura 3a), se evidencia que las emisiones se encuentran bajo control estadístico, es decir, el patrón que exhiben es cónsono con un sistema estable de causas

aleatorias, y no se aprecia ningún indicio de estratificación alrededor de la línea central; tal como ocurre con para el monóxido de carbono y los hidrocarburos. En este diagrama existen más variaciones alrededor de la línea central, y esto puede sugerir que de los gases contaminantes se debe prestar especial atención al CO_2 .

Al examinar el diagrama para el rango de la figura 3b, se observa un comportamiento igualmente aleatorio alrededor de la línea central, y no se detectan puntos fuera de los límites de 3s. Así, el proceso de emisiones de CO_2 está bajo control. Al comparar el patrón de las observaciones con el patrón descrito para el diagrama del rango del monóxido de carbono y los hidrocarburos, se observa que la dispersión es mayor en el CO_2 .

Al examinar los límites de control para las emanaciones promedio de CO_2 , se observa que el límite superior de control es de 14,35%, la línea central es de 13,85% y el límite inferior de control es de 13,35%.

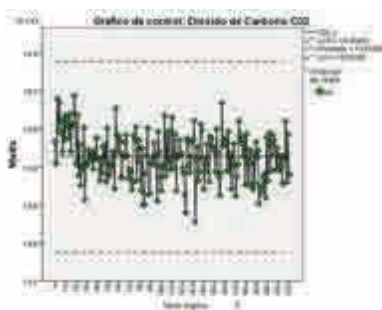


Figura 3a

Diagrama de Control para la media

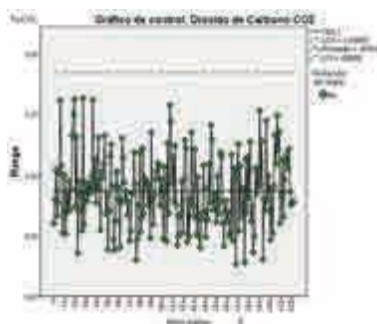


Figura 3b

Diagrama de Control para el rango

Fuente: Los autores

Oxígeno O_2

Las emisiones oxígeno O_2 se reportan en %. Al observar el diagrama de control para la media de O_2 (figura 4a), se evidencia la agrupación

de las observaciones alrededor de la línea central, lo que puede sugerir una posible estratificación, tal como se presentó en el monóxido de carbono y en los hidrocarburos. Tal como se indicó anteriormente, por las características propias del motor analizado y los resultados reportados por el banco dinamométrico, las mediciones suelen ser muy homogéneas o parecidas, por lo tanto, no se esperan fluctuaciones o variaciones importantes en las emisiones de O_2 . El oxígeno no es un gas contaminante, pero su presencia es vital en el proceso de combustión del vehículo.

Al inicio de la prueba, se observa un grupo de mediciones por encima de la línea central que se originan al momento de iniciar proceso de aceleración hasta alcanzar las condiciones de funcionamiento requeridas, posteriormente, las mediciones oscilan alrededor de la línea central, pero con pequeñas variaciones, que sugieren una estratificación, y al final de la prueba (aproximadamente en la medición 180) se detectan fluctuaciones un poco más amplias que las observadas antes de esa medición.

Al examinar el diagrama para el rango (figura 4b), se observa un comportamiento similar al de la media, es decir, las observaciones se agrupan alrededor de la línea central. Tal como se comentó anteriormente, las mediciones para un estudio de estas características producirán mediciones homogéneas.

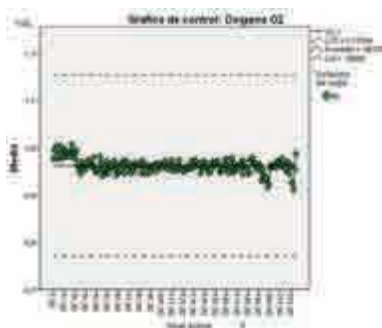


Figura 4a

Diagrama de Control para la media

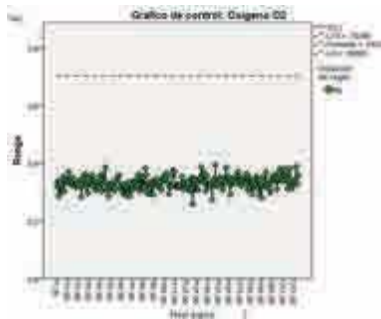


Figura 4b

Diagrama de Control para el rango

Fuente: Los autores

Los límites de control obtenidos pueden utilizarse como referencia las emisiones de oxígeno en un vehículo en buen estado de motor.

Resultados con fallas

En esta sección se realiza la validación de los límites de control para las emisiones promedio obtenidos en la sección anterior ante la presencia de fallas, es decir, se evalúa la sensibilidad de los límites de control ante variaciones inducidas en el sistema de combustión del vehículo. Se presenta para cada gas analizado un diagrama en el que se trazan los límites de control obtenidos, y se representan también las emisiones de los gases sin falla.

Monóxido de Carbono CO

Al examinar los gráficos, se observa claramente que la falla 1 (presión del combustible a 60 PSI), produce emisiones de monóxido de carbono superiores a las emisiones ocasionadas por las otras dos, alcanzando un máximo de 4.05%. De hecho, con las tres fallas inducidas al motor las emisiones superan significativamente los límites de control. En la figura 5b, se representan también las mediciones de las emisiones promedio de CO sin falla, y las oscilaciones de las emisiones en presencia de fallas difieren significativamente del patrón de las emisiones sin falla.

Al comparar las emisiones máximas reportadas con cada tipo de falla con un valor máximo permitido (por ejemplo, en Ecuador), se evidencia que los tres tipos de falla superan este umbral, siendo los valores obtenidos en presencia de las fallas 1 y 3 los más nocivos.

Hidrocarburos HC

Al examinar las figuras 6a y 6b, se observa claramente que la falla 1 (presión del combustible a 60 PSI), produce emisiones de hidrocarburos superiores a las emisiones ocasionadas por las otras dos fallas. En

general, las emisiones de hidrocarburos están por encima del límite superior de control con la falla 1, alcanzando un máximo de 276.71 ppm. Las fallas 2 y 3 exhiben un comportamiento con grandes variaciones o fluctuaciones, que sugieren que el proceso de emisiones de hidrocarburos está fuera de control. Se observan numerosas mediciones consecutivas por debajo de la línea central, por debajo del límite inferior de control y por encima de la media, que denotan sin duda fallas.

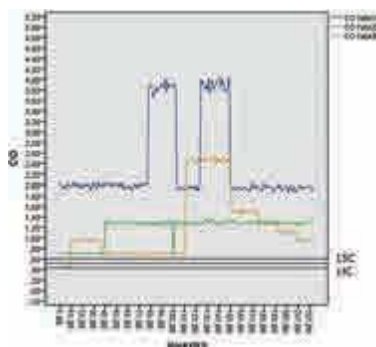


Figura 5a
Emisiones de Monóxido
de Carbono con fallas

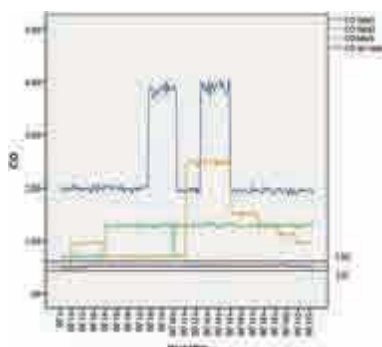


Figura 5b
Comparación de las emisiones
de Monóxido de Carbono con fallas
y en condiciones normales

Fuente: Los autores

Cuando se grafican las emisiones de hidrocarburos en condiciones normales, se evidencia que las fluctuaciones de las emisiones difieren significativamente. En condiciones óptimas de funcionamiento las emisiones de hidrocarburos son muy homogéneas, mientras que ante la presencia de fallas la dispersión aumenta drásticamente.

Los tres tipos de falla superan umbral permitidos en Ecuador, siendo la falla 1 la que arroja los valores más significativos, representando un alto índice de contaminación. Con las fallas 2 y 3 se supera el umbral de 220 ppm alcanzando valores 223.22 y 222.99 ppm respectivamente.

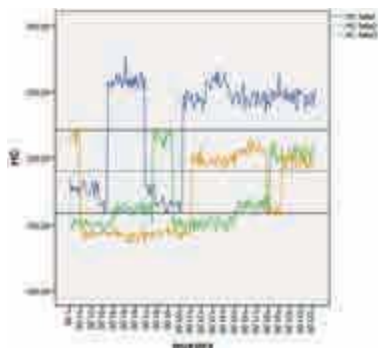


Figura 6a
Emisiones de hidrocarburos con fallas

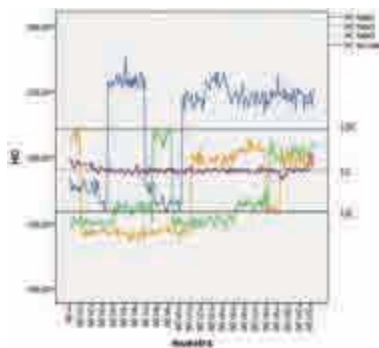


Figura 6b
Comparación de las emisiones
de hidrocarburos con fallas
y en condiciones normales

Fuente: Los autores

Dióxido de Carbono CO₂

Al examinar figuras 7a y 7b se observa que los tres tipos de fallas presentan mediciones por debajo y por encima de los límites de control. Con las fallas 1 y 2 (variaciones en la presión del combustible) las emisiones de CO₂ son superiores que las producidas u ocasionadas con la falla 3. Al comparar las emisiones con las reportadas en condiciones óptimas de funcionamiento, el movimiento o patrón de dichas emisiones difieren significativamente, y sugieren fallas (existen rechas y corrimientos). Con la falla 3 (bajo voltaje de encendido) las emisiones fuera de control se detectan por debajo del límite inferior, y sólo un par de mediciones muy cerca del límite superior de control.

Oxígeno O₂

Al analizar el comportamiento de las emisiones de oxígeno de las figuras 8.a y 8.b, ante la presencia de fallas, el patrón de las emisiones no escapa a la descripción realizada para el monóxido de carbono, hidrocarburos y dióxido de carbono. Se detecta que con la falla 1 las emisio-

nes de oxígeno disminuyen significativamente, y las mediciones en su totalidad se localizan por debajo del límite inferior de control. La falla 2 presenta un patrón muy particular, ya que se tiene un conjunto de mediciones por encima de la línea central, y por debajo del límite inferior de control. La falla 3 en general produce emisiones por debajo del límite inferior de control, y sólo al inicio de la prueba y al final de la misma se registran emisiones por debajo de la línea central y encima de ésta.

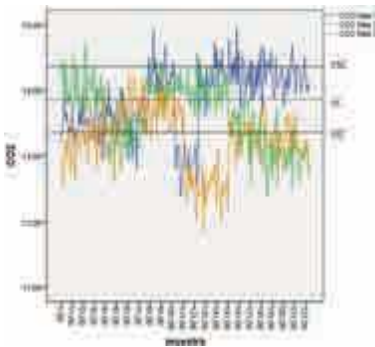


Figura 7a
Emisiones de Dióxido
de Carbono con fallas

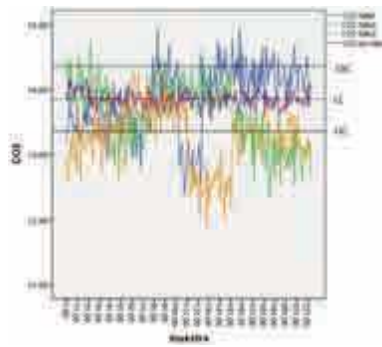


Figura 7b
Comparación de las emisiones
de Dióxido de Carbono con fallas
y en condiciones normales

Fuente: Los autores

Respecto a las emisiones en condiciones normales, éstas se ubican muy cerca de la línea central. Las fallas inducidas ocasionan cambios en las emisiones de oxígeno de magnitud considerable.

Un resumen de los valores máximos obtenidos se detalla en la tabla 3, estos se presentan de acuerdo a la codificación establecida y se observa que el aumento en la presión del combustible (1) y un bajo nivel de voltaje en el encendido (3) son las fallas que arrojan los valores de emanaciones más altos.

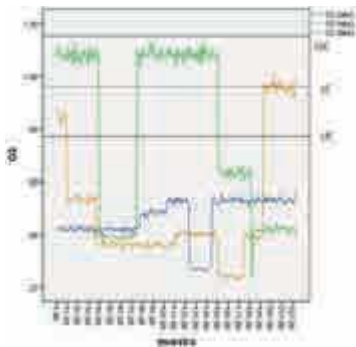


Figura 8a
Emisiones de Oxígeno con fallas

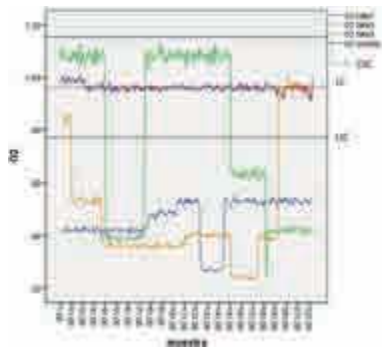


Figura 8b
Comparación de las emisiones
de Oxígeno con fallas y en condiciones
normales

Fuente: Los autores

Tabla 3
Valores máximos obtenidos para cada variable en estudio

Código	% CO	ppm HC	% CO ₂	% O ₂
0	0.55	203.14	14.17	1.01
1	4.05	276.71	14.95	0.55
2	1.36	223.22	14.72	1.13
3	2.56	222.99	14.35	1.01

Fuente: Los autores

Conclusiones

En esta investigación se presentó una propuesta novedosa de análisis de las emisiones de gases contaminantes generados por fallas en motores de encendido por chispa, donde se muestra una extensión provechosa de las cartas de control que permite establecer rangos de operación normal y límites permisibles de contaminación generada a partir de los gases de escape emanados por éstos.

En función de los resultados obtenidos en esta investigación, se puede determinar que el aumento en la presión del combustible (falla 1) y un bajo nivel de voltaje en el encendido (falla 3) son las fallas que arrojan los valores de emanaciones más altos y bajos respectivamente.

El aumento de la presión del combustible (falla 1) representa los valores más altos registrados de emanaciones contaminantes, así como también los cambios más bruscos detallados en el cuadro de variables. Al momento de ocurrir algún desperfecto que genere un aumento en la presión del combustible, la cantidad de agentes contaminantes generados en el sistema de combustión y que son liberados a través del sistema de escape al medio ambiente, serán mayores, por lo que esta podría definirse como una falla crítica dentro del sistema debido al impacto que genera en el ecosistema.

Por su parte, contar con un bajo nivel de voltaje en el encendido (falla 3) genera que el proceso de combustión no se lleve a cabo correctamente. Es por ello, que en las mediciones realizadas los valores determinados se encontraron en su mayoría por debajo de los límites de control, lo que se traduce en que las emanaciones de agentes contaminantes es muy baja y resulta beneficioso para el medio ambiente; pero en realidad, el que éstos valores estén por debajo de los límites de control representan fallos mayores en el vehículo, ya que al no realizarse el proceso de combustión correctamente se podría presentar una cadena de fallas en los demás sistemas del vehículo a partir de esto.

Las cartas de control utilizadas en esta investigación representan un mecanismo de inspección alternativo para la medición de agentes contaminantes, y se ha realizado una aplicación de control estadístico de calidad en un entorno diferente a los sistemas de producción en línea, para los cuales han sido utilizados comúnmente.

Agradecimientos

La presente investigación agradece al Vicerrectorado de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana y al grupo de Investiga-

ción en Ingeniería de Transporte GIIT por su aporte al desarrollo de la misma.

Referencias bibliográficas

- Aslam, M., Arif, O. H., & Jun, C. H. (2017). *A New Control Chart for Monitoring Reliability Using Sudden Death Testing Under Weibull Distribution*. IEEE Access, 5, 23358-23365.
- Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. Octava Edición. México D.F.: Pearson Education.
- Gupta, S., Maiti, J., Kumar, R., & Kumar, U. (2009). A control chart guided maintenance policy selection. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3), 216-226.
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2009). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. Tercera Edición. México: Editorial McGraw Hill.
- IBM Statistics SPSS (2017). IBM Statistics SPSS versión 20. Versión 20 de prueba. Disponible en: <https://goo.gl/BrhqsB>
- Kisić, E., Đurović, Ž., & Petrović, V. (2017). Predictive Maintenance Based on Control Charts Applied at Thermoelectric Power Plant. In: *Recent Improvements of Power Plants Management and Technology*. InTech, 27-48.
- Montgomery, D. (2008). *Control estadístico de la calidad*. Tercera Edición. México: Limusa Wiley.
- Quintana, E., Pisani, V., & Casal, N. (2015). Desempeño de cartas de control estadístico con límites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1), 143-156.
- Rivera, N., García L., Aguilar Y., & Tandazo A. (2017) Análisis de modos de fallas, efectos y criticidad del sistema de inyección del motor C14NE. En: Cristian García, Juan Diego Valladolid, Mary Vergara y Francklin Rivas (Eds.), *Desarrollo tecnológico en ingeniería automotriz* (pp. 249-287). Cuenca: Editorial Universitaria Abya-Yala.
- Vargas, J., & Montaña, T. (2005). Carta de Control CEV \bar{X} para Distribuciones Weibull con Datos Censurados. *Revista Colombiana de Estadística*, 28(2), 125-139.
- Xie, M. Goh, T.N., & Ranjan, P. (2002). Some Effective Control Chart Procedures for Reliability Monitoring. *Reliability Engineering and System Safety*, 77, 143-150.

Zhou, W., Zheng, Z., & Xie, W. (2017). A control-chart-based queueing approach for service facility maintenance with energy-delay tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 261(2), 613-625.

Capítulo 3

Movilidad

Determinación de los ciclos de conducción de un vehículo categoría M1 para la ciudad de Cuenca

Javier Vázquez Salazar¹

Pablo Pérez Llanos²

Christian Quito Sinchi³

Resumen

Este artículo presenta la obtención del Ciclo de Conducción de un vehículo de categoría M1 para la Ciudad de Cuenca basado en metodologías aplicadas en ciudades como: Boston, Ciudad de México, Bogotá, etc. A partir de la matriz origen-destino de los principales viajes en la ciudad, se establece una asignación de tránsito, para posteriormente determinar las vías de mayor incidencia en la movilidad de la ciudad. Una vez establecidas las rutas, se estiman los parámetros característicos para la obtención del ciclo tales como: velocidad media, velocidad máxima, número de paradas, tiempo total de manejo, tiempo en ralentí, distancia recorrida, aceleración promedio, aceleración positiva máxima, tiempo de aceleración, proporción del tiempo de conducción en modo ralentí y proporción del tiempo de conducción en modo de aceleración. Mediante el uso de un dispositivo GPS se obtiene un total de 120 recorridos, tanto en horas pico y valle, con el fin de obtener datos de posición, altitud, tiempo y velocidad. Una vez recopilados los datos de los 120 recorridos, se realiza un análisis estadístico por medio del criterio de ponderaciones, determinando el Ciclo de Conducción representativo para la Ciudad de Cuenca.

Palabras clave

Asignación de tráfico, ciclo de conducción, matriz, parámetros.

Abstract

This article presents the obtaining of the Driving Cycle of a vehicle of category M1 for the Cuenca City based on methodologies applied in cities such as Boston, Mexico City, Bogotá, etc. From the origin-

-
- 1 Maestro en Ingeniería de Tránsito y Transporte. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente e Investigador del grupo de Investigación de Ingeniería y Transporte (GIIT). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. jvazquez@ups.edu.ec
 - 2 Estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. pperezl@est.ups.edu.ec
 - 3 Estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. cquitos@est.ups.edu.ec

destination matrix of the main trips in the city, a transit assignment is established, to later determine the routes with the greatest incidence in the mobility of the city. Once the routes have been established, the characteristic parameters for obtaining the cycle are estimated such as: average speed, maximum speed, number of stops, total driving time, idle time, distance traveled, average acceleration, maximum positive acceleration, time of acceleration, proportion of driving time in idle mode and proportion of driving time in acceleration mode. Through the use of a GPS device, a total of 120 routes are obtained, both during peak and valley hours, in order to obtain position, altitude, time and speed data. Once the data of the 120 routes have been collected, a statistical analysis is carried out by means of the weighting criterion, determining the representative Driving Cycle for the Cuenca City.

Keywords

Traffic assignment, driving cycle, matrix, parameters.

Introducción

Los ciclos de conducción se reflejan a través de gráficas de velocidad y tiempo, que representan el comportamiento de un manejo típico dentro de una localidad determinada, considerando el tipo de tráfico, distancia, tipo de vía, entre otros.

Los ciclos de conducción sirven para la estimación de emisiones contaminantes atmosféricos, mediante medición de gases de escape (Osses y Rojás, 2003).

Según el Laboratorio de Investigación de Transporte (TRL) hasta 2009 se han presentado el estudio de 256 ciclos de conducción a nivel mundial, de las cuales se han desarrollado para diferentes vehículos, entre ellos; livianos, furgonetas, camiones, autobuses y motocicletas (Barlow *et al.*, 2009).

Los Ciclos Americanos (FTP 72 y FTP 75) y Ciclos Europeos (ECE + EUDC 15 y NEDC) son los más importantes, debido a que sirven de referencia para la obtención de diferentes comportamientos alrededor del mundo.

En Latinoamérica se debe destacar la obtención de ciclos de conducción en grandes ciudades como: Santiago de Chile, Bogotá, Colombia, México D.F. y San José de Costa Rica.

En el Ecuador se ha obtenido el ciclo de conducción en la ciudad de Quito, en la cual establece en: ciudad, carretera y combinado, es decir según el tipo de vía considerando, sea esta calle o avenida (Quinchimbla y Solís, 2017).

En la actualidad existen varios estudios relacionados a este tema dentro de la ciudad de Cuenca, con relación a vehículos motorizados podemos mencionar la obtención de ciclos para autobuses y taxis (García y Llerena, 2011; Astudillo, 2016; Luna y Gálvez, 2016; Dávalos, 2017).

Por tal motivo se considera establecer el ciclo de conducción para vehículos particulares M1, establecidos a partir de los datos de estudios origen-destino desarrollado por el GAD Municipal de Cuenca para el año 2016.

Fundamentos teóricos

Ciclo de conducción

Un ciclo de conducción es un conjunto de tiempos y velocidades dados en diferentes periodos, que provienen de información estadística, dentro de un área de estudio (Osses y Rojas, 2003).

Se exige la recolección experimental en los recorridos de la velocidad del automóvil en función del tiempo durante su trayecto y/o travesía por las diferentes calles y avenidas de una localidad.

Técnicas de instrumentación

Las técnicas empleadas por los diferentes estudios de ciclos de conducción a nivel mundial consideran las variables más importantes que representan la dinámica de la conducción, las cuales son: velocidad media (km/h), aceleración media (m/s^2), entre otros (Belalcazar *et al.*, 2013).

Para la recolección de datos experimentales de estos parámetros representativos se emplean técnicas como:

Técnica a bordo (On-Board)

Esta técnica permite la recolección de datos de conducción reales que realiza el conductor por medio de la instrumentación del vehículo como aparatos de medición de tiempo, velocidad, aceleración, etc. (Quinchimbla y Solís, 2017).

Técnica de persecución de vehículo

Denominada como técnica del vehículo libre, consiste en el uso de un vehículo “caza” y un vehículo “objetivo” en la cual el “caza” sigue al “objetivo” dentro de una ruta determinada, en donde se trata de emular la forma de conducción del vehículo “objetivo” constituyendo así una mejor representación de manejo (Johnson *et al.*, 1975).

Método de obtención

Para la obtención de datos existen dos métodos:

El *método directo*, radica en seleccionar un trayecto de tráfico real representativo bajo diferentes condiciones de circulación, realizar varios recorridos dentro de la misma ruta, obtener las curvas realizados en cada uno de ellos y finalmente seleccionar la curva que mayor representación tenga en la ruta mediante análisis estadístico.

El *método indirecto* consiste en el procesamiento inicial de los datos donde con esta acción se busca obtener la información necesaria para construir un ciclo de conducción representativo. (Borja Pintos, 2011).

Instrumentación

Existen instrumentos como el GPS, quinta Rueda y Receptor electrónico de datos (Turbo gauge), de las cuales el equipo más recomenda-

do es el GPS, debido a que puede mostrar diversa información detallada en intervalos de tiempo, distancia, velocidad, etc. (Valdez, 2004).

Selección de vías

Existen varios criterios para la selección de rutas, donde consiste en realizar los recorridos que logren representar condiciones reales de conducción en la ciudad tales como: rutas representativas de la Ciudad, según el tipo de vía, vías con mayor flujo vehicular (vías primarias), vías con menor flujo vehicular (vías secundarias), lugares más destinados en la ciudad según el grado de saturación, etc. (Valdez, 2004).

Materiales y métodos

Selección de rutas

Dentro de la asignación de rutas, se tomó en cuenta lo siguiente:

- Se establece la matriz origen-destino, a través del estudio de movilidad de la ciudad.
- Se sectoriza la ciudad, con un total de 24 centroides distribuidos de acuerdo a los barrios.
- Avenidas principales que crucen la ciudad tanto en sentido norte-sur, este-oeste y viceversa.
- Rutas que atraviesen y cubran la ciudad.
- Según las rutas con mayor m de la asignación de tráfico realizado en software como se indica en la Figura 1 en base de una matriz O-D de 24 x 24.
- El centro histórico es el mayor atractor de viajes en la ciudad, por esta razón la mayor cantidad de viajes atraviesan este lugar.

Figura 1
Asignación de tráfico en el centro histórico



Fuente: Los autores

A partir de la asignación de tráfico en la ciudad se puede establecer un total de diez rutas que tratan de cubrir toda la ciudad tanto en sentido norte-sur, este-oeste y viceversa. En la Tabla 1 se presentan las rutas establecidas de acuerdo a los siguientes orígenes y destinos:

Tabla 1
Orígenes y destinos para cada ruta

Ruta	Origen	Destino
1	Control Sur A	Basílica A
2	Narancay	Feria Libre A
3	Control Sur B	El Descanso A
4	Pumapungo A	Miraflores
5	Pumapungo B	Feria Libre B
6	Américas / Norte	Ricaurte
7	Cajas	El Descanso B
8	Camino viejo a Baños	Monay
9	Basílica B	Yanuncay
10	Totoracocha	Parque Industrial

Fuente: Los Autores

En base a la información de la Tabla 1, se selecciona el recorrido que permitan cumplir las rutas planteadas, de esta forma conseguir los recorridos, como se puede apreciar en la Tabla 2, de esta forma obtener la información y datos necesarios para determinar el ciclo de conducción de la ciudad.

Tabla 2
Vías seleccionadas para la obtención de datos

Ruta	Sentido	Avenidas/Calles
1	S – N	Av. Loja, Condamine, Tarqui, Nicanor Merchán, Av. Chofer
	N – S	Av. Del Chofer, Nicanor Merchán, Juan Montalvo, Presidente Córdova, Av. 3 de Noviembre, Av. 12 de Abril, Guayas, Av. Remigio Crespo, Av. Unidad Nacional, Av. México, Av. Loja
2	S – N	Panamericana Sur, Av. De las Américas, Av. Carlos Arízaga Vega
	N – S	Av. Carlos Arízaga Vega, Av. De las Américas y Panamericana Sur
3	O – E	Autopista Cuenca- Azogues, Vía a Jadan
	E – O	Vía a Jadan, Autopista Cuenca-Azogues
4	S – N	Calle del Arupo, Av. Paraíso, Av. Guapondelig, Av. Huayna Capac, Av. Gil Ramírez Dávalos, Barrial Blanco, Av. Turuhuaico, Av. Antonio Neumane, Julio Jaramillo
	N – S	Julio Jaramillo, Av. Antonio Neumane, Av. Turuhuaico, Av. De las Américas, Barrial Blanco, Av. Huayna Cápac, Calle de las Herrerías, Calle del Arupo
5	E – O	Av. Paraíso, Av. 12 de Abril, Edwin Sacoto, Calle del Batán, General Escandón
	O – E	General Escandón, Víctor Albornoz, Av. 12 de Abril, Av. Solano, Av. Florencia Astudillo, Av. 12 de Abril, Av. Paraíso
6	O – E	Gran Colombia, Av. De las Américas, Panamericana Norte, Vía a Ricaurte
	E – O	Vía a Ricaurte, Panamericana Norte, Av. De las Américas, Gran Colombia
7	O – E	Av. Ordoñez Lasso, Av. Unidad Nacional, Av. 3 de Noviembre, Mariscal Sucre, Juan José Flores, Av. Paseo de los Cañaris, Av. Gonzales Suárez, Panamericana Norte
	E – O	Panamericana Norte, Av. Gonzales Suárez, Octavio Díaz, Av. Hurtado de Mendoza, Núñez de Bonilla, Vega Muñoz, Abraham Sarmiento, Gran Colombia, Av. Ordoñez Lasso

8	O – E	Primero de Mayo, 24 de Mayo
	E – O	24 de Mayo, Primero de Mayo
9	N – S	Av. Abelardo J. Andrade, Luis Cordero, Av. Héroes de Verdeloma, Presidente Borrero, Rafael María Arízaga, Benigno Malo, Av. Solano
	S – N	Av. Solano, Av. del Estadio, Av. Manuel J. Calle, Av. Paucarbamba, Subida de Todos Santos, Alfonso Jerves, Vargas Machuca, Honorato Vázquez, Luis Cordero, Av. Abelardo J. Andrade
10	S – N	Los Andes, Hurtado de Mendoza, Av. España, Av. De las Américas, Camino a Patamarca
	N – S	Camino a Patamarca, Av. De las Américas, España, Hurtado de Mendoza, Los Andes

Fuente: Los autores

Para la recolección de datos se realizará 120 recorridos en base a las vías planteadas de la Tabla 2.

Para la obtención de datos se utiliza la técnica de vehículo libre, considerando que permite conocer el comportamiento vial en base al tráfico establecido, sin embargo para recopilar la información se cuenta con un sistema GPS, que permite guardar toda la información generada.

Parámetros característicos del ciclo

Los parámetros seleccionados, serán de acuerdo a los que fueron utilizados en la obtención del ciclo de conducción en diferentes ciudades tales como: San José-Costa Rica, Naucalpán-México, Quito-Ecuador, entre otros, por la cual se ha decidido en utilizar once variables recomendadas que se muestran a continuación:

Tabla 3
Parámetros para la obtención de ciclos
de conducción (Barlow *et al.*, 2009)

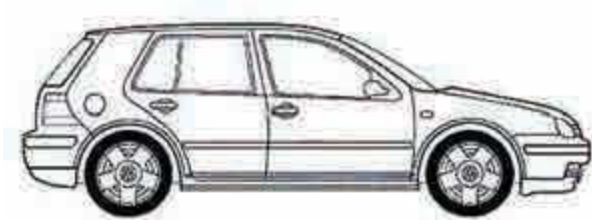
Parámetros	Unidad
Velocidad media del ciclo completo incluyendo los periodos en modo ralentí, v_l	km/h
Velocidad Máxima, $\frac{dv}{dt}$	km/h
Número de paradas, N	-
Tiempo total de manejo, T_{manejo}	s
Tiempo en ralentí, $T_{ralentí}$	s
Distancia Recorrida, $D_{recorrida}$	m
Aceleración promedio de todas las fases de aceleración, a	m/s ²
Aceleración positiva máxima, a_{max}	m/s ²
Tiempo de aceleración, $T_{aceleración}$	s
Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí, P_i	%
Proporción del tiempo de conducción en modo de aceleración, P_a	%

Fuente: Los autores

Selección del vehículo

Considerando la NTE INEN 2656, se utiliza un vehículo de categoría M1, como se indica en la Figura 2, es decir transporte de no mayor de 8 asientos además del asiento del conductor y que tengan 3 o 5 puertas y ventanas laterales detrás del conductor) (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2016).

Figura 2
Vehículo de pruebas



Fuente: Los autores

Instrumentación toma de datos

Mediante el uso del GPS se podrá obtener datos que sirven para la obtención de los parámetros del ciclo, como: longitud de ruta, velocidad máxima, velocidad media, velocidad media de movimiento y tiempo de recorrido.

El dispositivo GPS utilizado es el Garmin GPSMAP® 64 como se indica en la Figura 3, catalogado como GPS de alta sensibilidad, de identificación rápida y de gran capacidad de recepción, es decir, localiza la posición de forma rápida y precisa

Figura 3
Garmin GPSMAP® 64



Fuente: Los autores

Levantamiento de datos

Los 120 recorridos se realizaron de lunes a viernes de 6:30 a 14:30. Aprovechando dos grupos de horas pico; de 6:30 a 9:00 y 12:00 a 14:00 y un grupo de horas valle; de 9:00 a 12:00, dentro de un periodo de 3 semanas.

Dentro de las pruebas se consideraron inconvenientes como:

- Obstaculización de la vía por obras.
- Obstaculización de la vía por accidente de tránsito.
- Obstaculización de la vía por marchas, protestas, etc.

Todos esos factores mencionados involucran a que se modifiquen la circulación vehicular de la vía, en caso que se den esos casos, se procede a detener las pruebas y esperar a que todo vuelva a la normalidad, debido a que cada prueba debe ser semejante a la anterior y ser lo más apegado a la realidad del tráfico local.

Análisis de resultados

El valor asignado en los parámetros corresponde a la importancia de cada uno de ellos, los pesos de ponderación van para cada una de las variables en escala de 0 a 1 (0 el menos importante, 1 el más importante), el valor de cada parámetro asignado serán en múltiplos de 0.25 (Valdez, 2004), a continuación en la Tabla 4 se determinarán los pesos de ponderación para cada uno de los parámetros establecidos anteriormente:

Tabla 4
Tabla de ponderaciones para cada uno de los parámetros (Valdez, 2004)

Parámetro	Peso de la ponderación W_i
v_l	1
v_{max}	0,25
N	0,25
T_{manejo}	1

Parámetro	Peso de la ponderación W_i
$T_{ralentí}$	0,75
$D_{recorrida}$	1
a	1
a_{max}	0,75
$T_{aceleración}$	0,25
P_i	1
P_a	1
Total	8,25

Fuente: Los autores

Mediante la ecuación siguiente, se selecciona el menor valor Y , debido a que representa una menor desviación con respecto a la media.

$$Y = \frac{w_i * \frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}}}{\text{Total de ponderaciones}}$$

Donde:

γ : Promedio ponderado de las desviaciones de todos los parámetros con respecto a la media aritmética.

W_i : Factor de ponderación para cada promedio.

$P_{i,j}$: Valor del parámetro i , para la curva experimental j .

\bar{P} : Promedio del parámetro i de las curvas registradas.

$\frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}}$: Desviación respecto a la media con valor absoluto.

A continuación como ejemplo se detallará la aplicación de la Ecuación 1, en este caso para tres recorridos elegidos aleatoriamente.

Se ingresan los valores de cada uno de los parámetros $P_{i,j}$ y se calcula el promedio \bar{P} para cada uno ellos.

Tabla 5
Obtención del promedio en cada parámetro

Especificación	Detalle			
Recorrido	1	2	3	Promedio
v_l	14,9	20,3	18,74	17,98
v_{max}	51	47	53	50,33
N	24	13	17	18
T_{manejo}	1320	1208	1019	1182
$T_{ralentí}$	422	221	357	333
$D_{recorrida}$	7210	8125	7163	7499,33
a	0,44	0,51	0,6	0,52
a_{max}	5,83	2,78	5,22	4,61
$T_{aceleración}$	816	749	577	714
P_i	76	85	74	78
P_a	47	52	42	47

Fuente: Los autores

- Se calcula la desviación respecto a la media con valor absoluto $\frac{|P_{i,j}-\bar{P}|}{\bar{P}}$ en cada uno de los parámetros.

Para el caso de la velocidad media del recorrido 1:

$$\frac{|P_{i,j}-\bar{P}|}{\bar{P}} = \frac{|14,90 - 17,98|}{17,98} = 0,171$$

Así mismo se aplica para cada uno de los parámetros de los diferentes recorridos hasta obtener la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6
Ejemplo de cálculo de la desviación respecto a la media

Especificación	Detalle		
Recorrido	1	2	3
v_l	0,171	0,129	0,042
v_{max}	0,0	0,066	0,053
N	0,333	0,278	0,056
T_{manejo}	0,116	0,022	0,138
$T_{ralentí}$	0,266	0,337	0,071
$D_{recorrida}$	0,039	0,083	0,045
a	0,143	0,015	0,159
a_{max}	0,265	0,398	0,133
$T_{aceleración}$	0,143	0,049	0,192
P_i	0,03	0,082	0,052
P_a	0,005	0,114	0,109

Fuente: Los autores

- Se calcula el valor "Y" para cada uno de los parámetros y finalmente se realiza una suma para cada recorrido obteniendo un valor Y definitivo.

Para el caso de la velocidad media del recorrido 1:

$$Y = \frac{w_i * \frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}}}{\text{Total de ponderaciones}}$$

$$Y = \frac{0,25 * 0,171}{8,25} = 0,025$$

Así mismo se aplica para cada uno de los parámetros de los diferentes recorridos hasta obtener la Tabla 7 a continuación:

Tabla 7
Determinación del valor Y para cada recorrido

Especificación	Detalle		
Recorrido	1	2	3
v_l	0,025	0,019	0,006
v_{max}	0	0,002	0,002
	0,012	0,01	0,002
T_{manejo}	0,017	0,003	0,02
$T_{ralentí}$	0,03	0,037	0,008
$D_{recorrida}$	0,006	0,012	0,007
a	0,021	0,002	0,024
a_{max}	0,029	0,044	0,015
$T_{aceleración}$	0,005	0,002	0,007
P_i	0,001	0,003	0,002
P_a	0,0002	0,0042	0,004
Total Y	0,148	0,14	0,097

Fuente: Los autores

Como podemos apreciar en la Tabla 7, una vez realizado el cálculo del promedio ponderado de las desviaciones de todos los parámetros con respecto a la media aritmética "Y" para cada parámetro, se elige el valor mínimo del total calculado, la cual representa una menor desviación con respecto a la media, dando como resultado que el ciclo de conducción entre los recorridos seleccionados corresponde al número 3 con un valor Y de 0,097.

Resultados y discusión

Recopilación general de recorridos

A continuación en la Tabla 8 se muestra una síntesis general del tiempo total de manejo comprendido, dentro de las horas pico y valle:

Tabla 8
Tiempo total de manejo en horas pico y Valle

Nro. de recorridos realizados por etapa	Tiempo de Recorrido Hora Pico (s)	Tiempo de Recorrido Hora Valle (s)
18	11 197	6 486
18	11 903	7 075
12	7 780	7 121
14	5 147	6 001
8	10 828	10 915
12	2 540	9 495
14	12 405	9 038
18	10 223	6 405
6	00	4 710
120	72 023	67 246
Tiempo Total de Manejo (s)		139 269

Fuente: Los autores

En la Tabla 9 se muestra la distancia total recorrida tanto para horas pico como valle.

Tabla 9
Distancia total recorrida

Hora	Distancia Recorrida (m)
Pico	620 419
Valle	622 113
TOTAL	124 2532

Fuente: Los autores

En síntesis se realizó un recorrido total de 1 242.5 km en un tiempo de 38.9 horas de estudio.

Ciclo de conducción representativo para la ciudad de Cuenca

El ciclo de conducción para la ciudad de Cuenca obtenido, corresponde al tramo planteado de la Ruta 8. Empieza su recorrido en el Hospital del IESS hasta el Puente de Misicata, atravesando a la parte sur de la ciudad en sentido este-oeste, con una distancia de 10,5 km con un tiempo total de 1 168 s, realizado en hora pico.

Figura 3
Ciclo de conducción representativo para la ciudad de Cuenca



Fuente: Los autores

Tabla 10
Parámetros característicos
del ciclo de conducción representativo de Cuenca

Parámetro	Valor	Unidad
v_l	26,09	km/h
v_{max}	61,00	km/h
N	12	-
T_{manejo}	1168	s

Parámetro	Valor	Unidad
$T_{ralenti}$	280	s
$D_{recorrida}$	10494,00	m
a	0,88	m/s^2
a_{max}	4,72	m/s^2
$T_{aceleración}$	530	s
P_i	81	%
P_a	36,60	%

Fuente: Los autores

Comparación el ciclo obtenido con los ciclos americanos y europeos

Se puede observar en la Tabla 13 y Tabla 14 que el ciclo obtenido para la ciudad de Cuenca, es similar con los ciclos americanos (FTP 72 y FTP 75) y ciclos europeos (ECE + EUDC 15 y NEDC), con respecto a cada uno de los parámetros obtenidos, además se tratan de ciclos combinados, tanto en tramos lentos como rápidos, cualidades que también están presentes en el ciclo de la ciudad.

Tabla 11
Comparación del ciclo obtenido con los ciclos americanos

Parámetros	Cuenca	FTP-72	FTP-75
v_l	26,09	31,6	34,2
v_{max}	61	91,15	91,09
N	12	14	16
T_{manejo}	1168	1180	1633
$T_{ralenti}$	280	189	241

$D_{recorrida}$	10494	11996,85	17786,59
a	0,88	0,429	0,42
a_{max}	4,72	4.307	4,197
$T_{aceleración}$	530	506	683
P_i	81	81	87,14
P_a	36,6	36,6	36,45

Fuente: Los autores

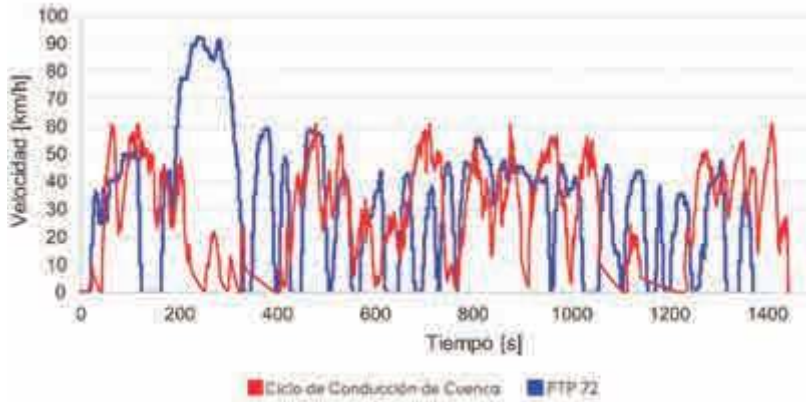
Tabla 12
Comparación del ciclo obtenido con los ciclos europeos

Parámetros	Cuenca	ECE + EUDC 15	NEDC
v_l	26,09	32,5	33,6
v_{max}	61	120,09	120,09
N	12	14	14
T_{manejo}	1168	965	939
$T_{ralenti}$	280	255	241
$D_{recorrida}$	10494	11016,63	11016,63
a	0,88	0,324	0,528
a_{max}	4,72	2,909	0,224
$T_{aceleración}$	530	331	278
P_i	81	79,1	79,58
P_a	36,6	27,13	23,56

Fuente: Los autores

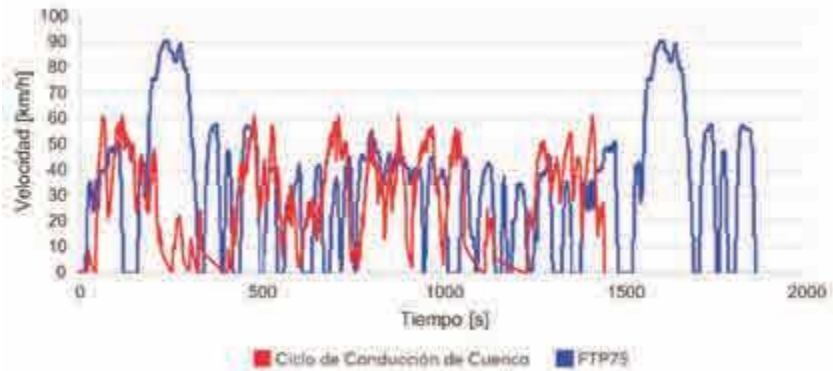
A continuación se realiza una comparación gráfica del ciclo obtenido con los americanos y europeos.

Figura 4
Comparación Ciclo de Conducción Cuenca - FTP 72



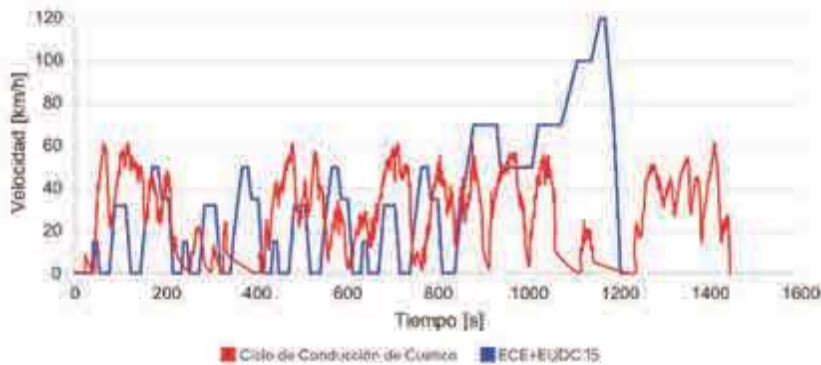
Fuente: Los autores

Figura 5
Comparación Ciclo de Conducción Cuenca - FTP 75



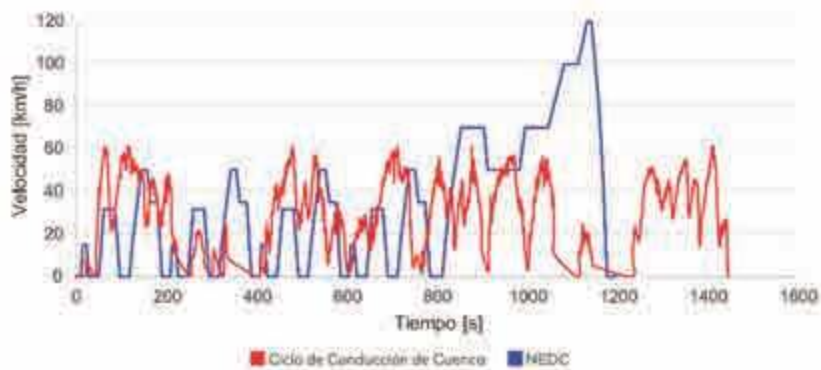
Fuente: Los autores

Figura 6
Comparación Ciclo de Conducción Cuenca – ECE + EUDC 15



Fuente: Los autores

Figura 7
Comparación Ciclo de Conducción Cuenca – NEDC



Fuente: Los autores

Conclusiones

A partir de la información obtenida de la movilidad de Cuenca, mediante el uso de una matriz origen- destino, se pudo determinar los principales lugares generadores y atractores de viajes de la ciudad. Mediante la aplicación del modelo de asignación de viajes se logró establecer la movilidad mediante un total de 10 rutas que consistió en cubrir en totalidad a la Ciudad de Cuenca tanto en sentido norte-sur, este-oeste y viceversa.

Para la obtención de datos, se optó por utilizar el método directo, realizando una conducción normal mediante el método del vehículo libre por las calles de la Ciudad, mostrando así el comportamiento real de manejo de parte de los usuarios al momento de enfrentar al tráfico urbano.

Mediante un dispositivo GPS, se recopiló diferentes parámetros como: posición, tiempo y velocidad, estableciendo una tabla general de datos, con un recorrido total de 1 242.5 km en 38.9 horas de manejo.

El método estadístico seleccionado a través del criterio de ponderación en cada uno de los parámetros establecidos, permitió determinar el ciclo de conducción para cada una de las rutas determinadas y estipular un ciclo representativo para la ciudad de Cuenca.

El ciclo de conducción para la Ciudad de Cuenca obtenido, pertenece al tramo que corresponde a la Ruta 8, que empieza desde el Hospital del IESS hasta el Puente de Misicata, atravesando a la parte sur de la ciudad en sentido este-oeste, con una distancia de 10,5 km con un tiempo total de 1 168 s, realizado en hora pico.

Por medio de los parámetros de ciclos escogidos, se pudieron realizar una comparación con los Ciclos Americanos (FTP 72 y FTP 75) y Ciclos Europeos (ECE + EUDC 15 y NEDC), pudiendo verificar similitudes en cada uno de los parámetros.

Bibliografía

- Astudillo Bravo, R. F. (2016). *Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca*. Cuenca.
- Auto-Data, «Auto-Data.Net,» 2002. Disponible en <https://goo.gl/VmS6kX>
- Barlow, T. J., Latham, S., McCrae, I. S. y Boulter, P. G. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. TRL Limited.
- Belalcazar, L. C., Acevedo, E., Osses, M. y Rojas, N. (2013). *Construcción de los ciclos de conducción de Bogotá para la estimación de factores de emisión vehiculares y consumos de combustible*. Bogotá.
- Borja Pintos, G. d. (2011). *Desarrollo de una metodología para generación de ciclos de conducción representativos del tráfico real urbano. Aplicación para medida de emisiones en banco de rodillos*. Madrid.
- Dávalos Figueroa, D. S. (2017). *Obtención de un ciclo típico de conducción para los vehículos de la unión de taxistas del Azuay, Cuenca*.
- García Tobar, M. O. y Llerena Salinas, J. I. (2011). *Análisis de los impactos en seguridad, medio ambiente y congestión de tráfico, generados por el transporte urbano dentro de la ciudad de Cuenca*. Cuenca.
- Jhonson, T., Formenti, D., Gray, R. y Paterson, W. (1975). *Measurement of Motor Vehicle Operation Pertinent to Fuel Economy*. SAE Technical Paper 750003.
- Luna Oyola, B. A. y Gálvez Sandoval, E. J. (2016). *Análisis de consumo de combustible de los vehículos de categoría M1 que circulan en el centro histórico de la ciudad de Cuenca en horas de máxima demanda en función de ciclos de conducción*. Cuenca.
- Osses, M. y Rojas, D. (2003). *Determinación experimental de ciclos de conducción de vehículos livianos para la ciudad de Santiago*. Santiago.
- Quinchimbla Pisuña, F. E. y Solís Santamaría, J. M. (2017). *Desarrollo de ciclos de conducción en ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real del combustible de un vehículo con motor de ciclo Otto en el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 2656, Quito, 2016.
- Valdez Aguilera, A. (2004). *Desarrollo de ciclos de conducción vehicular en el Municipio de Naucalpan-Edición Única*. Atizapán de Zaragoza: Tecnológico de Monterrey.

Estado del arte sobre determinación de costos en externalidades de la movilidad en vehículos privados

Carlos Wladimir Roche Intriago¹

Resumen

El presente estudio formaliza una compilación en la determinación de costos, en externalidades de la movilidad en vehículos privados, se realiza una investigación de carácter general poniendo a consideración los diversos enfoques de varios investigadores, donde se ha aplicado o realizado propuestas con el fin de implementarlos, como se desarrollan en ciudades del mundo, para la determinación de valores agregados a los procesos de expansión urbana.

Este trabajo presenta una introducción a la movilidad, elaborando una lectura de resultados en métodos sistemáticos aportando bases consistentes y a la vez innovadoras sobre metodologías que se pueden ejecutar, en el costo externo de la trasportación privada.

Por tanto, antes que elaborar modelos especulativos, este estudio proporciona numerosas e importantes contribuciones en la búsqueda de fórmulas para los costos de tiempo, medio ambiental, energético y el espacio urbano, buscando inferir las preferencias individuales en la demanda por el uso del vehículo particular, relacionando en las diferentes experiencias propuestas en ciudades del mundo, con el fin que se puedan recomendar y aplicar para la ciudad de Cuenca.

Palabras clave

Externalidad, movilidad, consumo, congestión.

Abstract

The present study formalizes a compilation in the determination of costs, in externalities of mobility in private vehicles, there is an investigation of a general nature putting consideration the various approaches of several researchers where it has been implemented or made proposals with a view to implement them as they develop in cities of the world, for the determination of aggregated values to the processes of urban expansion.

1 Magíster en Sistemas Vehiculares. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente en la carrera de Ingeniería Automotriz. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil-Ecuador. croche@ups.edu.ec

This work presents an introduction to the mobility, developing a reading of results in systematic methods providing bases consistent and at the same time innovative on methodologies that can be run to the external cost in the captivity private.

Therefore, before that develop models speculative, this study provides numerous and important contributions in the search for formulas for time costs, environmental, energy and the urban space, seeking to infer the individual preferences in the demand for the use of the particular vehicle, linking the different experiences proposals in cities of the world in order to be able to recommend and apply to the city of Cuenca.

Keywords

Externality, mobility, consumption, congestion.

Introducción

La movilidad actualmente va experimentando cambios profundos entre las múltiples modalidades de transporte, originando introducir tecnologías en sistemas de control para su desarrollo, surgiendo externalidades negativas y problemas de congestión puntualmente en el tráfico.

Hasta la fecha se han desarrollado e introducido varios métodos en proyectos de transporte, con un plan inicial de poseer soporte físico en infraestructura, estaciones de control, mismos que serán utilizados para implementar el sistema de movilidad; la recolección de información de este documento concentra su atención en la realidad que no se puede dar en el transporte privado en automóvil, los servicios y consumo que genera el usuario, valores de forma gratuita en la red de vías, caminos, calles, puentes de libre circulación, o también con pagos que no tienen nada que ver con las externalidades que produce un vehículo privado.

Por las razones enunciadas anteriormente se plantea verificar la experiencia de investigadores el costo en la valoración del tiempo de usuarios “*input*” (Martínez T., 2008) en servicios de movilidad, de forma puntual en el tiempo, haciendo que su variable tenga alta importancia por encima del coste, beneficiándose de una utilidad, considerando por medio de tarifas o preferencias al lapso de viaje en la demanda del crecimiento urbanístico en cada ciudad.

Inevitablemente estos ajustes de ampliación debido al crecimiento recuren a utilizar espacios físicos donde es notorio que se requiere el

uso de recursos naturales (agua, tierra, y quebrantamiento de entornos, etc.) para su construcción, cuyos valores deben ser considerados en las inversiones de dichas infraestructuras, estos bienes de externalidad negativa, que crea un fenómeno de saturación en el congestionamiento que cada usuario de vehículo privado asume un coste económico en el mantenimiento propio, sin considerar que al utilizar estos espacios generamos un coste de tiempo agregado, que los demás usuarios en sus vehículos no pagan (Metcalf, 2003).

En la determinación de estos valores el autor Paul Krugman introduce un factor llamado “nueva geografía económica”, enfatizada en el rendimiento de actividades localizadas en el espacio (Krugman, 1998) analizando el modelo en términos de comportamiento en externalidades, un aspecto adicional es, a través del “efecto Mohring”, una externalidad positiva establece que “una mayor disponibilidad de servicios, derivada de una demanda creciente, permite a los usuarios un mejor ajuste entre sus preferencias de horarios de salida y la oferta” que realizan determinados medios de transporte (Ibanez, & Espinoza, 2016) con el fin de no utilizar medios de transporte privados.

Tras comentar las implicaciones de este estudio que genera la economía en el transporte, la última sección de este documento aborda una posible inserción en forma de planteamiento que se pueda aplicar en la ciudad o el país.

Método

Para lograr el objetivo de este estudio, el procedimiento establecido incluye las siguientes etapas:

- Revisión del estado del arte sobre elaboraciones intelectuales acerca del tema que se ha producido en la actualidad.
- Establecer varios conocimientos de autores, clarificar investigaciones definiendo y enfocarlos en forma de proponer un método que se podría aplicar en la ciudad.

Desarrollo

La progresiva urbanización de la población, induce a una movilidad personal con acceso a los recursos, bienes y servicios acompañados socialmente de una creciente dependencia del automóvil privado, tendencia que se anexa al consumo de recursos no renovables consumiendo de manera exponencial, bosques, suelos, calidad del aire y combustibles fósiles, el efecto de crecimiento se hace más severo el problema de manera que en todo el mundo hay aproximadamente 1200 millones de vehículos (OICA, 2017), y solamente en Ecuador en el 2014 se incrementó un 57% (INEC, 2014).

Suelos

A partir de la argumentación precedente está claro que la re densificación poblacional a través de un sistema de administración urbana, brinda la generación de uso de suelos mixtos, con fines comerciales y residenciales donde el impacto de precio del suelo en zonas cercanas a determinadas infraestructuras de corredores viales para su accesibilidad, determina predios más elevados dados sus beneficios; en países como Francia, Reino Unido, Dinamarca, EE.UU. Italia, entre ellos Lima y Sao Paulo, la relación de hectárea o metro cuadrado, se incrementa entre un 48% a 64% del valor inicial (Gutiérrez, 2002).

Un conocido ejemplo de atracción de crecimiento urbanístico planificado fue realizado en Sao Paulo descartando la manera tradicional de vender el suelo o subastarlo individualmente, fue la de convertir zonas rurales a urbanas entre ellas modificar restricciones de densidad poblacional, estos costos del suelo reportando desde US\$300 a US\$7000 por metro cuadrado luego de las intervenciones con tan solo el 42%, ya se contaba para el financiamiento de la construcción de una estación de metro que prometía generar un mayor valor al suelo, donde la movilidad privada carezca de importancia a la trasportación de la población (Blanco, Fretes, & Muñoz, 2016).

Por otro lado, es difícil citar un ejemplo influyente, Hong Kong quizás una de las ciudades donde el espacio es el bien máspreciado por el gobierno, y se ha preocupado desde hace cerca de tres décadas por promover la accesibilidad al centro que está sobre densificado, con 63.9 habitantes por hectárea y un GDP per cápita de USD31 800 (Tiry, 2003), lo que se ilustra claramente en estos ejemplos es contradecir a Frank Lloyd Wright y demás urbanistas que se inclinan a pensar que será el automóvil el que determine la densidad de la ciudad, modo implementado, a través de una planificación proyectos de desarrollo inmobiliario ligadas a una movilidad exenta de vehículos, con accesos internos a servicios de movilidad con conexiones directas al centro de la urbe.

Si bien en el Ecuador con el fin de recuperar ingresos y cobro de impuestos prediales con el objeto de la contribución sea para obras públicas, a partir de 2008 el código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización y el MIDUVI, coloca impuestos a la plusvalía compra y venta, lo que nos dice esta política normativa únicamente prevé la posibilidad de recuperar costos de la obra, costos que generan el aumento de valor de predios privados de manera indirecta de forma que se conviertan en más atractivos dentro del mercado inmobiliario (SENPLADES, 2012), y cuyos mayores accionistas son el municipio en algunas ciudades o el estado, regresando a la tradicional venta de suelos independientes que a medida de su crecimiento, la parte habitacional va desarrollándose el efecto aglomeración en la movilidad privada, sin contemplar métodos de transporte masivo, con sus asociaciones en el uso del suelo.

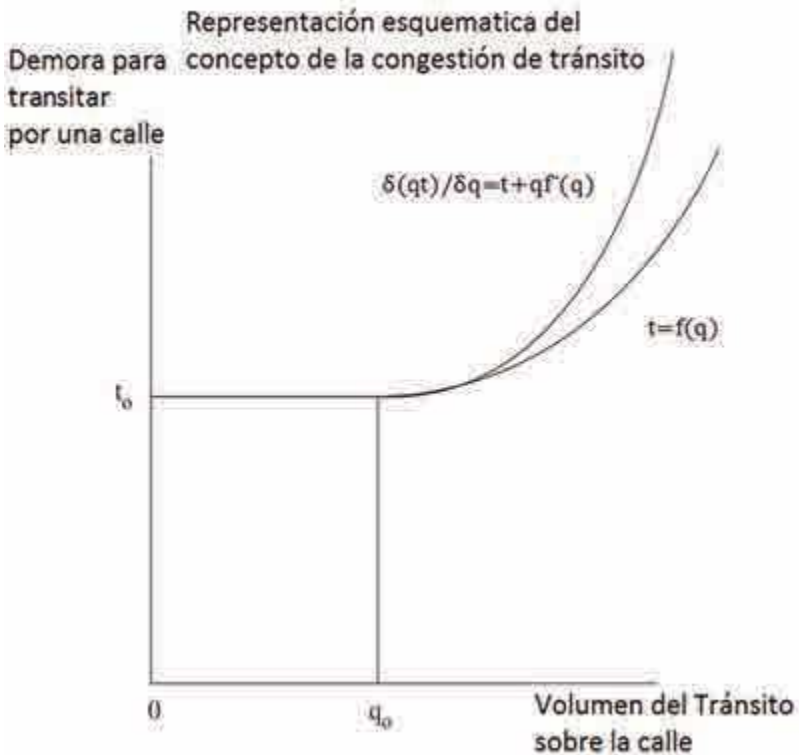
Infraestructuras

Las infraestructuras de movilidad vehicular constituyen aquellas sendas, calles y carreteras de las ciudades, donde dichos proveedores en su rango de competencia y condiciones físicas participaran activamente; resultando en casos insuficientes para el volumen que ingresa incrementando la flota vehicular (Hermelinda, 2008).

La palabra congestión utilizada frecuentemente para referirse a temas de circulación vehicular, generalmente están determinados por medio de límites de velocidad, sin embargo a medida que la cantidad de vehículos aumenta, los desplazamientos entorpecen a la fluidez con relación al tiempo de trayectoria (Figura 1). Se logra verificar en la gráfica que en cualquier volumen de tráfico (q), que a bajos niveles de congestión, un aumento del flujo no aumenta el tiempo de viaje, y a mayores se incrementa.

Figura 1

Representación esquemática del concepto de congestión de tránsito



Fuente: Thomson, & Bull, 2002

En la medida en que la red vial varía constituye un recurso escaso y valioso, independientemente esto crea un mecanismo de costo, relacionándolo de manera económica donde los usuarios de la carretera deberían pagar el coste marginal social (esto es, el coste extra para la sociedad) la cuestión a verificar es cuanto es el costo privado de utilizar la carretera, vía, túnel, etc.; si los valores se estableciesen de forma que la congestión fuese internalizada, se lograría un nivel conveniente en reducción del tráfico, el principal problema surge cuando se agrega varios vehículos adicionales, que reducirán el tiempo de viaje a los demás usuarios y aumentan el nivel de congestión, cada viajero impone un costo a todos los demás viajeros.

Un pionero estudio fue desarrollado por el Ministerio de Transportes Británico sobre “road pricing” para gestionar el tráfico a través de la tarificación vial, en zonas urbanas (Gazis, 2012), ejemplos de ello son Singapur e Inglaterra donde la construcción de más carreteras era imposible para hacer frente al aumento de las demandas de transporte, donde se optó por incluir un tarifario desde el 2003 en Londres siendo equitativos todos los vehículos pagan una tasa durante todo el día que limita la circulación libre dentro del casco colonial de la ciudad, el costo mínimo esta en 10£ libras (Reino Unido, 2017) y el sistema ERP se inserta una tarjeta inteligente con valor almacenado en el vehículo donde se deduce al ingresar a varias secciones de la urbe, estos cargos se fijan en bloques de 30 minutos y se ajusta periódicamente apoyado en las condiciones del tráfico, los indicadores generan datos estadísticos mismos que indican que disminuyo en un 43% y creció en un 31% por debajo del crecimiento poblacional (Vonk Noordegraaf, Annema, & Van Wee, 2014).

En la movilidad privada la conveniencia de viajar en automóvil es tan grande que, a su actual precio fuertemente subvencionado, atraer a una parte sustancial de los viajeros de pico de sus automóviles requeriría tarifas negativas de magnitud apreciable, en zonas urbanas de Estados Unidos y Canadá se ocupan 5 técnicas como: 1. Carriles HOV para vehículos identificados, 2. Medición de volumen en autopistas, 3. Cierre

escalonado de funciones en oficinas, 4. Ampliación de infraestructura, 5. Precios de la congestión; (Brownstone *et al.*, 2003) utilizado en San Diego California y los precios de la congestión son en forma de carriles de alta ocupación donde los conductores pueden comprar espacio en carriles HOV, estos valores están por encima de los \$30 en las primeras horas de la mañana y su incremento de \$2.50 durante los períodos punta, estas operaciones financieras han producido un retorno entre el 17% al 20% de la inversión en \$ 88 millones (Rivera Sánchez, 2015).

El funcionamiento del sistema de peajes en nuestro país, va enfocado hacia la prestación de servicios asistenciales en caso de emergencias con precios de hasta USD\$10 (Panamericana Vial S.A., 2017) solamente en el Ecuador existe 1468,22 kilómetros de vías concesionadas, (El Comercio, 2017) todas con el mismo fin, más el soporte para mantener la vía con mantenimientos preventivos.

Valoración del tiempo

Las dificultades de trabajar con flujos de tráfico continuamente cambiantes nos obligan a suponer que los viajes se distribuirán uniformemente durante los períodos bajo análisis, el valor del tiempo en desplazamientos a través de vehículos privados constituye una parte importante del gasto total en viajes, el costo en términos monetarios del factor tiempo de un trabajador se calcula multiplicando el tiempo dedicado al trayecto por el valor o precio nocional de su tiempo.

El flujo de tráfico obliga a suponer en realizar un análisis en fórmulas para la restricción de capacidad, considerando el tiempo (t_i) que se requiere al atravesar un enlace (t_{i0}) por los que viajan en él durante una hora.

$$t_{i=} = t_{i0} \left[1 + 0.15 \left(\frac{T_i}{k_i} \right)^4 \right]$$

El cambio en el tiempo total de viaje cuando se agrega un viajero adicional al flujo, el viaje marginal menos el tiempo medio de viaje en el

enlace si se multiplica por el valor promedio del tiempo de viaje es el costo que un viajero adicional, asignando tiempo total de desplazamiento T.

$$\frac{\partial \tau}{\partial T_i} = t_{i0} \left[1 + 0.75 (T_i / k_i)^4 \right]$$

Fuente: Autor en Base (Gomez-Ibanez, 2011)

Esto se hace evidente cuando se examina la utilización del valor del peaje, para la referencia solamente a los cargos monetarios exigidos de los viajeros, y “brecha” del valor a ser considerado en los peajes, la diferencia, las realizadas con las ecuaciones en las que no se imponen peajes de congestión vehicular, y cuando los peajes no se cobran en el enlace i en tráfico, es el costo que un viajero impone a otros viajeros de enlace i cuando los peajes de congestión no se cobran en el enlace i , de otra forma se impone pagos en todas las carreteras congestionadas.

La investigación llevada a cabo por Toyota International (Beesley, s.f.) ha mostrado que para una valoración, los valores análogos de cualquier situación en la cual haya una compensación del tiempo, contra coste que implica un modo de medir el tiempo se da por ocho modos: 1) tiempo caminando, 2) tiempo que pasó esperando, 3) costo donde fue utilizado el vehículo, 4) el kilometraje, 5) promedio del salario, 6) costo de abonos, 7) cargos descritos y, 8) estacionamiento, estas elecciones definían una alternativa y cualquier cambio bastaba para una ejecución de gastos.

En ciudades como Quito y Guayaquil, los usuarios son los que reflejan una mayor cantidad de tiempo en el congestionamiento que se da a diario, durante las denominadas horas pico, esta externalidad surge debido a que los conductores no pagan por la pérdida de tiempo que imponen sobre los otros (El Universo, 2016), es decir el precio del viaje es menor al real (subvaluado) donde se excede la capacidad de la infraestructura.

Energía y medio ambiente

El consumo de combustible en vehículos de transporte es el componente, para costos de operación vehicular más importante, a su vez el incremento han dado un lugar a un cambio demográfico donde prevalece la generalidad velocidad-distancia de manera que expresamos una “distancia tecnológica” destinada a los desplazamientos destinando más tiempo y dinero a los recorridos ocasionando irregularidades en la sostenibilidad ambiental (Daly, 1990) tomando como base que las emisiones no deben superar la capacidad de asimilación en el ambiente.

Esto fortalece el argumento de una oportunidad de internalizar los costos de utilizar el automóvil y corregir fallas de mercado que distorsionan la asignación de recursos, debido al consumo genera externalidades negativas (Gómez-Lobo, 2009) tanto como emisiones y accidentes adicionando el material particulado, la contaminación acústica, etc. rectificando los efectos positivos del impuesto, donde es reconocido por varios gobiernos a nivel mundial y estos valores se cobran en muchos países no con el fin de acabar las externalidades, si no crear beneficios de construcción, pavimentación.

Como resultado de estos eventos mencionamos que la región Chile contempla el precio del litro entre los más altos de \$1.16 y el precio medio en Brasil es \$1,22 por litro (Prices, 2017), dichos impuestos son importantes ejes tributarios solamente en el 2012 representó alrededor del US\$2200 millones y un 4,9% de los ingresos tributarios totales superado por el Impuesto al Valor Agregado (IVA) y el impuesto a la renta que representan el 46% y 42% respectivamente (Vargas, 2014).

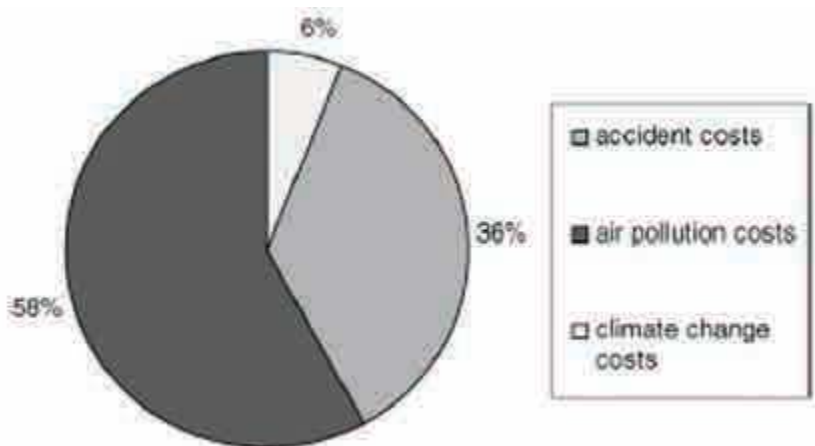
Consideremos ahora la cuestión de los efectos de la contaminación atmosférica provocada por la circulación de vehículos que inciden directamente en la salud, agricultura entornos ecológicos, climáticos y efectos estéticos dados en investigaciones de Becker (Becker, 2001) relacionando que estos costos cubre el gobierno de Nueva Zelanda, es decir surgen de la gente que paga, considerándolos pequeños a comparación

del tráfico global; de manera que se sugiere para verificación sea utilizado el PM10 (partículas de diámetro menor o igual a 10 micrones) donde un micrón es igual a una milésima de milímetro (Chile, 2017) si el valor de alrededor de 16 mg/m³ causada por el motor, más el desgaste de neumáticos y frenos se estima para el 2001 (Worldfishcenter, 2017) que se gastarían alrededor de \$554 millones correspondiente al 1.7% de PIB, donde la mortalidad se triplicaría.

Hay un impacto aún más asociado debido al efecto gases invernadero, proceso que se ha manifestado a largo plazo y es que no se puede cuantificar el coste del cambio climático, en el mismo estudio se logra determinar una relación del costo total externo donde se relaciona los accidentes, la contaminación atmosférica y el cambio climático.

Figura 2

Proporción de costos externos en Auckland región en 2001



Fuente: Astrid, Craig & Fisher, 2005

Se concluye haciendo la valorización cuanto se debe incrementar en el precio \$0.68 por litro del combustible para poder hacer frente al efecto que producirá los costos de externalidades en el medio ambiente.

Discusión de resultados

Una forma de analizar las metodologías empleadas a nivel mundial sobre las externalidades que ocurren al poner en marcha un vehículo privado, es relacionarlas con nuestro medio a medida que varios investigadores van creando formas de crear razones equitativas, evaluadas en igualdad de condiciones y los factores que determinan costos, como usuario debería responder y beneficiarse, entra en discusión sobre los valores que en nuestro país acontecen.

Suelos, determinados simplemente por una infraestructura habitacional o comercial donde el benefactor no considera la aglomeración que con lleva la movilidad en algún determinado sector, haciendo que nuestros planes urbanísticos colapsen al crecimiento poblacional, donde los municipios o constructora inmobiliaria se les cancela el precio de un predio a un terreno que su valor fue incrementado por las obras ejecutadas con anterioridad ahí, mas no la proyección de costo tiempo que me incluye al trasladarme diariamente a un determinado sector.

Infraestructuras, si bien vale acotar las vías o calles proyectadas van en función al crecimiento urbanístico, cada vehículo que circula dentro del país paga una tasa de rodaje en cada uno de los municipios correspondientes una vez al año para mejoras o el financiamiento de nuevas opciones de movilidad, estamos lejos de la interpretación de encontrarnos en una máxima congestión vehicular que en países con índices altos de población se opta por cobros extras en accesibilidad a zonas exclusivas de la urbe, y peajes que están relacionados con el volumen que se encuentra en los trayectos, encontrando autopistas que para beneficiarse de zonas exclusivas para rodaje, en menor tiempo de recorrido el precio se incrementa limitando a usuarios a tomar vías de flujo vial más detenido o alternativas de transporte, donde crear este tipo de medidas podría servirnos al introducirlas en la ciudad, inicialmente se dispone de un parqueo rotativo donde se podría considerar retirar los mismos a fin que los usuarios se vean en la necesidad de ocupar estacionamientos fuera de la vía con la restricción de ingresar al centro his-

tórico liberando la congestión vehicular que se puede dar, resoluciones políticas que pueden ir encaminada a las salidas de los trabajadores de manera escalonada.

Por ejemplo en Sao Paulo, para reducir la polución del aire y sonora, los vehículos circulan de manera escalonada de acuerdo con el último número de la placa. Los vehículos eléctricos e híbridos no están sujetos a tales escalonamientos (CETSP - Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo).

Por otra parte los combustibles que se venden en la Unión Europea como parte de sus subsidios, son destinados para responsabilidades de protocolos y tratados internacionales mientras que para América Latina, dichos subsidios están ligados a propósitos sociales, productivos y desarrollo de actividades agro industriales, decretados a nivel mundial llamados impuestos verdes, enfocados a la conservación, manutención y protección del medio ambiente, este impuesto al ser recaudado debe corregir los efectos ocasionados al medio ambiente, en el Ecuador se estructuró la ley de Fomento Ambiental y Optimización de los ingresos del Estado, enviada por decreto ejecutivo enviada por el ex Presidente de la República del Ecuador, Rafael Correa, el 24 de octubre del 2011 en materia económica y carácter urgente, a la Asamblea Nacional, para que fuera discutida. Ésta entra en vigencia el 24 de noviembre del 2011, en el Registro Oficial con número 583, donde consta el impuesto Contaminación Vehicular, considerando la base imponible del IACV corresponde al cilindraje que tiene el motor del vehículo, expresado en centímetros cúbicos en base a las tarifas.

El Servicio de Rentas Internas (SRI, 2014) indica que ha recaudado en el 2014 \$102 millones de dólares de acuerdo con el Banco Mundial (Group, 2018) el mismo que se invierten en el desarrollo económico y social planificado del país, adicionalmente con el mismo fin en la ciudad de Quito se crea una normativa para el control vehicular impuesta por la comisión de tránsito conocido como pico y placa en horarios con mayor afluencia de tráfico, la multa equivalente al 25% y 50% del salario

básico unificado, índice que permitió reducir la demanda aproximadamente 92 600 vehículos (El Comercio, 2018) en ese período en circulación, (Agencia M., 2017) no obstante estos valores no son auditados en acciones que minimicen la contaminación ambiental de la zona.

Figura 3
Tramo de ajuste y base imponible

No.	Tramo cilindraje - Automóviles y motocicletas (b)*	\$ / cc. (t)*
1	Menor a 1.500 cc	0.00
2	1.501 - 2.000 cc	0.08
3	2.001 - 2500 cc	0.09
4	2.501 - 3.000 cc	0.11
5	3.001 - 3.500 cc	0.12
6	3.501 - 4.000 cc	0.24
7	Más de 4.000 cc	0.35

No.	Tramo de Antigüedad (años) - Automóviles	Factor (FA)
1	Menor a 5 años	0%
2	De 5 a 10 años	5%
3	De 11 a 15 años	10%
4	De 16 a 20 años	15%
5	Mayor a 20 años	20%
6	Híbridos	-20%

Fuente: <http://www.sri.gob.ec/>

Conclusiones

La responsabilidad de incrementar externalidades al congestionamiento parte desde los usuarios, que no escatimamos factores externos al problema de congestión vehicular y el costo en tiempo que nos produce particularmente solo nos fijamos en la parte del combustible, donde el costo del mismo al recorrer un minuto en la ciudad de Cuenca

por el centro histórico reflejo un estudio al recorrer una distancia de un kilómetro los siguientes costos.

Tabla 1
Costos finales

COSTOS	ctvs/min	ctvs/km
Vehículo \leq 1000cc	0,534	4,871
1000cc < Vehículo \leq 16000cc	0,668	6,023
1600cc < Vehículo \leq 2000cc	0,729	7,314
Vehículo > 2000cc	1,494	13,283

Fuente: Lima, & Gálvez, 2016

En la bibliografía consultada para la realización de este trabajo se ha analizado varias propuestas para la verificación de costos para determinar externalidades en vehículos privados donde se puede verificar en la siguiente tabla, propuestas que se podrían incluir en una propuesta de medidas para la aplicación dentro de la ciudad de Cuenca.

Tabla 2
Mecanismos aplicados en gestión de demanda de transporte

Tipo	Medidas
Económicas	Impuestos a los combustibles
	Cobro por el uso de vías
	Cobros por estacionamiento
	Permisos transables (Regulación de Cantidad)
	Subsidio al transporte público
	Adquisición de buses Urbanos
Uso del suelo	Estrategias de Uso: Libres de Automóviles
	Parqueaderos (<i>Park and Ride</i>)
	Reducción de la capacidad vial
	Fomento de la intermodalidad en desplazamientos

Medidas políticas	Restricción de circulación (pico y placa, restricción vehicular, etc.)
	Cantidad de estacionamiento (ubicación y horarios)
	Tratamiento especial en horas pico
	Medidas asociadas al <i>traffic blending</i>
	Redistribución de horarios de actividades productivas

Fuente: Autor basado en Michael, 2006

Agradecimientos

El autor de manera propia quiere agradecer la colaboración de docentes y profesionales al realizar este trabajo aportaron con su sapiencia acerca del tema ya que sin su apoyo y sus conocimientos este trabajo no se habría realizado: Ing. Mateo Coello. Profesor de la facultad de Ciencia y Tecnología e Investigador de ERGON Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay; Ing. Xavier Vásquez, Profesor de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, Investigador de GIIT Planificación del Transporte, Seguridad y Gestión de la Movilidad.

Referencias bibliográficas

- Agencia M., d. T. (08 de Marzo de 2017). *AMT*. Recuperado de <https://goo.gl/JF19gA>
- Astrid, J., Craig, J. L., & Fisher, G. (2005). Transport cost analysis: a case study of the total costs of private and public transport in Auckland. *Environmental Science & Policy*, 55-66.
- Blanco, A., Fretes, V., & Muñoz, A. (2016). *Expandiendo el uso de la valorización del suelo*. Washington D.C: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Becker, U. G. (2001). Integrated Environmental Protection. *Agency for Environment and Geology*, 11.
- Beesley, M. E. (s.f.). The Value of 'Time Spent in Travelling'. *The London School of Economics and Political Science and The Suntory and Toyota International Centres for Economics and Related Discipline*, 174-186.

- Brownstone, D., Ghosh, A., Kazimi, C., & Van Amelsfort, D. (2003). Drivers' willingness-to-pay to reduce travel time: evidence from the San Diego. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1-15.
- Chile, M. d. (08 de 03 de 2017). *Registro de emisiones* Recuperado de <https://goo.gl/XTiwaF>
- Daly, H. E. (1990). Toward some operational principles of sustainable. *The Netherlands*, 283-321.
- Diario El Universo (01 de Abril de 2016). Viaje de Salinas a Guayaquil duró hasta 4 horas, por congestionamiento. Recuperado de <https://goo.gl/XnGNqh>
- _____. (08 de 03 de 2017). *Grupo El Comercio*. Recuperado de <https://goo.gl/KM6J7Q>
- Gazis, D. C. (2012). *Traffic Theory*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.
- Gomez-Ibanez, J. A. (2011). *Essays in Transportation Economics and Policy: A*. Washington, US: Brookings Institution Press.
- Gómez-Lobo, A. (2009). Una nueva mirada a la incidencia de los subsidios al transporte público: Un estudio de caso de Santiago, Chile. *Diario de la Economía del Transporte y Política (JTEP)*, 405-425.
- Gutiérrez, A. (2002). Displacements: Moving in cities, moving on the ground, moving within density. *Architecture School of the Pontificia Universidad Católica de Chile*, 4-6.
- Hermelinda, L. A. (2008). *Plan estratégico situacional aplicando congestiónamiento vehicular*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- Ibanez, F., & Espinoza, L. (2016). Estimación del "Efecto Mohring" en el sistema de transporte masivo Puma Katari de la ciudad de La Paz. *Latinoamericana de Desarrollo Económico*, 9-44.
- INEC (04 de 03 de 2014). *INEC*. Recuperado de <https://goo.gl/Ny4kjp>
- Krugman, P. (1998). Space: The Final Frontier. *Journal of Economic Perspectives*, 161-174.
- Lima, B., & Gálvez, E. (2016). *Análisis de consumo de combustible de los vehículos de categoría M1 que circulan en el centro histórico de la ciudad de Cuenca en horas de máxima demanda en función de los ciclos de conducción*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Martínez T., R. A. (2008). *Aplicación a los consumos energéticos y emisiones del transporte*. Ciudad Real, España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Metcalf, G. E. (2003). Environmental levies and distortionary taxation: Pigou, taxation and pollution. *Journal of Public Economics*, 10.

- Michael, M. (2006). Transportation Infrastructure. *Design Standards for the U.S.*, 2-60.
- OICA (05 de Marzo de 2017). *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers*. Recuperado de <https://goo.gl/AAPUe6>
- Panamericana Vial S.A. (08 de Marzo de 2017). *Panavial*. Recuperado de <https://goo.gl/CeN9Y3>
- Prices, G. P. (2017). Precios de la gasolina, litro. <https://goo.gl/SfoLtc>
- Reino Unido, G. (07 de Marzo de 2017). *El Archivo Nacional*. Obtenido de <https://goo.gl/7Q5L7v>
- Rivera Sánchez, L. (2015). Narratives of Return Migration and Mobility. Between Practices of Engagement and Multiple Spatialities in the City. *Estud. Polit.*, 47, 243-264. Instituto de Estudios Políticos, Universidad de Antioquia. DOI: 10.17533/udea.espo.n47a14
- SENPLADES (2012). Plan Nacional del Buen Vivir. En SENPLADES, *Ciudades históricas en desarrollo* (pp. 634-15). Quito: UNESCO.
- SRI (2014). *Auditorías gubernamentales*. Recuperado de <https://goo.gl/XsSSNo>
- Tiry C. (2003). Hong Kong's Future is Guided by Transit Infrastructure. *Japan Railway & Transport Review*, 28-35.
- Vargas, D. V. (2014). Incidencia distributiva del impuesto a los combustibles en el gran santiago. En: *Incidencia distributiva del impuesto a los combustibles en el Gran Santiago* (p. 17). Santiago de Chile: Economía y Negocios.
- Vonk Noordegraaf, D., Annema, J., & Van Wee, B. (2014). Policy Implementation lessons from six road procing cases. *Transportation Reserch Parte A*, 172-191.
- Worldfishcenter (08 de Marzo de 2017). Obtenido de <https://goo.gl/SDXJv4>

Capítulo 4

Eficiencia energética

Modelo para la evaluación del desempeño energético de diversas configuraciones de buses eléctricos en la ciudad de Cuenca

Daniel Cordero-Moreno¹

Wilson Zumba Álvarez²

Mateo Coello Salcedo³

Francisco Torres Moscoso⁴

Resumen

Para la implementación de buses eléctricos en el transporte público urbano, es necesario evaluar el desempeño de éstos en condiciones reales de operación. Debido a que no siempre se puede contar con una unidad de bus, con la cual se puedan realizar pruebas en ruta; es necesario contar con una herramienta para evaluar varios modelos de buses eléctricos previo a su compra. En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo para evaluar el desempeño energético de buses eléctricos en condiciones reales de operación, definidas por ciclos de conducción que incluyen altitud. El modelo determina la demanda de energía que tendrán los buses al cubrir rutas específicas en una ciudad. Las rutas analizadas en este trabajo fueron las rutas 5, 7 y 100 de la ciudad de Cuenca. En cuanto a los modelos de buses, se utilizó información disponible en la literatura. Se utilizaron tres escenarios de carga (vacío, medio y full) para todas las rutas. Los resultados obtenidos de la demanda energética fueron los siguientes: 325 kWh, ruta 5; 501 kWh, ruta 7 y 468.6 kWh, ruta 100. Cada ruta presenta diferentes valores de distancia, velocidad, aceleración y altitud; de ahí la variación en la demanda de energía.

-
- 1 Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente e Investigador del grupo de investigación ERGON. Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador. dacorderom@uazuay.edu.ec
 - 2 Magíster en Sistemas Vehiculares. Ingeniero Mecánico Automotriz. Quito Motors. Cuenca-Ecuador. wzumba@quitomotors.com.ec
 - 3 Magíster en Planificación y Gestión Energética. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente e investigador del grupo de investigación ERGON. Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador. mfcoello@uazuay.edu.ec
 - 4 Magíster en Sistemas Vehiculares. Ingeniero Mecánico Automotriz. Docente e Investigador del grupo de investigación ERGON. Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador. ftorres@uazuay.edu.ec

Palabras clave

Buses eléctricos, demanda energética, simulación.

Abstract

The use of electric buses in urban public transport, is growing. The selection of a proper electric powertrain requires an analysis of its performance. Due to the lack of a bus unit, to perform these tests, simulation is always a good option. This work presents the development of a model to evaluate the energy performance of electric buses under real operating conditions, defined by driving cycles that include altitude profile. The model developed determines the energy demand of buses covering specific routes in a city. The routes analysed in this work were routes 5, 7 and 100 of the city of Cuenca-Ecuador. As for the bus models, information available in the literature was used. Three load scenarios (empty, medium and full) were used for all routes. The results obtained were the following: 325. kWh, route 5; 501 kWh, route 7 and 468.6 kWh, route 100. Each route has different values of speed, distance, acceleration and altitude; hence the variation in the demand for energy.

Keywords

Electric buses, energy demand, simulation.

Introducción

Uno de las opciones para reducir las emisiones contaminantes producidas por las flotas de buses en las ciudades alrededor del mundo, es la implementación de nuevas tecnologías en el transporte, como por ejemplo los buses eléctricos; así lo menciona (Mahmoud, Garnett, Ferguson, & Kanaroglou, 2016). Sin embargo, existen varias alternativas en la configuración de trenes de potencia alternativos, para su utilización en buses urbanos. Algunos tipos de configuraciones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Diferentes configuraciones para trenes de potencia en buses urbanos

Abreviatura	Significado
DB	Diesel Bus (Bus con motor diésel)
GB	Gasoline Bus (Bus con motor gasolina)
CNGB	Compressed Natural Gas Bus (Bus con Gas Natural Comprimido)
GHEB	Gasoline Hybrid Electric Bus (Bus Híbrido Gasolina-Eléctrico)
CNGHEB	Compressed Natural Gas Hybrid Electric Bus (Bus Híbrido Gas Natural Comprimido-Eléctrico)
DHEB	Diesel Hybrid Electric Bus (Bus Híbrido Diésel-Eléctrico)
FCEB	Fuel Cell Electric Bus (Bus con Celda de Combustible)
BEB	Battery Electric Bus (Bus Eléctrico con Baterías)

Fuente: Mahmoud *et al.*, 2016

Los buses modernos, entonces, tienen distintos niveles de electrificación, lo que influye en la configuración del sistema de propulsión y el dimensionamiento de sus componentes.

En el caso de los BEB (Bus Eléctrico con Baterías), el dimensionamiento de las baterías y sus sistemas de recarga se han estudiado en varias ciudades alrededor del planeta, mediante la utilización de simulaciones, ya que no siempre se tiene acceso a un bus eléctrico que permita realizar recorridos instrumentados. Existen trabajos donde se analiza la demanda energética de las baterías y las distintas configuraciones de buses eléctricos (Lajunen, 2012, 2014; Miles & Potter, 2014) e inclusive en (Gao *et al.*, 2017) se contempla el análisis del impacto de esa demanda energética de buses eléctricos en las redes locales; sin embargo en estos trabajos, no se menciona un análisis con distintos perfiles de altitud, aspecto que si es considerado en este trabajo. En la Tabla 2, se presentan las demandas de energía para las baterías de los buses eléctricos, en algunas ciudades alrededor del mundo. Aunque se indican algunos detalles de las rutas, no se indica las características de los buses.

Tabla 2
Requisitos de energía de la batería para rutas de buses eléctricos

Ciudad	Energía diaria requerida en la batería [kWh]	Distancia de la ruta [km]
Sao Paulo	700	12
Shenzen	900	38
Londres	1000	-
Milton Keynes	500	24
Varsovia	650	-

Fuente: Miles & Potter, 2014

Uno de los factores críticos en los BEB es la autonomía de la batería y los tiempos de recarga. Estas características están ligadas al tamaño de la batería. En Milton Keynes (Inglaterra), se realizó un estudio para

la implementación de BEB con un sistema de recarga por inducción (Miles & Potter, 2014)

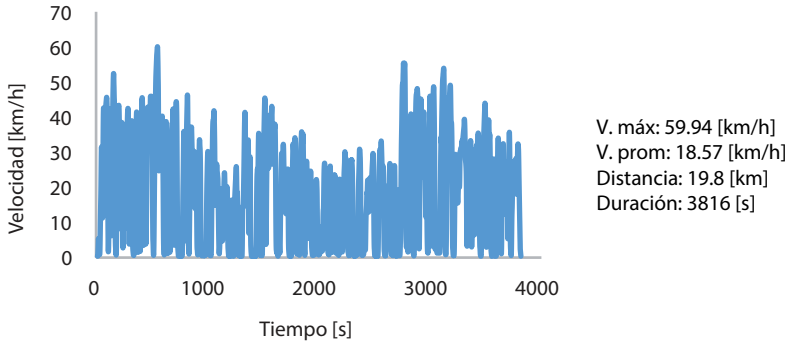
Para determinar la demanda energética en un vehículo, se deben conocer las “características del vehículo y sus condiciones de operación” (Cordero, 2015). En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de simulación, que permite evaluar distintas configuraciones de buses eléctricos en condiciones reales de operación en la ciudad de Cuenca, esto es, considerando los patrones de velocidad y de *pendientes*. Esta ciudad cuenta con 475 buses, que cubren 29 rutas. Cada ruta tiene sus propias características de operación (velocidad y pendiente), en las que se pueden establecer estos parámetros de operación o ciclos de trabajo, conocidos como ciclos de conducción. Existen varias metodologías para la obtención de ciclos de conducción como se presentan en (Cedillo, 2013; Cordero-Moreno, Dávalos, Coello, & Rockwood, 2018; Dai, Niemeier, & Eisinger, 2008; Huertas, Díaz, Cordero, & Cedillo, 2017; Zhen Dai, 2008).

En un trabajo realizado por (Astudillo, 2016) se determinaron las condiciones de operación de 3 rutas de la ciudad de Cuenca, sobre las cuales se realizará este trabajo. En la Figura 1, se observan las condiciones de operación de la ruta No.5 en la ciudad de Cuenca. Estas condiciones de operación, son determinadas por el ciclo de conducción -diagrama velocidad vs tiempo que representa patrones de manejo- (a) y el *perfil de altitud* (b).

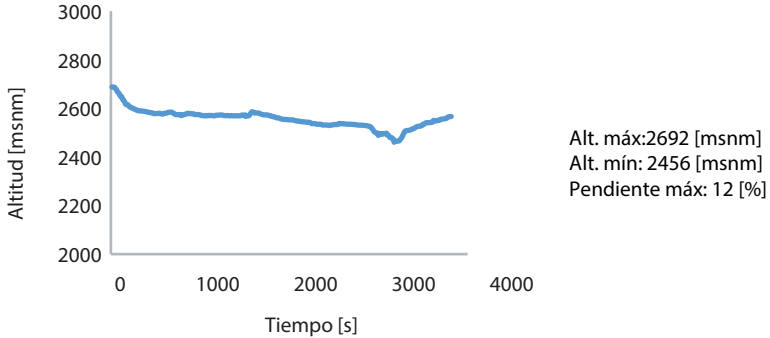
Materiales y métodos

Mediante la dinámica de vehículos se puede determinar la demanda energética que requiere un vehículo para satisfacer determinadas condiciones de operación. En (Gillespie, 1992) se detallan las ecuaciones (Ec.1-Ec.5) que se utilizan para determinar la fuerza en rueda (Figura 2) y de esta manera calcular la potencia y el torque en rueda necesarios y que se utilizaron en (Cordero-Moreno *et al.*, 2018; Halmeaho, Rahkola, Pellikka, Ruotsalainen, & Tammi, 2015).

Figura 1
Ciclo de conducción, con su perfil de altitud,
para la ruta No. 100 (una vía) en la ciudad de Cuenca



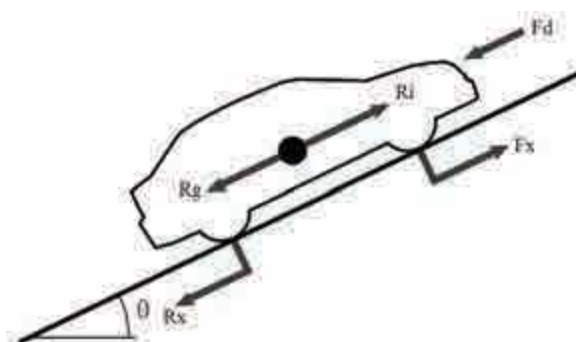
a)



b)

Fuente: Astudillo, 2016

Figura 2
Diagrama de cuerpo libre de un vehículo



Fuente: Galindo, Blanco, Brace, Chappell, & Burke, 2017, tomado de Cordero-Moreno *et al.*, 2018

$$F_x = F_d + R_x + R_g + R_i \quad (1)$$

Donde,

F_x = Fuerza requerida en rueda [N]

F_d = Fuerza de arrastre [N]

R_x = Resistencia a la rodadura [N]

R_g = Fuerza debida a la pendiente [N]

R_i = Fuerza debida a la inercia [N]

El detalle de las variables de la Ec.1 se presenta en las ecuaciones (Ec.2-Ec.5).

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho V^2 \quad (2)$$

Donde,

C_d = Coeficiente de arrastre [-]

A = Área frontal [m²]

ρ = Densidad del aire [kg/m³]

V = Velocidad del vehículo [m/s]

$$R_x = M * g * fr * \cos \theta \quad (3)$$

Donde,

M= Masa del vehículo [kg]

g= Aceleración de la gravedad [m/s²]

fr= Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]

Θ= Pendiente de la carretera [rad]

$$R_g = M * g * \sin \theta \quad (4)$$

(5)

Donde,

a= Aceleración del vehículo [m/s²]

$$\tau_x = F_x * R_d \quad (6)$$

Donde,

τx= Torque en rueda [Nm]

Rd= Radio dinámico del neumático [m]

$$P_x = F_x * V \quad (7)$$

Donde,

Px= Potencia en rueda [kW]

$$E_x = \int P_x * dt \quad (8)$$

Donde,

Ex= Energía demandada en rueda [kWh]

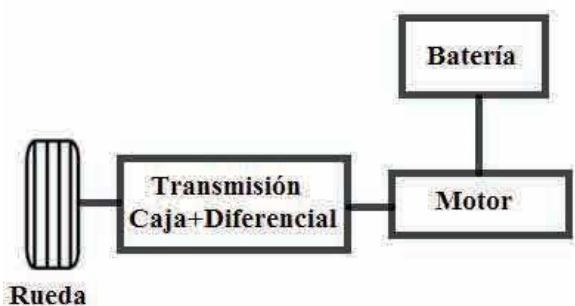
En este caso se realizó un análisis cuasi-estático de la rueda a las baterías. El análisis cuasi-estático como se explica en (Guzzella & Sciarretta, 2012; Guzzella & Amstutz, 1999) permite analizar un fenómeno dinámico, dividiéndolo en varios instantes estáticos; con intervalos de

tiempo que pueden o no, ser constantes. En este trabajo se utilizó un intervalo constante de tiempo de 1 segundo; es decir, se aplicaron las ecuaciones Ec.1-Ec.8 cada segundo, que dura la ruta analizada. Con estos valores instantáneos se pueden determinar los valores totales durante cada trayecto. De esta manera, se puede modelar el tren motriz de un vehículo y obtener la demanda de energía, torque y potencia de la rueda

Cálculo de la demanda energética en las baterías

Hasta este punto, el análisis no considera el tren motriz, es decir, se calcula la demanda de energía en la rueda, únicamente. Sin embargo, es necesario evaluar la demanda de energía en las baterías. Para ello, considerando un BE con la configuración mostrada en la Figura 3, es necesario definir las relaciones de transmisión de la caja de cambios y el diferencial, así como el voltaje y eficiencia del motor eléctrico para estimar la demanda de corriente y energía que llega a las baterías.

Figura 3
Configuración del tren motriz de un bus eléctrico



Para obtener la demanda de corriente y de energía a la batería se utilizaron las ecuaciones Ec.9- Ec.15

$$\omega_x = \frac{v}{R_d} \quad (9)$$

Donde,

ω_x = Velocidad angular en rueda [rad/s]

$$\omega_m = \frac{\omega_x * N_{td} * 60}{2\pi} \quad (10)$$

Donde,

ω_m = Velocidad del motor [RPM]

$$\tau_m = \frac{\tau_x}{N_{td}} \quad (11)$$

Donde,

τ_m = Torque del motor [Nm]

N_{td} = Relación total de transmisión (Caja +Diferencial) [-]

$$P_{m-out} = \frac{P_x}{\eta_{td}} \quad (12)$$

Donde,

P_{m-out} = Potencia del motor eléctrico (en el eje) [kW]

η_{td} = Eficiencia total de la transmisión [%]

$$D_{recorrida} \quad (13)$$

Donde,

P_{m-in} = Potencia del motor eléctrico (a la entrada) [kW]

η_m = Eficiencia del motor eléctrico [%]

$$P_{m-in} = P_b = V_b * I_b \quad (14)$$

Donde,

P_b = Potencia de la batería [kW]

V_b = Voltaje de la batería [V]

I_b = Corriente de la batería [A]

$$E_b = \int P_b * dt \quad (15)$$

Donde,

E_b= Energía demanda a la batería [kWh]

Condiciones de operación

Como se mencionó anteriormente, las rutas evaluadas en este trabajo fueron tres y se obtuvieron de (Astudillo, 2016). En la Tabla 3 se observan las características principales de las 3 rutas analizadas.

Tabla 3
Características de operación de 3 rutas
de buses en la ciudad de Cuenca

Parámetro	Rutas		
	5	7	100
	Los Andes- El Salado- Los Andes	Trigales- Mall del río- Trigales	Ricaurte- Baños- Ricaurte
Velocidad máxima [km/h]	55.28	78.94	59.94
Velocidad promedio [km/h]	16.50	18.07	17.99
Aceleración máxima [m/s ²]	1.38	1.48	1.49
Desaceleración máxima [m/s ²]	-2.51	-2.45	-2.43
Distancia recorrida [km]	28	40.54	38.67
Número de paradas	74	101	98
Tiempo de recorrido [h:min]	1:41	2:14	2.09
Tiempo de aceleración negativa [min]	43	58	55
Pendiente máxima [%]	14	25	12

Fuente: Astudillo, 2016

Características del vehículo

Una vez que se conocen las condiciones de operación del vehículo, debemos definir las características del vehículo. En la Tabla 4 se presentan las características de un bus actual en la ciudad de Cuenca, en la cual se detallan la manera de obtener cada una de éstas.

Tabla 4
Características de un bus de transporte público urbano
de la ciudad de Cuenca

Parámetro	Valor	Unidad	Forma de obtención
Área frontal [A]	7.29	[m ²]	Solid Works- (Brennan, Worm, & Morgan, 2013)-toma- do de (Astudillo, 2016)
Coefficiente de arrastre [Cd]	0.62	[-]	Pruebas en carretera (Coast-down) (Astudillo, 2016)
Coefficiente de resistencia a la rodadura [fr]	0.0092	[-]	Pruebas en carretera (Coast-down) (Astudillo, 2016)
Masa del vehículo (vacío) [M]	9470	[kg]	Báscula
Radio dinámico [Rd]	0.51	[m]	Ficha técnica, medidas del neumático (Merce- des-Benz, 2012)
Masa de un pasajero [m]	70	[kg]	(INEN, 2010)
Capacidad de pasajeros [C]	70	[-]	(Ilustre_Municipalidad_ de_Cuenca, 2015)
Densidad del aire [pa]	0.83	[kg/m ³]	(Cengel & Boles, 2009; INAMHI, 2016)
Gravedad [g]	9.81	[m/s ²]	(Beer, Jhonston, & Corn- well, 2010)

Ahora bien, para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos de vehículos encontrados en la literatura, ya que no se cuenta aún con buses eléctricos en la ciudad, se utilizaron dos modelos que se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros de buses eléctricos utilizados en la simulación

Parámetros	Bus 1 (BYD, 2018; Gao <i>et al.</i> , 2017)	Bus 2 (China_buses, 2017; Zhou <i>et al.</i> , 2016)
Masa en vacío [kg]	13300	13100
Área frontal [m ²]	8.5	7.5
Coefficiente de arrastre [-]	0.79	0.8
Coefficiente de resistencia a la rodadura [-]	0.0098	0.015
Neumático	275/70R 22.5	275/70R 22.5
Peso máximo [kg]	19000	18000
Energía disponible en la batería [kWh]	324	--
Capacidad [Ah]	600	400
Torque máximo [Nm]	700	1000

Características del tren motriz

Como se mencionó anteriormente, el análisis energético de la demanda energética en la batería, requiere la definición de algunos parámetros del tren motriz. A continuación, en la Tabla 6, se presentan algunas variables utilizadas en este trabajo. El dato de torque máximo y potencia máxima, no son suficientes para realizar la simulación. El dato requerido es la curva, es decir el comportamiento del motor en todo el rango de velocidad. El criterio para realizar los cambios de marcha se determinó mediante el diagrama de cubrimiento (fuerza en rueda vs velocidad del vehículo en cada marcha) que se presenta en la Figura 4. El punto de corte de las curvas es el punto donde se deben realizar los cambios.

Figura 4
Diagrama de cubrimiento en rueda

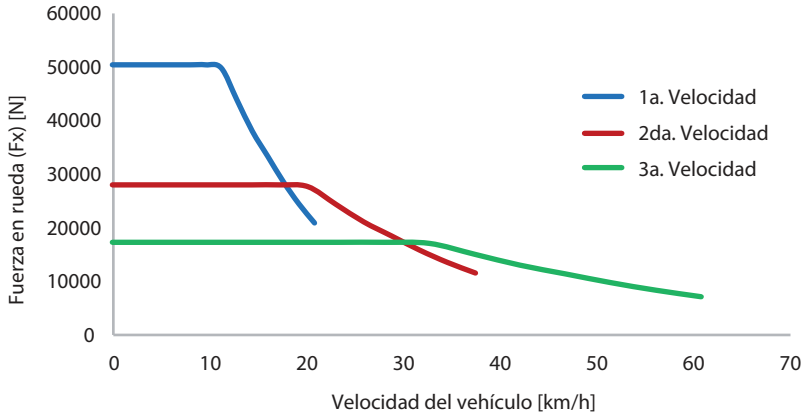
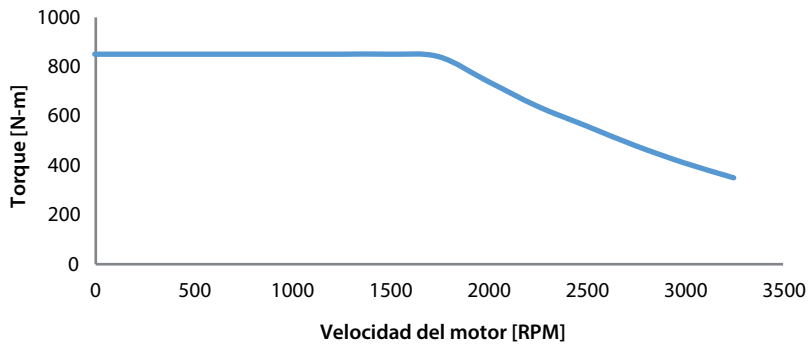


Tabla 6
Parámetros del tren motriz utilizados en la simulación

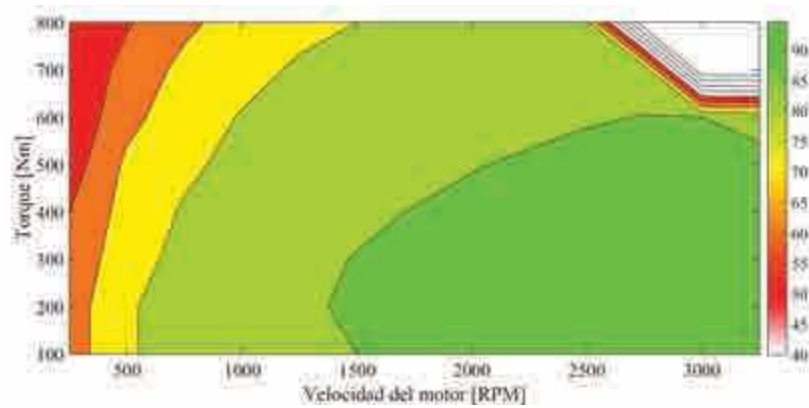
Parámetros	Opción 1 (Xi, Xiong, & Zhang, 2008)	Opción 2 (TM4, 2018)	Opción 3 (TM4, 2018)
Torque [Nm]	850	1500	2100
Caja de cambios	3	3	3
Nt 1	4.403		
Nt 2	2.446		
Nt 3	1.507		
Nd	6.63		

En la Figura 5 se presentan las curvas de torque y potencia (a), y la superficie de eficiencia del motor de (opción 1 -Tabla 6) (b) utilizadas en este trabajo.

Figura 5
Diagramas de motor utilizados en la simulación
[TM4, 2018; YASA, 2018]



a)



b)

Resultados y discusión

Con los datos presentados en la sección anterior (Ec.1 –Ec.15) se elaboró un modelo que se muestra en la Figura 6.

Figura 6
Modelo ERGON, para evaluación de vehículos eléctricos
utilizando ciclos de conducción que incluyen pendiente
y simulación de capacidad de aceleración



Con el modelo de la Figura 6 y los datos de la Tabla 5 y Tabla 6 se realizaron las simulaciones con tres escenarios en cuanto a la carga de pasajeros, vacío; medio, con 50% de capacidad de carga y full, con el 100% de la capacidad de carga. Se obtuvieron los resultados presentados a continuación en la Tabla 7, donde se aprecian las diferencias en demanda energética que tiene cada ruta.

Tabla 7
Resultados de las simulaciones realizadas

Parámetros	Línea 5			Línea 7			Línea 100		
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full
Fuerza en rueda [N]	21665	23145	24625	33927	36246	38565	22897	24453	26009
Torque en rueda [Nm]	10632	11572	12312	16964	18123	19282	11448	12226	13004
Potencia en rueda [kW]	170	181	192	211	224	239	176	188	200
Demanda energética por trayecto [kWh]	33.5	35.8	38	53	56.5	60	49.2	52.5	55.7
Energía requerida [kWh]	51.4	54.2	57	79.1	83.5	87.9	73.9	78.1	82.2
Nº de viajes diarios	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Energía requerida diaria [kWh]	308.4	325.2	342	474.6	501	538.2	443.4	468.6	493.2

De la Tabla 7 se observa que la ruta 7 es la que tiene mayor demanda energética. Es importante considerar además, los datos de la Tabla 3, donde se detallan las características de operación de cada ruta. Con la herramienta desarrollada en este trabajo se podrían evaluar inclusive, distintos modelos de bus para cada ruta, con el objetivo de minimizar el consumo de energía.

Conclusiones

Es importante conocer las condiciones de operación que tienen o tendrán los buses eléctricos previo a su compra. El modelo presentado en este trabajo permite la evaluación de distintos modelos de trenes motrices alternativos, que se encuentran en el mercado, con el fin de seleccionar el modelo que se adapta a las condiciones de operación requeridas. Es decir, los buses eléctricos deben ser capaces de realizar lo mismo que sus homólogos diésel, esto es, circular por las ciudades a las velocidades demandadas por la realidad local y subir las pendientes propias de cada ruta.

Es importante, entonces, caracterizar las rutas actuales mediante un ciclo de conducción que incluya un perfil de altitud.

Mediante este trabajo se puede observar que la demanda energética puede ser muy diferente en distintas rutas dentro de una misma ciudad. Esto abre un abanico de posibilidades para la selección de un modelo de bus que cumpla las condiciones requeridas. No es suficiente un bus que “funcione” en una ciudad, sino un modelo de bus que cumpla las condiciones de operación con el mínimo consumo de energía. Para ello, la simulación del desempeño energético de los buses de transporte público, es una herramienta práctica y útil para la selección de los modelos que de verdad se adapten a la realidad de cada ciudad y no al revés.

El cambio de tecnología en la propulsión del sistema de transporte público incluye un análisis, no solamente técnico, sino económico también. El siguiente paso, luego de conocer la demanda de los buses,

sería evaluar los distintos sistemas de carga y el impacto de la carga de baterías en la red eléctrica local.

Referencias bibliográficas

- Astudillo, R. (2016). *Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca*. (Maestría). Cuenca: Universidad del Azuay. Recuperado de <https://goo.gl/MA1KhV>
- Beer, F. P., Jhonston, E. R., & Cornwell, P. J. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros Dinámica*. Ed. MacGraw Hill Education, Novena ed.
- Brennan, D. D., Worm, J., & Morgan, C. (2013). *Determination of Vehicle Frontal Area Using Image Processing*. Paper presented at the SAE 2013 World Congress & Exhibition. <https://goo.gl/mJwjgB>
- BYD (2018). BYD ebus. Recuperado de <https://goo.gl/uHm79o>
- Cedillo, K. (2013). *Determinación de ciclos típicos de conducción*. (Masters). ITESM
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. MacGraw Hill Ed.
- Cordero-Moreno, D., Dávalos, D., Coello, M., & Rockwood, R. (2018). *Proposed criteria to determine typical vehicular driving cycles using minimum weighted differences*. Paper presented at the WIT Transactions on the Built Environment.
- Cordero, D. (2015). *Metodología para minimizar el consumo de combustible en autobuses, que sirven rutas fijas, mediante la reconfiguración del tren motriz*. (Doctorado en Ciencias de Ingeniería). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- China_buses (2017). Zhongtong Bus LCK6122EVG Electric Bus. Recuperado de <https://goo.gl/H85EXJ>
- Dai, Z., Niemeier, D., & Eisinger, D. (2008). *Driving Cycles: A New Cycle Building Method that Better Represents Real World Emissions* (Vol. null).
- Galindo, E., Blanco, D., Brace, C., Chappell, E., & Burke, R. (2017). *Chassis Dynamometer Testing Addressing the Challenges of New Global Legislation (WLTP and RDE)*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International.
- Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J.-M., Birky, A. K., & Ward, J. (2017). Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122, 588-600. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>

- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers.
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2012). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Springer-Verlag.
- Guzzella, L., & Amstutz, A. (1999). CAE tools for quasi-static modeling and optimization of hybrid powertrains. *Ieee Transactions on Vehicular Technology*, 48(6), 1762-1769. doi:10.1109/25.806768
- Halmeaho, T., Rahkola, P., Pellikka, A. P., Ruotsalainen, S., & Tammi, K. (2015). *Electric City Bus Energy Flow Model and Its Validation by Dynamometer Test*. Paper presented at the 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).
- Huertas, J. I., Díaz, J., Cordero, D., & Cedillo, K. (2017). A new methodology to determine typical driving cycles for the design of vehicles power trains. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-8. doi:10.1007/s12008-017-0379-y
- Ilustre Municipalidad de Cuenca. (2015). *Plan de movilidad de Cuenca 2015-2025*. Recuperado de <https://goo.gl/yF1zJd>
- INAMHI (2016). *Boletín climatológico anual 2015*. Recuperado de <https://goo.gl/JJuh9y>
- INEN (2010). NTE INEN 2205:2010 Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos (pp. 29). Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Lajunen, A. (2012). Evaluation of battery requirements for hybrid and electric city buses. *World Electric Vehicle Journal*, 5.
- _____. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 1-15. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008
- Mahmoud, M., Garnett, R., Ferguson, M., & Kanaroglou, P. (2016). Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 673-684. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019
- Mercedes-Benz (2012). Ficha técnica modelo OF-1721.
- Miles, J., & Potter, S. (2014). Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project. *Research in Transportation Economics*, 48, 357-363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.063>
- TM4 (2018). SUMO MD. Recuperado de <https://goo.gl/voSiir>
- Xi, J.-q., Xiong, G.-m., & Zhang, Y. (2008, 3-5 Sept. 2008). *Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus*. Paper presented at the 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.

YASA (2018). YASA 750R E-Motor. England.

Zhen Dai, D. N., PE Douglas Eisinger. (2008). *Driving cycles: a new cycle-building method that better represents real-world emissions*. Recuperado de <https://goo.gl/FSSj7r>

Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S., & Hao, J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603-613. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>

