



Tendencias futuras aplicadas
al transporte y movilidad sostenible

CONIADT 2019

**III Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz
y Desagregación Tecnológica**

LIBRO DE MEMORIAS
ISBN: 978-9942-801-11-1



En el año dos mil diecinueve la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo fue sede del 3er Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz y Desagregación Tecnológica CONIADT 2019, espacio dedicado a profesionales, docentes y estudiantes con la temática ***“Tendencias futuras aplicadas al transporte y movilidad sostenible”*** generando el ambiente para compartir la producción científica y tecnológica de investigadores académicos y profesionales afines; al mismo tiempo de redelinear y actualizar los estándares de calidad que plantean los nuevos retos de la educación superior con la finalidad de establecer contextos de comunicación y colaboración con otras universidades nacionales e internacionales.

En los días del 5 al 7 de junio, este congreso reunió a decenas de estudiosos locales, nacionales e internacionales para presentar sus experiencias profesionales, investigaciones, proyectos y patentes en las siguientes temáticas: eficiencia energética, contaminación e impacto ambiental; planificación del transporte, seguridad y gestión de movilidad; ingeniería del mantenimiento aplicado al transporte; diseño mecánico y optimización automotriz; desagregación tecnológica; innovación, avance y futuro de la ingeniería automotriz; estándares y normativa en referencia a la ingeniería automotriz; electricidad y electrónica aplicada a vehículos; diseño de sistemas para vehículos inteligentes; robótica e inteligencia artificial aplicadas al campo automotriz, sobre estas temáticas fueron evaluados mediante revisión a doble ciego y aceptados 25 artículos para ponencias.

El congreso contó con la participación de ocho conferencistas internacionales provenientes de USA, México, España, Colombia, Perú y Chile, quienes a través de ponencias magistrales y un workshop compartieron sus saberes a una audiencia promedio de 250 asistentes. CONIADT 2019 integró a representantes de instituciones de educación superior como la Universidad Politécnica de Valencia - UPV, Universidad de Castilla La Mancha - UCLM, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Universidad del Azuay - UDA, Universidad Internacional del Ecuador - UIDE, Universidad UTE, Universidad Técnica del Norte - UTN, Universidad Politécnica Salesiana - UPS y de la anfitriona ESPOCH.

Finalmente, con la expresión de agradecimiento y reconocimiento a las autoridades Institucionales de la ESPOCH, por brindar su total apoyo en la consecución de este evento científico, presentamos con mucho agrado los resultados obtenidos, a través del presente libro de memorias.

Carlos Santillán Mariño

DECANO FACULTAD DE MECÁNICA
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

3er Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz y Desagregación Tecnológica

CONIADT 2019

COMITÉ ORGANIZADOR

Presidente:
Carlos Santillán Mariño

Vicepresidente:
José Pérez Fiallos

Miembros:
Luis Tipanluisa S.
Celin Padilla P.
Juan Carlos Castelo V.
Milton Quinga M.
Paúl Montúfar P.
Luis Buenaño M.
Juan Marcelo Ramos F.

LIBRO DE MEMORIAS:

Fecha de publicación, versión digital:

5 de julio de 2019

ISBN, versión digital:

978-9942-801-11-1

CONTACTO:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Facultad de Mecánica

Panamericana Sur, km 1 1/2
Telf.: +593 03 2998200 ext 3201
eMail: eia@epoch.edu.ec
www.epoch.edu.ec

Riobamba - Ecuador
© 2019

COMITÉ CIENTÍFICO

Alex Rodolfo Guzmán Antamba
Bolívar Alejandro Cuaical Angulo
Mafla Yépez Carlos Nolasco
Carlos Enrique Rosales Medina
Celin Abad Padilla Padilla
Diana Belén Peralta Zurita
Eder Lenin Cruz Sigüenza
Edilberto Antonio Llanes Cedeño
Eduardo José Cueva Sánchez
Carlos Ramiro Cepeda Godoy
Efrén Esteban Fernández Palomeque
Fernando Renato Ramírez Paredes
Iván Ernesto Yánez Zurita
Jaime Vinicio Molina Osejos
Johnny Marcelo Pancha
Jorge Mauricio Néjer Guerrero
Juan Carlos Castelo Valdivieso
Juan Carlos Rocha Hoyos
Juan Marcelo Ramos Flores
Julio Leguisamo Milla
Ligia Elisabeth Paredes Peñafiel
Luis Eduardo Tipanluisa Sarchi
Luis Fernando Buenaño Moyano
Mario Efraín Audelo Guevara
Milton Israel Quinga Morales
Paúl Alejandro Montúfar Paz
Rodrigo Rigoberto Moreno Pallares
Vicente Javier Romero Hidalgo
Víctor Danilo Zambrano León
Jorge Luis Chicaiza Vaca

ISBN: 978-9942-801-11-1





ÍNDICE DE PONENCIAS

Análisis del tiempo para llegar al equilibrio térmico en el proceso de transferencia de calor por conducción	1
<i>Yáñez Z., I.</i>	
Estudio del impacto de la altura sobre el nivel del mar en las emisiones de gases de escape en motores diésel electrónicos.	14
<i>Mafla, C.; Benavides, I.; Hernández, P.; Imbaquingo, R.</i>	
Estudio del proceso de combustión de un motor Diesel de vehículo ligero usando biodiésel y combustibles parafínicos puros: GTL y farnesano.	22
<i>Soriano, J. A.; García Contreras, R.; Gómez, A.; Mata, C.</i>	
Efecto del empleo de un generador termoeléctrico sobre el trabajo de bombeo de un motor diésel.	35
<i>Ezzitouni, S.; Fernández Yáñez, P.; Sánchez, L.; Armas, O.</i>	
Análisis de emisión de gases contaminantes en motores de combustión interna con encendido provocado a diferentes altitudes.	48
<i>Arroyo Terán, E.; Cevallos González, A.; Melo Obando, J.</i>	
Simulación por elementos finitos del proceso de inyección del parachoques posterior de un auto deportivo, utilizando para este caso un compuesto de polipropileno modificado.	55
<i>Cargua Colcha, F.; Yupanqui Taipe, O.; Corrales Bastidas, B.</i>	
Evaluación del consumo de combustible, torque y potencia al aplicar la conducción ecológica en la ciudad de Quito.	75
<i>Leguisamo, J.; Remache, A.; Pérez, J.</i>	
Estudio de la incidencia de seguridad en vehículos M1 al utilizar anclajes isofix.	85
<i>Reyes, G.; Iñiguez, J.; Antanmba, J.; Cañizares, C.</i>	
Investigación y diseño de un monociclo eléctrico como movilidad sostenible.	96
<i>Sánchez, L.; Aguilar, J.; Moreno, R.</i>	
Análisis del comportamiento de los imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídicos sobre metal desnudo y su resistencia a factores externos	106
<i>Reyes, G.; Chasi, S.; Castillo, A.; Del Pozo, J. A.; Fuertes, C.</i>	
Evaluación del rendimiento de las gasolinas súper y ecopaís mediante un ciclo típico de conducción para taxis de la ciudad de Cuenca	124
<i>Torres, F.; Coello, M.; Rockwood, R.; Vidal, E.; Inga, V.</i>	
Desarrollo y aplicación de metodología para ejecutar ensayo dinámico de volcadura de autobús interprovincial autoportante, utilizando HyperWorks®	139
<i>Cepeda, J.</i>	
Elaboración de bloques de concreto con resinas de plásticos.	152
<i>Mayorga, D.; Paredes, L.; Viteri, E.; Altamirano, M.; Paredes, A.</i>	

Parámetros mecánicos y eléctricos de los inyectores inductivos riel común al trabajar con mezcla combustible diésel tensoactivos.	166
<i>Erazo Laverde, W. G.; Bassante Barberán, J.; Díaz Vivanco, S.; Quiroz Erazo, J. L.</i>	
Interfaz de un tablero digital para el control de señales del motor en un vehículo fórmula SAE	176
<i>Padilla Padilla, C.; Cuaical Angulo, B.; Buenaño Moyano, L.; Guacho Guado, E.; Villagrán Cáceres, J.</i>	
Análisis de la utilización de equivalentes electromecánicos y su incidencia en la obtención de la relación matemática de transferencia de los sistemas de suspensión	191
<i>Villagrán, W.; Arguello, E.; Cruz, E.; Castelo, J. C.; Sánchez, F.</i>	
Simulación mediante la técnica de Bond-Graph el comportamiento de un mecanismo accionado hidráulicamente	206
<i>Romero, V.; Pancha, J.; Néjer, J.; Rojas, V.</i>	
Utilización de I-X Chart para el control estadístico de proceso en ensayos de desgaste de pastillas y discos de freno originales y alternos en Ecuador	217
<i>Cruz Sigüenza, E. L.; Villagrán Cáceres, W. J.; Arguello, E. E.; Castelo Valdivieso, J. C.; Sánchez Carrión, F. E.</i>	
Desarrollo de un prototipo de un vehículo Audi R8 Spyder no tripulado utilizando comunicación con interfaz gráfica bajo el estándar IEEE 802.11	239
<i>Pastillo Angamarca, J.; Quispe Toapanta, D.; Padilla Padilla, C.; Gavilánez Carrión, J.</i>	
Diagnóstico y monitorizado del funcionamiento de motores de combustión alimentados con gas pobre.	255
<i>Lucero, J. C.; Tinaut, F.; Del Blanco, S.; Peralvo, A.</i>	
Efecto de la extracción de azufre empleando tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM] [BF ₄] en las propiedades de la gasolina comercial	265
<i>Valenzuela, C.; Guzmán Beckmann, L.; Singaña, M.; Donoso, C.</i>	
Recuperación de thinner de los procesos de pintura automotriz por medio de un tanque destilador.	274
<i>Arteaga, O.; Quinga, M.; Ramos Flores, M.</i>	
Análisis estructural a cargas de impacto posterior por alcance de un bus interprovincial mediante el método de elementos finitos	280
<i>Cuasapud Puente, D.; Chamba Monar, E.; Briceño Martínez, B.; Cárdenas Yáñez, A.</i>	
Máquinas de desgaste acelerado para homologación de maquinaria agrícola para aspas de motocultor	296
<i>Bravo Morocho, V.; Castillo Cárdenas, M.; Abarca Pérez, P.; Sánchez Carrión, E.; Montúfar Paz, P.</i>	
Análisis del impacto del sistema de aire acondicionado automotriz sobre el consumo energético y las emisiones de CO ₂ en trayectos extraurbano	309
<i>Vásconez Núñez, D. C.; Payá, J.; González Maciá, J.</i>	

PONENTES INTERNACIONALES



ENRIQUE ALCALÁ

Doctor en Ingeniería Industrial, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Fabricación, del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA). Tiene el cargo de director de la Unidad de Investigación e Ingeniería de Autobuses y Autocares. Pertenece al grupo de Investigación en Seguridad e Impacto Medioambiental de Vehículos y Transportes (GIVET)



OCTAVIO ARMAS

Ingeniero mecánico por la Universidad de Transporte Ferroviario de Moscú (1983). Trabajó como profesor en la Universidad Politécnica de La Habana, entre 1985 y 1995. En 1998 terminó su tesis doctoral en la Universidad Politécnica de Valencia bajo la supervisión del Prof. Francisco Payri. Actualmente trabaja como catedrático de máquinas térmicas en la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM) en la ciudad de Toledo (España). Asimismo, es el director del Grupo de Investigación en Procesos de Energía y Medio Ambiente (GPEM)



ALBERTO AYALA

Ph.D. en Ingeniería Mecánica de la Universidad de California. Se entrenó en el Centro Global de Investigaciones de la compañía General Electric en Nueva York, la Comisión de Energía de California, y el Laboratorio de Túnel de Viento Atmosférico de la Universidad de California. El Dr. Ayala ha publicado cerca de 100 artículos científicos y otros trabajos, es un frecuente conferencista a nivel nacional e internacional, y es Profesor Visitante en varias universidades a nivel mundial.



MICHAEL GIRALDO

Ingeniero mecánico por la Universidad EAFIT, con maestría en Ingeniería Automotriz y Doctorado en Ciencia de Ingeniería, ambas por el Tec. de Monterrey. Con experiencia en docencia e investigación, que han derivado en publicaciones de alto impacto sobre emisiones vehiculares, patrones de conducción, eco-driving, análisis de esfuerzos, fatiga y vibraciones en carrocerías, con aplicación en sistemas de manufactura y producción automotriz.



HELMER ACEVEDO

Ingeniero mecánico por la Universidad de América, con maestrías en Ingeniería Mecánica y en Energía Renovable; doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Leeds. Director de proyectos enfocados en eficiencia energética, reducción de emisiones, mejoramiento y optimización de procesos, incremento en la competitividad de las compañías, cumplimiento en la regulación ambiental local y dentro del marco de políticas globales en cambio climático.



JULIO CÉSAR CUISANO

Ingeniero Mecánico de Fluidos por la Universidad San Marcos (2000), Máster en Ingeniería Mecánica por la PUC-Rio (2006) y Doctor en Ingeniería Mecánica (área de petróleo y energía) en la PUC-Rio, Brasil. (2011). Ganador de los premios BAHAGAS de Innovación, PETROBRAS de Tecnología y ÓSCAR NIEMAYER del Colegio de Ingenieros de Rio de Janeiro. Trabajó como ingeniero de proyectos del área de energía, también como ingeniero de investigación y coordinador de proyectos del Laboratorio de Ingeniería Vehicular de la PUC-Rio. Desde Octubre de 2013 trabaja como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



OSVALDO ZORZANO

Diseñador Gráfico de Instituto Arcos (1994). Master en Diseño de Vehículos en la Scuola Politecnica di Design (2010). Magister en Didáctica Proyectual de la U. de Bío Bío (2012). Trabaja en la línea tecnológica de la Carrera de Diseño de la U. de Chile, desde 1998. Actualmente imparte Tecnología Gráfica e Introducción al Diseño de Vehículos (electivo), además de guía de Proyectos de Título. Su línea de Investigación, Creación y Extensión está vinculada a la asesoría y colaboración en proyectos experimentales de transporte urbano, tales como Carrera Solar Atacama (ONG La Ruta Solar), y vehículos como Vilti, y Sôki (en alianza con la empresa chilena Voze).

LISTA ALFABÉTICA DE AUTORES

Abarca Pérez, P.
Aguilar, J.
Altamirano, M.
Antamba, J.
Arguello, E. E.
Armas, O.
Arroyo Terán, E.
Arteaga, O.
Bassante Barberán, J.
Benavides, I.
Bravo Morocho, V.
Briceño Martínez, B.
Cañizares, C.
Cárdenas Yáñez, A.
Cargua Colcha, F.
Castelo Valdivieso, J. C.
Castillo Cárdenas, M.
Castillo, A.
Cepeda, J.
Cevallos González, A.
Chamba Monar, E.
Chasi, S.
Coello, M.
Corrales Bastidas, B.
Cruz Siguenza, E. L.
Cruz, E.
Cuasapud Puente, D.
Del Blanco, S.
Del Pozo, J. A.
Díaz Garcés, F.
Díaz Vivanco, S.
Donoso, C.
Erazo Laverde, W. G.
Ezzitouni, S.;
Fernández Yáñez, P.
Freire Martinez, L.
Fuertes, C.
García Contreras, R.
Gavilánez Carrión, J.
Gómez, A.
Gonzálvez Maciá, J.
Guacho Guado, E.
Guzmán-Beckmann, L.
Hernández, P.
Imbaquingo, R.
Inga, V.
Iñiguez, J.
Iván E. Yáñez Z., I.
Leguisamo, J.
Lucero, J. C.
Mata, C.
Mayorga, D.
Melo Obando, J.
Montúfar Paz, P.
Moreno, R.
Néjer, J.
Padilla Padilla, C.
Pancha, J.
Paredes, A.
Paredes, L.
Pastillo Angamarca, J.
Payá, J.
Peralvo, A.
Pérez, J.
Quinga, M.
Quiroz Erazo, J. L.
Quispe Toapanta, D.
Ramos Flores, M.
Remache, A.
Reyes, G.
Rockwood, R.
Rojas, V.
Romero, V.
Sánchez Carrión, F. E.
Sánchez, L.
Singaña, M.
Soriano, J. A.
Tinaut, F.
Torres, F.
Valenzuela, C.
Vásconez Núñez, D.C.
Vidal, E.
Villagrán Cáceres, W. J.
Viteri, E.
Yupanqui Taipe, O.

Análisis del tiempo para llegar al equilibrio térmico en el proceso de transferencia de calor por conducción.

Analysis of the time to reach thermal equilibrium in the process of heat transfer by conduction.

Ing. Iván E. Yáñez Z., MSc.¹

RESUMEN

En el presente artículo de investigación se analiza el tiempo que tardan en llegar al equilibrio térmico en el proceso de transferencia de calor por conducción tres metales conocidos: Hierro, Aluminio y Cobre. Se analiza el modelo matemático de transferencia de calor por conducción y se analiza los tiempos para cada metal, los tiempos de equilibrio térmico de los metales puestos en contacto unos con otros por parejas, el tiempo de equilibrio si se los pone en contacto a los tres simultáneamente. Finalmente se realiza un análisis del tiempo de equilibrio en relación a la ley CERO de la termodinámica.

Palabras Clave: tiempo de equilibrio térmico; conducción del calor

ABSTRACT

In this research article we analyze the time it takes to reach thermal equilibrium in the heat transfer process by conducting three known metals: Iron, Aluminum and Copper. The mathematical model of conduction heat transfer is analyzed and the times for each metal are analyzed, the thermal equilibrium times of the metals put in contact with each other in pairs, the time of equilibrium if they are put in contact. Finally, an equilibrium time analysis is performed in relation to the ZERO law of thermodynamics.

Key words: thermal equilibrium time; heat conduction;

1. INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación presenta un análisis de como varia los tiempos para alcanzar el equilibrio térmico en el proceso de transferencia de calor por conducción. El Objetivo es determinar teóricamente el tiempo que un sistema tarda en llegar al equilibrio termodinámico, comparar los resultados teóricos y hacer un análisis temporal de la ley cero de la termodinámica (CENGEL, 2015). Sean tres bloques A, B, C de distintos materiales, si A y B están en equilibrio térmico, y si B y C están en equilibrio térmico, entonces se puede concluir que A y C están en equilibrio térmico. Pero en relación a los tiempos que sucede, en este trabajo de investigación el objetivo es determinar que sucede con los tiempos de equilibrio relacionados con la ley CERO de la termodinámica.

Si A y B están en equilibrio térmico, entonces las temperaturas son iguales $T_A = T_B$;

Si B y C están en equilibrio térmico, entonces las temperaturas son iguales $T_B = T_C$;

Matemáticamente se cumple que las temperaturas $T_A = T_C$ entonces se puede concluir que A y C están en equilibrio térmico (SHAPIRO, 2004).

¹ Universidad UTE, Quito – Ecuador (ivan.yanez@ute.edu.ec)

El calor es una forma de energía, la cantidad de calor que recibe o pierde un cuerpo depende de la variación de temperatura, de la masa y del material.

$$Q = cm\Delta T; \quad [1]$$

Q: Calor, en el SI, Joule

M: Masa, en el SI, Kg

ΔT : Variación de Temperatura, en el SI, Kelvin, K

c: Se denomina calor específico, es característico del material.

Cuando existe variación de temperatura, se producen fenómenos de transferencia de calor, la energía fluye de la parte caliente a la más fría, en este artículo se hace un análisis de temporalidad de la conducción de calor hasta llegar al punto de equilibrio, por facilidad el análisis se hace en un volumen cilíndrico, o cubico. La descripción teórica de la propagación del calor por conducción viene descrita por la ecuación del calor, estudio realizado por Fourier.

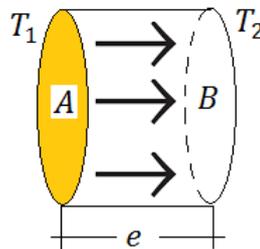


Figura 1. Flujo de calor

T_1 : Temperatura de cara A, caliente

T_2 : Temperatura de cara B, fría

e: Espesor

Q/t : Potencia de Conducción

$T_1 > T_2$;

$$\frac{Q}{t} = -\frac{kS(T_2 - T_1)}{e}; \quad [2]$$

S: Área de flujo

k: Conductividad térmica

e: espesor

La conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para conducir el calor y es característica del material (Uher, 2004), su valor se determina experimentalmente, mediante el uso de pulsos laser de alta intensidad y corta duración (PARKER, 2004), de igual manera se determina el calor específico y la difusividad térmica.

2. METODOLOGÍA

El método a usar es teórico, primero se plantea el modelo matemático de equilibrio térmico, se determina los tiempos, y luego se compara con tablas para confirmar el modelo teórico.

- Cálculo del tiempo de equilibrio térmico para dos cuerpos que tienen distinta temperatura y están en contacto.
- Cálculo de tiempos de equilibrio para algunos metales
- Análisis de los tiempos de equilibrio para la ley CERO de la termodinámica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Tiempo de equilibrio de dos cuerpos A, B en contacto:

Sea A un cuerpo que se encuentra a temperatura T_1

Sea B un cuerpo que se encuentra a temperatura T_2

$$T_1 > T_2$$

Se los pone en contacto y se procede a calcular el tiempo que tardan los cuerpos en llegar al equilibrio térmico, es decir cuando los cuerpos tienen la misma temperatura final T .

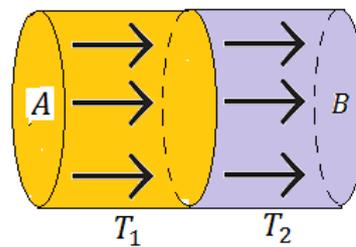


Figura 2. Flujo de calor entre dos metales A, B

Sea T la temperatura de equilibrio del sistema, se verifica entonces:

$$T_1 > T > T_2;$$

La cantidad de calor que pierde A es igual a la cantidad de calor que gana B, hasta llegar al equilibrio térmico, en general para masas diferentes y distintos materiales:

$$Q_{\text{perdido A}} = Q_{\text{ganado B}};$$

$$c_A m_A (T_1 - T) = c_B m_B (T - T_2);$$

Por tanto la temperatura de equilibrio de los cuerpos será:

$$c_A m_A T_1 - c_A m_A T = c_B m_B T - c_B m_B T_2;$$

$$c_A m_A T_1 + c_B m_B T_2 = c_A m_A T + c_B m_B T;$$

$$c_A m_A T_1 + c_B m_B T_2 = (c_A m_A + c_B m_B) T;$$

$$T = \frac{c_A m_A T_1 + c_B m_B T_2}{c_A m_A + c_B m_B}; \quad [3]$$

Para este ejemplo se supone volúmenes iguales, por tanto $S_A = S_B = S$ y el espesor que ahora es la altura del cilindro (e) se tiene:

$$T = \frac{c_A \delta_A T_1 + c_B \delta_B T_2}{c_A \delta_A + c_B \delta_B};$$

A continuación se calcula el tiempo de flujo de energía, hasta que el sistema llega al equilibrio térmico, usando la ley de Fourier [2]. El flujo de energía hasta que el sistema llega al equilibrio, es el calor perdido por A, que es el mismo que gana B, por tanto:

$$\frac{c_A m_A (T_1 - T)}{t} = \frac{c_B m_B (T - T_2)}{t} = -\frac{k_B S_B (T_2 - T_1)}{e};$$

Utilizando el primer término de la igualdad triple:

$$t = \frac{ec_A m_A (T_1 - T)}{k_B S_B (T_1 - T_2)}; \quad [4]$$

$$t = \frac{ec_A (S_A \delta_A e) (T_1 - T)}{k_B S_B (T_1 - T_2)}; \text{ suponiendo } S_A = S_B = S;$$

$$t = \frac{c_A \delta_A e^2 (T_1 - T)}{k_B (T_1 - T_2)};$$

O si utiliza el segundo término de la igualdad triple:

$$t = \frac{ec_B m_B (T - T_2)}{k_B S_B (T_1 - T_2)};$$

$$t = \frac{ec_B (S_B \delta_B e) (T - T_2)}{k_B S_B (T_1 - T_2)}; \text{ simplificando } S$$

$$t = \frac{e^2 (T - T_2)}{\alpha_B (T_1 - T_2)};$$

3.2 Tiempo de equilibrio para algunos metales

Por facilidad para el análisis de tiempos se supondrá que tanto el cuerpo A como el B son del mismo material, tienen la misma masa y ambos son cilíndricos. Por tanto:

$$c_A = c_B = c;$$

$$\delta_A = \delta_B = \delta;$$

$$k_A = k_B = k;$$

Por lo que la temperatura de equilibrio [3] se reduce a:

$$T = \frac{c\delta T_1 + c\delta T_2}{c\delta + c\delta};$$

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2};$$

Si se reemplaza T en la ecuación del tiempo de equilibrio [4], se obtiene:

$$t = \frac{c\delta e^2 \left(T_1 - \frac{T_1 + T_2}{2} \right)}{k(T_1 - T_2)};$$

$$t = \frac{c\delta e^2 \left(\frac{T_1 - T_2}{2} \right)}{k(T_1 - T_2)};$$

$$t = \frac{c\delta e^2}{2k};$$

Reemplazando en la ecuación anterior la difusividad térmica (α),

$$\alpha = \frac{k}{c\delta}; \text{ unidades } \left[\frac{m^2}{s} \right];$$

Se tiene finalmente la siguiente ecuación para el cálculo del tiempo de equilibrio térmico:

$$t = \frac{e^2}{2\alpha};$$

a) Cálculo del tiempo de equilibrio térmico para el Hierro, valores Tabla 1.

$$\alpha = 23,1 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right];$$

$$e = 1 [m];$$

$$t = \frac{1}{2(23,1 \times 10^{-6})} = 21645,02 \text{ segundos};$$

$$t = 6,01 \text{ hs}$$

b) Cálculo del tiempo de equilibrio térmico para el Aluminio

$$\alpha = 97,1 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right];$$

$$e = 1 [m];$$

$$t = \frac{1}{2(97,1 \times 10^{-6})} = 5149,33 \text{ segundos};$$

$$t = 1,43 \text{ hs}$$

c) Cálculo del tiempo de equilibrio térmico para el Cobre

$$\alpha = 113 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right];$$

$$e = 1 [m];$$

$$t = \frac{1}{2(117 \times 10^{-6})} = 4273,50 \text{ segundos};$$

$$t = 1,2 \text{ hs}$$

3.3 Análisis de la ley CERO mediante tiempos de equilibrio

Sean tres cuerpos A, B, C, inicialmente el sistema tiene las condiciones iniciales:

A está a temperatura T_1 ;

B está a temperatura T_2 ;

C está a temperatura T_3 ;

Solo por facilidad se supone que A, B y C son del mismo material y tienen la misma geometría o volumen.

$$c_A = c_B = c;$$

$$\delta_A = \delta_B = \delta;$$

$$k_A = k_B = k;$$

$$S_A = S_B = S;$$

$$T_1 \neq T_2 \neq T_3;$$

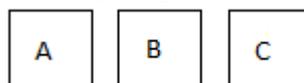


Figura 3. Tres cuerpos A, B, C separados

- a) Primero se pone en contacto A y B, se encuentra el tiempo y temperatura de equilibrio de AB. Luego AB se pone en contacto con C, se encuentra el tiempo ABC y la temperatura ABC.

Se pone en contacto A con B.



Figura 4. Cuerpo A, B en contacto

$$t_{AB} = \frac{c_A \delta_A e^2 (T_1 - T_{AB})}{k_B (T_1 - T_2)}; T_{AB} = \frac{c_A \delta_A T_1 + c_B \delta_B T_2}{c_A \delta_A + c_B \delta_B};$$

$$t_{AB} = \frac{c_A \delta_A e^2 \left(T_1 - \frac{c_A \delta_A T_1 + c_B \delta_B T_2}{c_A \delta_A + c_B \delta_B} \right)}{k_B (T_1 - T_2)};$$

$$t_{AB} = \frac{c_A \delta_A e^2 \left(\frac{c_A \delta_A T_1 + c_B \delta_B T_1 - c_A \delta_A T_1 - c_B \delta_B T_2}{c_A \delta_A + c_B \delta_B} \right)}{k_B (T_1 - T_2)};$$

$$t_{AB} = \frac{c_A \delta_A e^2 \left(\frac{c_B \delta_B (T_1 - T_2)}{c_A \delta_A + c_B \delta_B} \right)}{k_B (T_1 - T_2)};$$

$$t_{AB} = \frac{c_A \delta_A e^2 c_B \delta_B}{k_B (c_A \delta_A + c_B \delta_B)};$$

$$t_{AB} = \frac{e^2}{\alpha_B \left(1 + \frac{\alpha_A k_B}{\alpha_B k_A} \right)};$$

Si los materiales A, B, C son iguales y lo único que difiere es la temperatura, se tiene para el conjunto de bloques AB, lo siguiente:

$$t_{AB} = \frac{e^2}{2\alpha}; T_{AB} = \frac{T_1 + T_2}{2};$$

Ahora se pone en contacto el conjunto AB con C, usando [3] y [4], se obtiene el tiempo de equilibrio y la temperatura final.

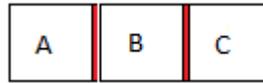


Figura 5. Cuerpo A, B y C en contacto

$$T = \frac{c_A m_{AB} T_{AB} + c_C m_C T_3}{c_{AB} m_{AB} + c_C m_C}; t = \frac{ec_{AB} m_{AB} (T_{AB} - T)}{k_C S (T_{AB} - T_3)};$$

Como A, B, y C son del mismo material y tienen igual volumen se tiene, simplificando el calor específico y como la masa de AB es 2m, en este caso A, B y C tienen la misma masa (m):

$$T = \frac{2mT_{AB} + mT_3}{2m + m}; t = \frac{ec2m(T_{AB} - T)}{kS(T_{AB} - T_3)};$$

$$T = \frac{2T_{AB} + T_3}{3}; \text{reemplazando } T_{AB} \text{ se tiene:}$$

La temperatura final del sistema

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3};$$

El tiempo de equilibrio del conjunto AB con C es:

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \right)}{kS \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_3 \right)};$$

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{3T_1 + 3T_2 - 2T_1 - 2T_2 - 2T_3}{6} \right)}{kS \left(\frac{T_1 + T_2 - 2T_3}{2} \right)};$$

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{T_1 + T_2 - 2T_3}{6} \right)}{kS \left(\frac{T_1 + T_2 - 2T_3}{2} \right)};$$

$$t_{(AB)C} = \frac{2ecm}{3kS};$$

$$t_{(AB)C} = \frac{2ecSe\delta}{3kS};$$

$$t_{(AB)C} = \frac{2c\delta e^2}{3k};$$

$$t_{(AB)C} = \frac{2e^2}{3\alpha};$$

El tiempo total para llegar al equilibrio térmico para los tres cuerpos A, B y C es:

$$t = t_{AB} + t_{(AB)C};$$

$$t = \frac{e^2}{2\alpha} + \frac{2e^2}{3\alpha};$$

$$t = \frac{7e^2}{6\alpha};$$

- b) Se pone en contacto B y C, se encuentra el tiempo y temperatura de equilibrio de BC. Luego BC se pone en contacto con A, se encuentra el tiempo ABC y la temperatura ABC.

Se pone en contacto B con C.



Figura 6. Cuerpo B, C en contacto

$$t_{BC} = \frac{c_B \delta_C e^2 (T_2 - T_{BC})}{k_C (T_2 - T_3)}; T_{BC} = \frac{c_B \delta_B T_2 + c_C \delta_C T_3}{c_B \delta_B + c_C \delta_C};$$

$$t_{BC} = \frac{e^2}{\alpha_C \left(1 + \frac{\alpha_B k_C}{\alpha_C k_B}\right)};$$

Como los materiales A, B, C son iguales y lo único que difiere es la temperatura, se tiene para el conjunto de bloques BC, lo siguiente:

$$t_{BC} = \frac{e^2}{2\alpha}; T_{BC} = \frac{T_2 + T_3}{2};$$

Ahora se pone en contacto el conjunto BC con A, usando [3] y [4], se obtiene el tiempo de equilibrio y la temperatura final.

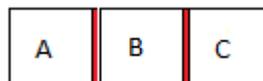


Figura 7. Cuerpo A, B y C en contacto

$$T = \frac{c_{BC}m_{BC}T_{BC} + c_A m_A T_1}{c_{BC}m_{BC} + c_A m_A}; t = \frac{ec_{BC}m_{BC}(T_{BC} - T)}{k_A S(T_{BC} - T_1)};$$

Como A, B, y C son del mismo material y tienen igual volumen se tiene, simplificando el calor específico y como la masa de BC es 2m:

$$T = \frac{2mT_{BC} + mT_1}{2m + m}; t = \frac{ec2m(T_{BC} - T)}{kS(T_{BC} - T_1)};$$

$$T = \frac{2T_{BC} + T_1}{3}; \text{reemplazando } T_{BC} \text{ se tiene:}$$

La temperatura final del sistema

$$T = \frac{T_2 + T_3 + T_1}{3};$$

El tiempo de equilibrio del conjunto BC con A es:

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \right)}{kS \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_1 \right)};$$

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{3T_2 + 3T_3 - 2T_1 - 2T_2 - 2T_3}{6} \right)}{kS \left(\frac{T_2 + T_3 - 2T_1}{2} \right)};$$

$$t = \frac{ec2m \left(\frac{T_2 + T_3 - 2T_1}{6} \right)}{kS \left(\frac{T_2 + T_3 - 2T_1}{2} \right)};$$

$$t_{(BC)A} = \frac{2ecm}{3kS};$$

$$t_{(BC)A} = \frac{2ecS\delta}{3kS};$$

$$t_{(BC)A} = \frac{2c\delta e^2}{3k};$$

$$t_{(BC)A} = \frac{2e^2}{3\alpha};$$

El tiempo total para llegar al equilibrio térmico para los tres cuerpos A, B y C es:

$$t = t_{BC} + t_{(BC)A};$$

$$t = \frac{e^2}{2\alpha} + \frac{2e^2}{3\alpha};$$

$$t = \frac{7e^2}{6\alpha};$$

- c) Se pone en contacto A, B y C al mismo tiempo, se encuentra el tiempo y temperatura de equilibrio de ABC.

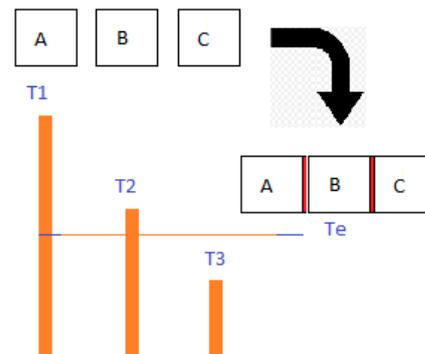


Figura 8. Temperatura de equilibrio de A, B y C en contacto

Para este ejemplo: $T_1 > T_2 > T_3$, igual que en los casos anteriores las masas, los materiales y el volumen de A, B, C son iguales.

La suma de las energías de los cuerpos que ganan y la energía que otros pierden es nula, o lo que es lo mismo por la conservación de la energía, la energía que pierde A, B la gana C.

Sea T la temperatura de equilibrio, entonces:

$$cm(T - T_1) + cm(T - T_2) + cm(T - T_3) = 0;$$

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3};$$

$$t_{AB} = t_{BC} = \frac{e^2}{2\alpha};$$

3.4 Análisis de tiempos de transferencia de calor por conducción de dos sustancias diferentes:

Tabla 1. Difusividad y Conductividad Térmica, 300K (DeWITT, 1999)

	$\alpha[m^2/s]$	$k[w/mK]$
A: Hierro	$23,1 \times 10^{-6}$	80,2
B: Aluminio	$97,1 \times 10^{-6}$	237
C: Cobre	117×10^{-6}	401

$$t_{AB} = \frac{e^2}{\alpha_B(1 + \frac{\alpha_A k_B}{\alpha_B k_A})}; t_{BA} = \frac{e^2}{\alpha_A(1 + \frac{\alpha_B k_A}{\alpha_A k_B})};$$

$$t_{AB} = 6047,3 [s]; t_{BA} = 17870,5 [s];$$

$$t_{BC} = \frac{e^2}{\alpha_C(1 + \frac{\alpha_B k_C}{\alpha_C k_B})}; t_{CB} = \frac{e^2}{\alpha_B(1 + \frac{\alpha_C k_B}{\alpha_B k_C})};$$

$$t_{BC} = 3555,0 [s]; t_{CB} = 6015,1 [s];$$

$$t_{AC} = \frac{e^2}{\alpha_C(1 + \frac{\alpha_A k_C}{\alpha_C k_A})}; t_{CA} = \frac{e^2}{\alpha_A(1 + \frac{\alpha_C k_A}{\alpha_A k_C})};$$

$$t_{AC} = 4301,1 [s]; t_{CA} = 21505,4 [s]$$

3.2. Discusión

Si el calor fluye de un cuerpo A hacia un cuerpo B, el tiempo que tarda B en ponerse en equilibrio termodinámico con el cuerpo A depende directamente del cuadrado del espesor del cuerpo B, y es inversamente proporcional a la difusividad térmica del cuerpo B. El tiempo que se tarda en llegar al equilibrio térmico no depende de la diferencia de temperatura que produce el flujo de calor.

Comparando tres materiales conductores del calor: Hierro, Aluminio y Cobre, se demuestra que el cobre llega más pronto al equilibrio térmico que el resto de sólidos, siendo el hierro el que más tarda en llegar al equilibrio térmico.

Cuando se tiene tres cuerpos A, B, C y si se ponen en contacto AB y luego AB con C, el tiempo de equilibrio es el mismo que cuando se ponen en contacto BC y luego BC con A. Sin embargo si los tres cuerpos se ponen en contacto al mismo tiempo el tiempo es 2,3 veces menor.

Cuando se ponen en contacto sustancias sólidas de distinto material, el tiempo de equilibrio varía en gran magnitud, por ejemplo si se pone en contacto hierro y cobre, y si el hierro está a más alta temperatura que el cobre, el equilibrio térmico se alcanza en un tiempo menor que en el resto de combinaciones de los tres metales.

Si se juntan el cobre con el hierro pero el cobre está a más alta temperatura, el equilibrio térmico del hierro es el que más tiempo se demora entre todas las combinaciones de los tres metales analizados.

4. CONCLUSIONES

Para los tres materiales mencionados: Hierro, Aluminio y Cobre, el material que más tarda en llegar al equilibrio térmico es el hierro, el tiempo que el hierro tarda en llegar al equilibrio térmico es 21645 segundos, suponiendo un espesor (e) de 1 m.

El Cobre es el material que más rápido llega al equilibrio térmico, el tiempo que el cobre tarda en llegar al equilibrio térmico es 4274 segundos, suponiendo un espesor (e) de 1 m.

Si se pone en contacto dos materiales de los tres que se ha escogido para el análisis, por ejemplo si se pone en contacto Hierro-Aluminio, y el flujo de calor va del hierro al aluminio, el tiempo que tarda el aluminio en llegar al equilibrio térmico con el hierro es de 6047,3 segundos.

Por ejemplo si se pone en contacto Hierro-Cobre, y el flujo de calor va del hierro al cobre, el tiempo que tarda el cobre en llegar al equilibrio térmico con el hierro es de 4301,1 segundos.

Si se pone en contacto Hierro-Cobre, y el flujo de calor va del cobre al hierro, el tiempo que tarda el hierro en llegar al equilibrio térmico con el cobre es muy grande, en magnitud es de 21505 segundos.

REFERENCIAS

1. CENGEL, Y. A. (2015). *TERMODINAMICA*. MEXICO: MCGRAWHILL, 5ta Ed.
2. SHAPIRO, M. (2004). *FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA TÉCNICA*. BARCELONA: REVERTE.
3. PARKER, W. J. (2004). Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 32.
4. Uher. (2004). *Thermal Conductivity of Metals*. Boston: SPRINGER, MA, Department of Physics, University of Michigan.
5. DeWITT, I. F. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: PRENTICE HALL.

Estudio del impacto de la altura sobre el nivel del mar en las emisiones de gases de escape en motores diésel electrónicos.

(Study of the impact of height on sea level in exhaust gas emissions in electronic diesel engines)

C. Mafla^{(1)*}, I. Benavides⁽²⁾, P. Hernández⁽³⁾, R. Imbaquingo⁽⁴⁾.

(1) Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador. E-mail: cnmafla@utn.edu.ec

(2) Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador. E-mail: ibbenavides@utn.edu.ec

(3) Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador. E-mail: ephernandez@utn.edu.ec

(4) Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador. E-mail: rpimbaquingo@utn.edu.ec

* Autor de correspondencia: cnmafla@utn.edu.ec

RESUMEN

En la actualidad la industria automotriz es señalada como uno de los causantes de la contaminación ambiental por el alto impacto que generan las emisiones de gases de escape de los motores de combustión interna. El Ecuador a ser un país con una topografía muy variada donde en pocas horas se puede trasladar de 0 m s. n. m. a 3000 m s. n. m., esto conlleva a estudiar cuales son los niveles de contaminación y en futuros estudios dar alternativas para su solución. Los motores utilizados para las pruebas fueron de encendido por compresión con sistema Common Rail, en los cuales se realizó pruebas a diferentes alturas sobre el nivel del mar (0, 2200 y 3000 m s. n. m.), los gases que se estudiaron fueron: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) gases considerados altamente tóxicos para el medio ambiente. Para las mediciones se utilizó un analizador de gases el cual cumple con las normativas nacionales e internacionales. Los resultados obtenidos demuestran que a mayor altura y por ende menor cantidad de oxígeno en el aire las emisiones de gases tóxicos de escape aumentan, comparando a 0 m s. n. m. y 3000 m s. n. m. se obtuvo un aumento del 64% vol. en CO, 18% vol. en CO₂ y un 36% ppm en NO_x.

Palabras clave: Ambiente, Common Rail, Gases de escape, Motores diésel, m s. n. m.

ABSTRACT

Today, the automotive industry is identified as one of the causes of environmental pollutions because of the high impact of exhaust gas emissions from internal combustion engines. Ecuador to be a country with a very varied topography where in a few hours can be moved from 0 m s. n. m. to 3000 m s. n. m., this implies to study which are the levels of pollution and in future studies give alternatives for its solution. The engines used for the tests were compression ignition with Common Rail system, in which tests were carried out at different heights above sea level (0, 2200 and 3000 m s. n. m.), the gases that were studied were: carbon monoxide (CO), dioxide of Carbon (CO₂) and oxides of Nitrogen (NO_x) gases considered highly toxic to the environment. For the measurements a gas analyser was used which complies with national and international regulations. The results show that at higher altitudes and therefore less oxygen in the air emissions of toxic exhaust gases increase, compared to 0 m s. n. m. and 3000 m s. n. m., an increase of 64% Vol. In CO, 18% vol. In CO₂ and 36% ppm was obtained in NO_x.

Key words: Environment, Common Rail, exhaust gases, diesel engines, m s. n. m.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica ha sido una preocupación creciente en los rubros de salud, medio ambiente y política pública, no sólo en la Zona Metropolitana del Valle de México (zmvm), sino también en diversas ciudades de rápido crecimiento en América Latina, consecuencia principalmente de una marcada tendencia a la motorización en las ciudades de la región (1).

Con la recuperación de la economía mundial y el rápido avance de la globalización, a pesar del gran progreso realizado en energía sostenible (2) y las nuevas tecnologías de energía (3) el motor diésel es una aplicación generalizada para la producción de energía y el uso del transporte, cuya tendencia de desarrollo es la búsqueda de microescala, ahorro de energía, alta eficiencia y baja emisión (4).

Las emisiones de CO, HC y NO_x de los turismos diésel Euro 4/5/6 a baja temperatura de -7°C según el ciclo de arranque en frío, cuyos resultados de investigación demostraron que los contaminantes de emisión aumentaron notablemente a baja temperatura (-7°C) en comparación con la prueba de 22°C (5).

De acuerdo con cifras recientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), por lo menos 100 millones de personas en América Latina y el Caribe están expuestas a niveles de contaminación atmosférica por encima de los que recomienda la OMS (6). Dentro de la región, México, después de Brasil, es el país con el mayor número de muertes inducidas debido a la exposición a contaminantes atmosféricos: la Ciudad de México y su zona conurbada se encuentran todavía en los primeros lugares de las listas de ciudades con peor calidad del aire (7).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) prevé que para el año 2020 la contaminación del aire será la causa ambiental de mortalidad prematura más importante en la región de América Latina y el Caribe, con un impacto hasta de 2% del PIB, producido por gastos públicos en salud, reducciones en productividad, estrés y tiempos de traslado (8).

Los grupos con mayores afectaciones por contaminantes atmosféricos son niños, adultos mayores y personas que sufren deficiencias pulmonares y cardiovasculares; no obstante, por su vulnerabilidad, también las poblaciones de estratos económicos bajos se incluyen en la lista. Los principales efectos del monóxido de carbono (CO) se asocian con afectaciones en el transporte de oxígeno, lo que trae consigo consecuencias como la hipoxia, déficits neurológicos e incluso la mortalidad inducida para personas con afectaciones respiratorias. Por su parte, los óxidos de nitrógeno (NO_x) afectan parámetros de función pulmonar en niños y bronquitis y conjuntivitis en diferentes grupos de edad en exposición prolongada. A pesar de las ventajas para la salud humana que tiene inhalar ciertas concentraciones de CO₂ eq, además de sus impactos ambientales como precursores de calentamiento global, altos niveles de éste pueden producir diversos daños a la salud, sobre todo aquellos asociados a la hiperventilación (9).

Las estimaciones de la relación ingreso-contaminación a nivel microeconómico en ciudades de países en desarrollo son fundamentales para entender cómo frenar los índices de contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero, conforme las ciudades de la región crecen en tamaño e ingreso. También son relevantes en el diseño de políticas públicas no regresivas que apunten a objetivos de reducción de emisiones en un contexto de creciente pobreza urbana (10).

En términos empíricos, dado que los vehículos automotores son la principal fuente de generación de CO, estas emisiones son 7.5 veces más altas que la generación de NO_x (11), el CO es un contaminante de la actividad en general de las personas.

Según la Organización Mundial de la Salud (2015), manifiesta que los gases más preocupantes que emiten los motores de combustión interna a diésel es el monóxido de carbono (CO) y los óxidos nítricos (NOx) como lo indica en la figura 1.

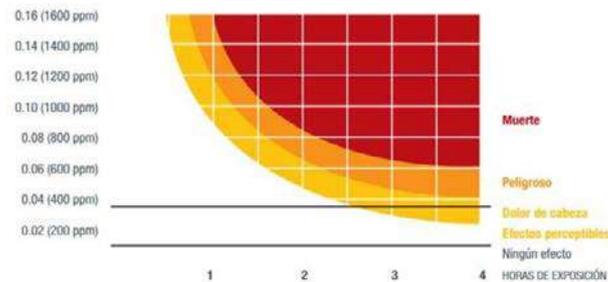


Fig. 1. Efectos del monóxido de carbono en la salud (12)

Según la figura 1 se puede evidenciar la importancia de disminuir la presencia de CO del ambiente; tomando en cuenta los parámetros, las emisiones de CO se vuelven peligrosas a partir de las 400 partes por millón (ppm) por tiempos de exposición prolongados causando hasta la muerte, pasado las 600 ppm es letal para las personas.

El proceso de combustión puede ser considerado como el resultado de un gran número de pequeñas explosiones que suceden por la interacción de cada molécula de combustible con el oxígeno. Cada una de estas explosiones descarga una pequeña cantidad de calor; la suma de estas pequeñas explosiones es lo que da lugar a la aparición de la llama (13).

La velocidad de deflagración de mezclas aire/gas natural a diferentes altitudes, demostrando que existe una tendencia de disminución en el valor de este parámetro cuando se incrementa la altitud del sitio donde se realiza la combustión (14).

Si se considera que la presión de suministro, la composición química de combustible y la geometría del inyector no se modifican, la potencia térmica quedará en función de las condiciones atmosféricas del sitio donde se opera el quemador, particularmente de la presión atmosférica, la cual depende la altura sobre el nivel del mar (15). Los resultados experimentales en motores de combustión interna obtenidos por Amell, muestran que la altitud donde se realiza la combustión afecta de manera adversa la potencia térmica desarrollada, concluyendo que la potencia desarrollada en la combustión disminuye en aproximadamente 1.5% por cada 304 metros de incremento de altitud.

La importancia de estudiar el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de una llama de premezcla es que permite definir criterios apropiados para el diseño, normalización y estudio de intercambiabilidad de gases para regiones situadas a grandes altitudes. Uno de los parámetros que tiene una fuerte incidencia sobre la estructura y estabilidad de una llama de premezcla es la velocidad de degradación (16).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se enfocó en una investigación de campo, de carácter exploratoria, donde el objetivo principal es determinar las emisiones de gases de escape de un vehículo con motor diésel a diferentes alturas sobre el nivel del mar; 0, 2200 y 3000 m s. n. m. Las mediciones se realizaron a diferente horario (mañana, medio día y tarde), en cada horario se realizó tres pruebas estáticas a diferentes revoluciones por minuto del motor; 800, 1500, 2000 y 3000 RPM, las pruebas que se realizaron fueron estáticas, se optó a

diferentes RPM para analizar las emisiones con diferente consumo de combustible. A más revoluciones por minuto trabaje el motor mayor consumo de combustible (17).

2.1 Materiales

Para la ejecución de la investigación se utilizó un vehículo con motor diésel con sistema de inyección electrónica Common Rail 4 cilindros de 2000 cc, cuenta con una potencia de 137 HP y 305 Nm de torque, año 2018. El vehículo se encuentra 100% operativo y funcional, cuenta con 5000 kilómetros de recorrido, todas las pruebas se realizaron en las mismas condiciones al ser un vehículo nuevo no necesitó realizar mantenimiento, a continuación, se presenta la ficha técnica del motor.

Tabla 1. Especificaciones del motor (18)

Motor	Diesel 2.0 Turbo con VGT
Intercooler	Si
Inyección	Multipunto Directa - Common Rail
Turbo alimentación	Si
Cilindrada (cc)	2000
Potencia (HP/RPM)	137
RPM a Potencia Máxima (RPM)	4000
Torque (Nm/RPM)	305 / 1.800 - 2.800

Los equipos que se utilizaron es un analizador de gases de escape de motores diésel AGS 680 marca Brain Bee, cuenta revoluciones MGT de la misma marca, dichos equipos se encuentran calibrados con normas nacionales.

2.2 Método

Para la realización de las pruebas el vehículo debe tener una temperatura mayor a los 80 grados Celsius, de igual manera el analizador de gases de escape debe realizar procedimientos antes de la medición los cuales son; calentamiento del equipo, llevando a una cierta temperatura a los gases nobles para una correcta medición, seguido se realiza la comprobación de estanqueidad de la sonda para que no exista posibles filtraciones de aire al sistema, por último realiza un auto cero que mide los gases del ambiente (oxígeno e hidrocarburos) para comparar con los resultados que se obtienen en las pruebas.

Las pruebas de emisiones de gases CO, CO₂ y NO_x se realizarán a diferentes regímenes del motor; 800, 1500, 2000 y 3000 revoluciones por minuto (RPM). Se determino dichas RPM por ser cuando el motor obtiene un funcionamiento idóneo y por la diferencia de consumo de combustible en cada una, las pruebas se realizaron con el vehículo detenido (pruebas estáticas).

Los lugares donde se realizaron las pruebas son determinantes para los resultados ya que se analizó la presión atmosférica considerando la presencia de oxígenos en los diferentes lugares. La potencia de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) es directamente proporcional a la masa de aire que se consigue introducir en el cilindro, por unidad de tiempo o por embolada (19). Las alturas y condiciones que se realizó las pruebas se detallan a continuación:

Tabla 2. Condiciones atmosféricas

Altura (m s. n. m.)	Presión atmosférica (mbar)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
0	1016	29	71
2200	788	20	63
3000	720	15	61

Cuando el motor y los equipos ya cumplen los requerimientos se procede a insertar la sonda en el tubo de escape del vehículo, se realiza las pruebas a diferentes regímenes del motor, en cada RPM se mide por un lapso de 2 minutos para obtener resultados eficientes. Las pruebas se realizaron a diferentes horas (mañana, medio día y tarde), en cada hora se repitió la prueba por 3 ocasiones, se realizó este método por el cambio de la temperatura donde se espera que las concentraciones de los gases varíen por la presencia de oxígeno, de igual manera a diferente altura el porcentaje de emisiones debe cambiar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de los resultados se comparó por separado las concentraciones de los gases estudiados (CO, CO₂ y NO_x) a diferentes alturas (0, 2200, 3000 m s. n. m.), donde se observará la tendencia de las emisiones de gases de escape. En la tabla 3 se observa los datos obtenidos.

Tabla 3. Emisiones de gases de escape

ALTURA (m s. n. m.)	CO % vol.	CO ₂ % vol.	NO _x ppm vol.
0	0,06	2,07	45,72
2200	0,14	2,42	74,92
3000	0,17	2,51	71,22

3.1 Análisis de monóxido de carbono (CO) a diferente altura

En la figura 2 se puede observar que el porcentaje de volumen de monóxido de carbono (CO) aumenta según la altura esto se debe a la cantidad de oxígeno que ingresa a la cámara de combustión.

Este gas se forma por deficiencia de oxígeno, es decir, combustión incompleta ya que la oxidación no se realiza completamente, generalmente el aumento de CO en un motor Diésel se forma cuando se produce la inyección de combustible en la etapa de pulverización formando gotas demasiado grandes o cuando la turbulencia generada en la cámara de combustión es insuficiente. La tendencia es directamente proporcional, a más altura sobre el nivel del mar mayor emisiones de gases de escape.

Tomando en cuenta las emisiones de CO a 0 m s. n. m. y 3000 m s. n. m. se obtiene un aumento del 75% de volumen, determinando que la ausencia de oxígeno en la combustión no es favorable al buen rendimiento de este.

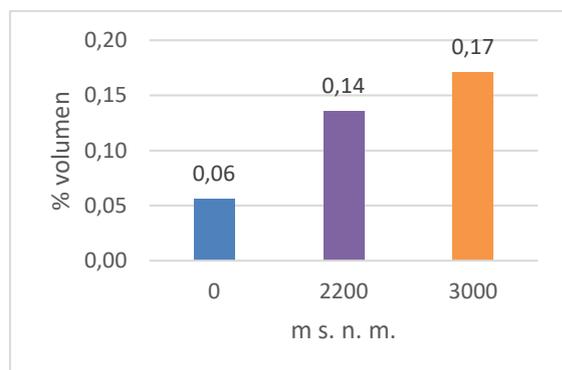


Figura 1. Emisiones de CO a diferentes alturas

3.2 Análisis de dióxido de carbono (CO₂) a diferente altura

En la figura 3 se analiza el dióxido de carbono (CO₂) generado a diferentes alturas sobre el nivel del mar, donde mantiene la tendencia a mayor altura aumenta las emisiones de gases de CO₂. Las emisiones de CO₂ en los motores diésel son relativamente bajas a comparación de los motores a gasolina, las

emisiones de este gas se basan al consumo de combustible, por la tecnología de los sistemas de inyección en motores diésel se obtiene los valores bajos de CO₂ que contribuyen directamente en la conservación del ambiente que benefician al ambiente. Donde a menor presencia de oxígeno en la cámara de combustión la oxidación de la mezcla es deficiente.

El dióxido de carbono a diferentes alturas genera porcentajes donde no se evidencia cambios considerables, obteniendo un aumento del 17% en relación con 0 m s. n. m. y 3000 m s. n. m. Estos datos se obtienen debido a que la computadora (ECU) regula la cantidad de combustible a inyectar, tomando en cuenta los datos de la sonda Lambda para mejorar la combustión. De igual manera el sensor barométrico envía la información a la ECU para que esta pueda realizar una mezcla adecuada según el régimen del motor.

El dióxido de carbono no es un gas directamente contaminante, pero tiene efectos nocivos para el equilibrio del planeta. Este gas se genera por la unión del combustible no oxidado y el oxígeno sobrante de la combustión.

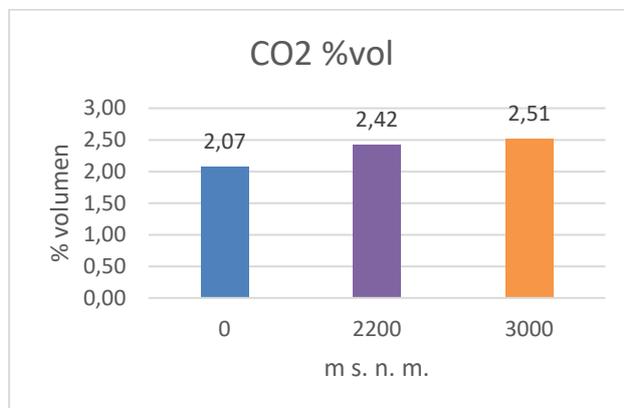


Figura 2. Emisiones de CO₂ a diferente altura

3.3 Análisis de óxidos nítricos (NO_x) a diferente altura

Normalmente el nitrógeno es un gas inerte, es decir, no se combina con otros gases para formar compuestos, en condiciones de altas temperaturas como las que se tiene en la combustión de motores diésel algunas partículas de nitrógeno pueden combinarse con el oxígeno, formando óxido nítrico y dióxido de nitrógeno (NO y NO₂), denominados NO_x. La x representa el número de átomos de oxígeno que suele ser variable, en un motor diésel cuanto mayor temperatura y presión existe en la cámara de combustión la cantidad de NO_x se incrementa, los NO_x al salir por el sistema de escape se unen con el oxígeno del ambiente y mediante la interacción de la luz solar se forma el NO₂ que es más peligroso y contaminante.

En la figura 4 se observa los datos obtenidos de NO_x a diferentes alturas, donde los resultados obtenidos demuestran que a 3000 m s. n. m. disminuye en comparación a 2200 m s. n. m. en un 13%. Dichos datos se obtienen por la calidad y características de aire que se encontró en la zona de medición.

Tomando en cuenta que las emisiones de NO_x aumentan debido a la temperatura y presión de funcionamiento se determinó que los datos obtenidos a 3000 m s. n. m. se basan en la temperatura del aire que ingresa a la cámara de igual manera la temperatura ambiente. Como se indica en la tabla 2 la temperatura en la zona de medición es de 15 grados Celsius lo que ocasiona que la temperatura en la cámara disminuya y por ende la presión de trabajo.

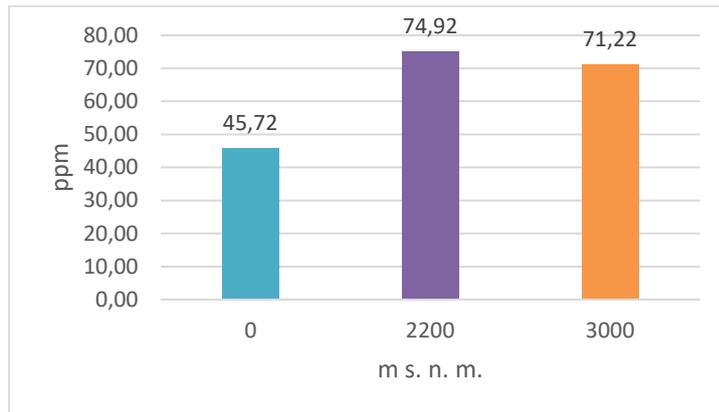


Figura 3. Emisiones de NOx a diferente altura

4. CONCLUSIONES

Las emisiones de gases de escape son directamente proporcionales a la altura, donde se obtiene mayores emisiones de gases de escape a los 3000 metros sobre el nivel del mar a excepción de los NOx donde por la calidad del aire presenta una disminución a comparación de los 2000 m s. n. m.

Comparando las emisiones a 0 m s. n. m. y 3000 m s. n. m. se observa un aumento del 64% en CO, un 18% en CO₂ y un 36% en NOx, exponiendo la relación directamente proporcional entre la emisión de gases contaminantes y la altura.

De las pruebas realizadas se puede observar que los Óxidos de Nitrógeno disminuyen a una altura de 3000 m s. n. m. en relación con los 2200 m s. n. m., por motivos de una menor temperatura del aire que ingresa al motor, corroborando que los óxidos de nitrógeno tienden a formarse por las altas temperaturas que se dan en la cámara de combustión.

REFERENCIAS

1. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (cepal), «La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe.» Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible, pp. 56-79, 2015.
2. J. Yan, S. Chou y E. Dahlquist, «Avances recientes en sistemas de energía sostenible,» Int J Energy Res, n° 37, pp. 1937 - 1938, 2013.
3. S. Chou, K. Chua, J. Ho y C. Ooi, «En el estudio de un invernadero de bajo consumo de energía para aplicaciones de calefacción, refrigeración y deshumidificación,» Appl Energy, n° 77, pp. 355 - 373, 2004.
4. Y. Deng, H. Liu, X. Zhao, J. E y J. Chen, «Efectos de la estrategia de control de arranque en frío en el rendimiento de arranque en frío del motor diesel basado en un modelo integral de motor diesel de precalentamiento,» Energia aplicada, vol. 210, pp. 279-287, 2018.
5. C. Dardiotis, G. Martini, A. Marotta y U. Manfredi, «Emisiones gaseosas de arranque en frío a baja temperatura de automóviles de pasajeros de última tecnología,» Appl Energy, vol. 111, pp. 468 - 478, 2013.
6. L. A. A. J. K. R. O. y. M. A. T. Cifuentes, «Urban Air Quality and Human Health in Latin America and the Caribbean,» Banco Interamericano, pp. 23-31, 2005.

7. V. Pérez Cirera, E. Schmelkes, O. López Corona, F. Carrera, A. García Teruel y G. Teruel, «Ingreso y calidad del aire en ciudades. ¿Existe una curva de Kuznets para las emisiones del transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México?,» *EL TRIMESTRE ECONÓMICO*, vol. 4, n° 340, pp. 745 - 764, 2017.
8. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), «“OCDE Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction”,» Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, pp. 33 - 42, 2012.
9. Organización Mundial de la Salud (OMS), «Contaminación ambiental,» OMS, 2005.
10. D. Virgilio, P. Otero y P. Boniolo, «Pobreza y desigualdad en América Latina y el Caribe,» *Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales*, pp. 56-63, 2011.
11. Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Ciudad de México, «“Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2012”,» Sedema-GDF, 2012.
12. E. Jiaqiang, M. Pham, D. Zhao, Y. Deng, D. Le, W. Zuo, H. Zhu, T. Liu, Q. Peng y Z. Zhang, «Efecto de diferentes tecnologías en la combustión y las emisiones del motor diesel alimentado con biodiesel: una revisión,» *Revisión de energía renovable y sostenible*, pp. 620-647, 2017.
13. C. Velasco Hurtado y J. Velasco Villarroel, «Efectos de la altitud sobre la combustión,» *Revista Metalúrgica*, n° 39, pp. 20-29, 2014.
14. A. AMELL ARRIETA, J. GARCIA POSADA, A. QUILINDO y D. HENAO VALLEJO, «“Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural,» *Facultad de Ingeniería*, pp. 78-81, 2004.
15. A. AMELL ARRIETA, J. AGUDELO y J. CORTEZ, «Verificación experimental del efecto de la altitud sobre a potencia térmica de un quemador atmosférico,» *Facultad de Ingeniería*, pp. 26-35, 2002.
16. A. Amell Arrieta , J. García Posada, A. Quilindo Valencia y . D. Henao Vallejo, «Influencia de la altitud sobre la velocidad de degradación del gas natural,» *Facultad de Ingeniería*, n° 32, pp. 72-81, 2004.
17. G. Ojeda, C. Reyes, I. Izquierdo y R. Campaña, «Requerimientos en el sistema de inyección de combustible para el uso de biodiésel,» *Ingeniería e Industria*, vol. 93, n° 4, pp. 416-420, 2018.
18. Great Wall, «Wingle,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.greatwallmotors.cl/auto/wingle-5-diesel>.
19. J. Miralles, A. Giménez, L. Domenech y V. García, «Efecto de la Relación de Compresión en el Rendimiento de Motores de Combustión Interna a diferentes Altitudes,» *Información Tecnológica*, vol. 4, n° 24, pp. 63-74, 2015.

Estudio del proceso de combustión de un motor Diesel de vehículo ligero usando Biodiesel y combustibles parafínicos puros: GTL y Farnesano

Study of the combustion process of a light-duty Diesel engine using Biodiesel and pure paraffinic fuels: GTL and Farnesane

J.A. Soriano⁽¹⁾, R. García-Contreras^{(1)*}, A. Gómez⁽¹⁾, C. Mata⁽²⁾

¹Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de Excelencia Internacional en Energía y Medioambiente, Escuela de Ingeniería Industrial de Toledo, Real Fábrica de Armas. Edif. Sabatini. Av. Carlos III, s/n, Toledo, 45071, Spain

²Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de Excelencia Internacional en Energía y Medioambiente, Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, Plaza Manuel Meca s/n, Almadén, 13400, Spain

*Correspondencia. Tel.: +34 926295300 Ext: 3845, mariareyes.garcia@uclm.es (R. García-Contreras)

RESUMEN

El efecto de un nuevo combustible parafínico de origen renovable (Farnesano) sobre las características del proceso de combustión en un motor Diesel ha sido evaluado y comparado con otro combustible parafínico (GTL – Gas - To Liquid), con un Biodiesel (de palma y soja) y con un diésel convencional (sin Biodiesel). Se han seleccionado cinco modos de funcionamiento estacionarios que abarcan la mayor parte del mapa par-régimen correspondiente a las condiciones de operación del ciclo New European Driving Cycle (NEDC). En los modos de menor carga (denominados A y C) no se observan diferencias entre combustibles, comenzando la liberación de calor después de la inyección principal. En los otros tres modos (los de media y alta carga, de los cinco seleccionados, denominados E, G e I), las condiciones térmicas favorecen la combustión de la pre-inyección, escalándose el comienzo de la combustión con el número de cetano de los combustibles. En cuanto a la velocidad de combustión, los combustibles parafínicos presentan una combustión más lenta que el diésel y el Biodiesel en modos de baja carga, invirtiéndose esta tendencia cuando la potencia es elevada. Comparando ambos combustibles parafínicos, el Farnesano, a pesar tener un mayor retraso en el inicio de la combustión que el GTL, muestra una mayor velocidad de combustión.

Palabras clave: diagnóstico termodinámico, Farnesano, biocombustibles, tasa de calor liberado, velocidad de combustión.

ABSTRACT

The effect of a new renewable paraffinic fuel (Farnesane) on the combustion characteristics of a Diesel engine was evaluated and compared to other fossil paraffinic fuel (GTL – Gas - To Liquid), to a Biodiesel (blend of soybean and palm) and a conventional fossil Diesel (without Biodiesel). Five steady state modes were selected that cover the most part of the engine speed-torque map of the driving conditions established in the New European Driving Cycle (NEDC). At the lowest engine load modes (A and C), no notable differences were observed between fuels, the heat release starting after main injection occurs. At the other three modes (those of medium and high from the five selected, denoted E, G and I), thermal conditions favor combustion of the pre-injection, the start of combustion escalating with the cetane number of the fuels. Regarding combustion duration, paraffinic fuels show a lower velocity than that associated with Diesel and Biodiesel at lowest engine load modes, but the opposite trend is obtained when the effective power increases. Comparing both paraffinic fuels, although the ignition delay of Farnesane fuel is higher than that of GTL fuel, the combustion is faster.

Key words: thermodynamic diagnosis, Farnesane fuel, biofuels, rate of heat release, velocity of combustion.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de nuevos combustibles puros o mezclados con combustibles fósiles en los motores de combustión interna ha aumentado en los últimos años. La implantación de normativas que obligan, por un lado, a que parte de la energía utilizada en el transporte provenga de materia prima renovable y, por otro, a la reducción de las emisiones contaminantes asociadas a este sector, ha fomentado el uso y la investigación de combustibles alternativos al diésel y a la gasolina (Directiva 2009/28/CE). En el caso de los motores de encendido por compresión, el biocombustible

más utilizado es el Biodiesel, cuyas ventajas en cuanto a reducción de emisiones contaminantes, especialmente en cuanto a hidrocarburos sin quemar (THC) y material particulado (PM), han sido ampliamente comentadas en bibliografía (1-3).

Otros combustibles alternativos al diésel, que han sido evaluados en la última década, son los combustibles parafínicos. Dentro de este grupo, el combustible más estudiado es el *Gas-To Liquid* (GTL) obtenido a partir de un proceso *Fischer-Tropsch*, generalmente utilizando gas natural como materia prima. Diversos autores coinciden en que la ausencia de compuestos aromáticos en la composición del GTL es el principal factor que favorece la reducción de PM (4-5). Además, como suelen presentar altos número de cetano, este tipo de combustibles generalmente reducen (o al menos no aumentan) los óxidos de nitrógeno (NO_x), compensando así el problema de *trade-off* característico de los motores diésel (6-7). Dentro de este grupo de combustibles parafínicos se encuentra el Farnesano, el cual es un combustible de origen renovable que se ha utilizado, tradicionalmente, como en aviación. Este biocombustible se obtiene a partir de derivados azucarados que, mediante un proceso de fermentación utilizando microorganismos modificados genéticamente y una posterior hidrogenación generan 2,6,10-trimetildodecano, también conocido como Farnesano. Los trabajos donde se evalúa el efecto de este combustible en motores de vehículos son escasos. Millo et al. (8) evaluaron una mezcla al 30% de este combustible con diésel mientras que en el estudio de Soriano et al. (9) se ensayó este biocombustible puro, observando en ambos casos reducciones en THC y PM sin disminuir sus prestaciones. Por ello, se considera que este combustible presenta potencial para su uso en motores de combustión interna. A pesar de que el GTL y el Farnesano son combustibles parafínicos, la mayor diferencia que presentan es el número de cetano. La diferente longitud de cadena y la ramificación que puedan presentar los combustibles GTL (con respecto al Farnesano) influyen en el valor de este parámetro. En el trabajo de Gowdagiri et al. (10) se muestra que existe una disminución del retraso de la combustión de un 15% al aumentar el número de cetano del combustible en un rango entre 40 y 80.

Además del uso de combustibles más respetuosos con el medio ambiente, las mejoras en el proceso de combustión suponen ventajas no sólo en las prestaciones, sino también en la reducción de emisiones contaminantes. Por ello, la utilización de modelos de diagnóstico termodinámico es una herramienta muy útil para conocer características del proceso de combustión. Los modelos de diagnóstico termodinámico zero-dimensionales han sido utilizados desde la década de los 60 (11-12), evaluando cómo afectan los parámetros del motor (relacionados con la geometría de éste, con el proceso de inyección, etc.) al desarrollo de la reacción de combustión y a nuevos conceptos de combustión en motores diésel (13). Distintos parámetros característicos del proceso de combustión están relacionados con la formación de emisiones contaminantes. El tiempo de retraso en el inicio de la combustión, generalmente definido como el intervalo entre la inyección del combustible y el comienzo de la combustión, este directamente relacionado con la emisión de NO_x . Los combustibles con altos números de cetano implican una rápida autoignición del combustible reduciendo la fase premezclada de la combustión y, por tanto, reduciendo los picos de temperatura que son la principal causa de la formación de los NO_x . Por otro lado, la velocidad de la combustión (definida como el intervalo entre el final de la combustión, 90% de calor liberado, y el inicio de ésta) tiene influencia el crecimiento y/o en la formación de hollín. En la fase difusiva aumenta la tasa de crecimiento de hollín (14), aunque también en esta fase se produce una oxidación de estas partículas. Por tanto, durante esta fase de la combustión se producen dos efectos enfrentados: la formación y la oxidación de las partículas (15).

Diferentes autores han empleado modelos de diagnóstico termodinámico para estudiar las características del proceso de combustión con al utilizar combustibles alternativos. En el estudio de Liu et al. (16) se evaluaron las emisiones y características de combustión de un Biodiesel puro y una mezcla al 85% de éste con diésel. El tiempo de retraso desde la inyección del combustible hasta el inicio de la combustión fue menor con biodiesel y su mezcla con Diesel al 85%, mientras que la duración de la combustión se evaluó en dos tramos: desde el 10% hasta el 50% de calor liberado y un segundo tramo del 50% hasta el 90%. La combustión con el combustible diésel fue más rápida en el primer tramo mientras que la tendencia se invierte en el segundo tramo, siendo las diferencias más notables a medida que las condiciones de carga aumentan, debido a la mayor combustión en la parte difusiva en este tramo. Rajasekar y Selvi (17) justificaron el menor tiempo de retraso en el comienzo de la combustión con Biodiesel por propiedades como el mayor módulo de *bulk*, la mayor viscosidad y el mayor número de cetano. Existen trabajos donde se ha realizado el diagnóstico de la combustión con Biodiesel y otros biocombustibles en condiciones transitorias (18) o reproduciendo ciclos de homologación mediante la realización de diagnóstico *on-line* (19). En el primero de ellos, Armas et al. utilizaron un modelo zero-dimensional para evaluar el efecto de distintos parámetros del motor, como el EGR, sobre la tasa de calor liberado en el proceso de combustión utilizando como combustible tres tipos diferentes

de Biodiesel. El análisis ciclo a ciclo mostró que las diferencias en el proceso de combustión con los distintos combustibles eran despreciables. En (19) se evaluaron dos combustibles parafínicos (un GTL y un aceite vegetal hidrotratado (HVO)) junto con un combustible Diésel de referencia durante el ciclo transitorio europeo de homologación (*New European Driving Cycle*, NEDC). El combustible de referencia mostró un proceso de combustión más rápido y mayor retraso de la ignición.

Con respecto a los combustibles parafínicos, Oguma et al. (20) observaron que al ensayar GTL puro el inicio de la combustión ocurría antes que con el combustible Diésel, lo que supone una menor combustión de la fase premezclada, y por tanto una menor tasa de liberación de calor máxima para el combustible parafínico. Con respecto a la velocidad de combustión, fue mayor para el GTL que para el diésel en condiciones de baja carga, pero los resultados entre ambos combustibles fueron similares en los modos de mayor presión media efectiva ensayados. En el estudio de Soloiu et al. (21), con una mezcla del 20% de GTL y 80% de butanol y una mezcla del mismo porcentaje de butanol con diésel, se observaron tendencias similares siendo, en este caso, la velocidad de combustión con la mezcla de GTL a alta carga también mayor que la correspondiente al Diésel. Nabi y Rasul (22) evaluaron el efecto de dos combustibles n-parafínicos (decano y dodecano) con un diésel convencional en distintas condiciones de carga utilizando un modelo uno-dimensional. Las tendencias obtenidas, respecto al combustible Diésel, fueron similares a las que se han comentado anteriormente y al comparar ambos combustibles parafínicos no se observaron diferencias significativas en los parámetros relativos al proceso de combustión.

En este trabajo se evalúan los distintos parámetros de combustión como: calor liberado, retraso en la combustión, velocidad de combustión, etc., al utilizar un Biodiesel y dos combustibles parafínicos, uno de origen fósil (GTL) y otro de origen renovable obtenido a partir de biotecnología. Este biocombustible apenas ha sido estudiado en motores de combustión interna alternativos puesto que se ha utilizado generalmente en motores de aviación. De los resultados obtenidos, es destacable el menor tiempo de retraso mostrado por el GTL con respecto al resto de combustibles, incluso al compararlo con el Farnesano que presenta también una estructura parafínica. El mayor número de cetano es el principal factor que influye en el comienzo de la combustión, aunque parece no influir de la misma manera en la velocidad de combustión, puesto que el Biodiesel es el que presenta una combustión más rápida. En este caso, es la presencia de oxígeno en el combustible el factor predominante. Con los resultados obtenidos en este trabajo, se pretende proporcionar información útil para la optimización de la estrategia de combustión configuradas en las ECU's al utilizar combustibles alternativos al diésel tradicional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Banco motor.

Los ensayos se han realizado con un motor diésel de 4 tiempos, 4 cilindros, con sobrealimentación e *intercooler* de la marca Nissan. Dicho motor, cuyas principales especificaciones se detallan en la Tabla 1, es representativo de un vehículo ligero tanto en Europa, como en el resto del mundo. Para poder controlar las condiciones de carga del motor, éste se acopla a un freno dinamométrico *Eddy-Current*, modelo E90 de la marca Schenck, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 1. Dicho proceso de control se realiza a través de tres variables: régimen de giro (n), par efectivo (M_e) y posición del acelerador (α). Para conseguir una determinada potencia efectiva, se fija el valor n y el operador varía el valor de α hasta alcanzar el par deseado. Debido a las diferentes propiedades de los combustibles conlleva que, para conseguir el mismo par efectivo, la posición del acelerador sea distinta. Con respecto al resto de parámetros para conseguir dichas condiciones de carga (EGR, presión de inyección, etc.) las establece la unidad de control electrónico (ECU) en función de su calibración o *mapping*. De hecho, a pesar de que el acceso a la ECU es posible mediante el *software* INCA PC, conectado al hardware ETAS ES 592,1, la influencia de los distintos combustibles sobre las prestaciones y emisiones se evaluó sin modificar la configuración de la ECU establecida por defecto por el fabricante.

Tabla 1. Características del motor.

Nomenclatura	NISSAN YD 2.2
Tipo	Diésel, 4 tiempos
Sobrealimentación	Turbo alimentado con <i>intercooler</i>
Sistema de Inyección	<i>Common-rail</i>
Sistema de EGR	Caliente
Nº de cilindros	4, en línea
Diámetro	86,5 mm
Carrera	94 mm
Cilindrada	2.2 L
Válvulas de admisión / cilindro	2
Válvulas de escape / cilindro	2
Potencia máxima	82 kW a 4 000 min ⁻¹
Par máximo	248 Nm a 2 000 min ⁻¹
Relación de compresión	16,7:1

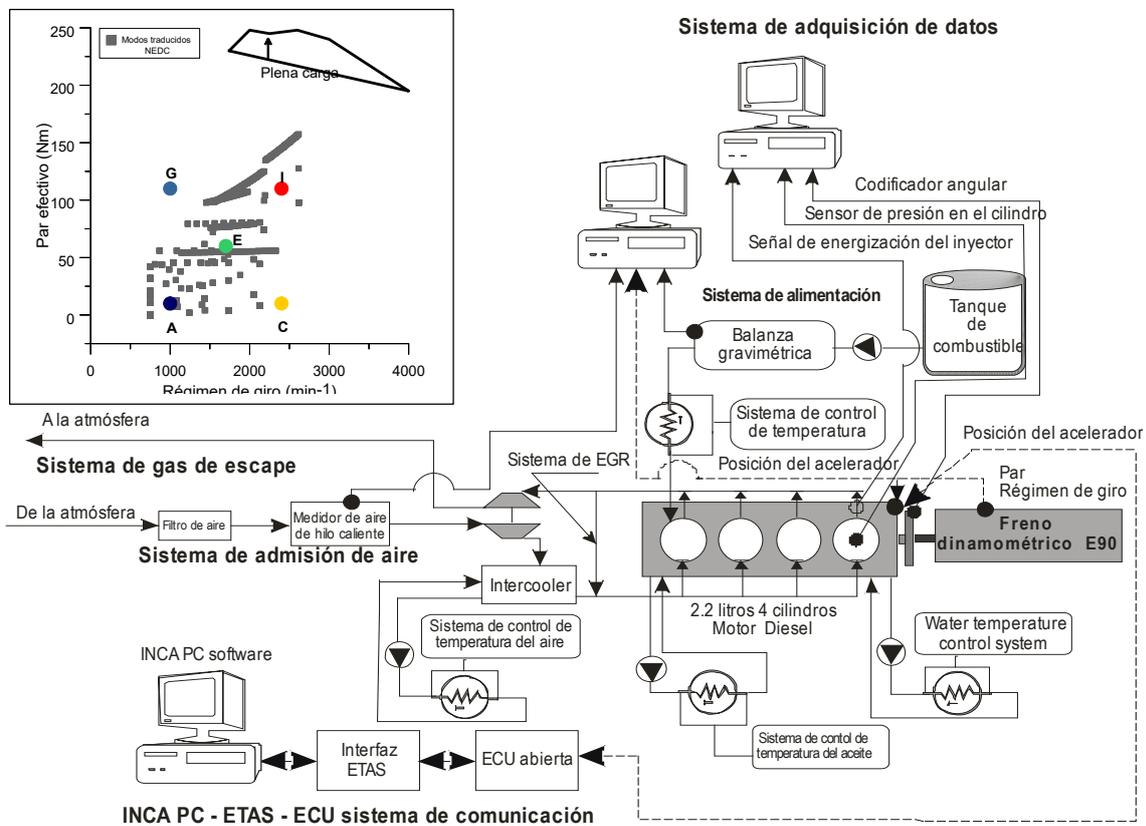


Figura 1. Imagen de los modos de funcionamiento de motor elegidos y esquema del banco motor.

2.2. Diagnóstico termodinámico.

El modelo de diagnóstico utilizado tiene como objetivo proporcionar, como resultado principal, la liberación de calor. Para realizar este cálculo, el modelo utiliza el primer principio de la termodinámica aplicado a sistemas abiertos y la ecuación de estado de los gases. Se trata de un modelo termodinámico zero-dimensional que supone 3 especies (aire, combustible evaporado y productos quemados) y una única zona (23), considerando una serie de hipótesis: el fluido se comporta como un gas perfecto (24), la combustión es estequiométrica, existe transmisión de calor a través de las paredes, pérdidas de masa por *blow-by* (25), etc. A partir de los datos de presión en cámara y de las condiciones de funcionamiento del motor, el modelo proporciona parámetros relativos al proceso de combustión como: calor liberado, tasa de calor liberado, temperatura media del gas en el cilindro, ángulo al que se produce un determinado

porcentaje de liberación de calor, etc. (26). Además, si se le aportan datos relativos a la tasa de inyección o levantamiento de aguja, el modelo proporciona resultados relativos al proceso inyección-combustión.

Por tanto, el programa utiliza los siguientes datos de entrada:

- Presión instantánea en el cilindro. Es el parámetro más importante y el que más afecta a los resultados. En este estudio, dicho parámetro se mide mediante un sensor de presión marca KISTLER modelo 6056A especialmente diseñado para la medida de presiones en máquinas de combustión. La señal de presión es acondicionada y amplificada mediante un amplificador de carga marca KISTLER modelo 5018A. Se registran 20 ciclos para asegurar la repetitividad de los resultados del diagnóstico. La velocidad angular y la posición instantánea del pistón fue determinada mediante un encoder o codificador angular (Kistler 2614CK) con una resolución de 0.5 grados. Los datos fueron registrados en un oscilógrafo grabador digital (Yokogawa DL708E) y transferidos a un ordenador a través de una tarjeta GPIB (*General Purpose Interface Bus*).
- Condiciones de funcionamiento del motor. Distintos valores relativos al modo de funcionamiento del motor como par y régimen, valores de presión y temperatura de admisión del aire, temperatura del refrigerante, etc., son requeridos por el modelo para realizar el diagnóstico termodinámico.
- Datos geométricos del motor. Es necesario introducir en el programa los datos de diámetro del cilindro, carrera del pistón, número de cilindros, cilindrada, etc.
- Propiedades del combustible. Propiedades físico-químicas del combustible como el poder calorífico, densidad o dosado estequiométrico son requeridas para proporcionar parámetros relativos al proceso de combustión.
- Tasa de inyección, gasto másico de combustible y gasto másico de aire. Las tasas de inyección introducidas en el modelo de diagnóstico termodinámico se registraron experimentalmente utilizando la metodología descrita en el trabajo de Armas et al. (27). Para evaluar el gasto másico de combustible se utiliza una balanza gravimétrica, cuya lectura se registra electrónicamente de manera instantánea. El consumo másico de aire se midió mediante un caudalímetro de hilo caliente, modelo 5WK9 628 PBT-GF30 de la marca Siemens. Su principio de funcionamiento consiste en mantener la temperatura constante sobre un pequeño hilo metálico que atraviesa el conducto por donde fluye el aire de admisión.

2.3. Plan de ensayos.

Considerando el objetivo planteado se han seleccionado cinco modos estacionarios. Para la selección de dichos modos, se realizó una traducción de las secuencias propias del ciclo transitorio de homologación a modos estacionarios aplicando ecuaciones de dinámica longitudinal. El perfil de velocidad característico del NEDC fue traducido a condiciones de funcionamiento del motor en términos de par-régimen, dando lugar a los puntos representados en color gris en la parte superior izquierda de la Figura 1. Los puntos coloreados corresponden a los cinco modos seleccionados (A, C, E, G e I) para este trabajo que, como se puede apreciar en dicha figura, cubren la mayor parte de las condiciones de carga establecidas en el ciclo NEDC, por lo que se consideran representativos de las condiciones de operación del motor. A pesar de que los modos C y G se sitúan fuera de dichas condiciones, se han incluido en este estudio puesto que reproducen condiciones de funcionamiento del motor establecidas en el nuevo ciclo de homologación (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles, WLTC*), destacando que en esta zona de trabajo del motor la unidad electrónica de control (ECU) no está optimizada. Las características de estos cinco modos se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los modos estacionarios elegidos.

Modo	Régimen de giro (rpm)	Par efectivo (Nm)	Potencia efectiva (kW)
A	1 000	10	1,1
C	1 000	10	2,5
E	1 700	60	10,7
G	2 400	110	11,5
I	2 400	110	27,6

2.4. Combustibles.

En este trabajo se han seleccionado cuatro combustibles puros:

- Diésel. Corresponde a un combustible Diésel con muy bajo contenido en azufre (<10 ppm), sin Biodiesel, proporcionado por la empresa REPSOL y que se utiliza como combustible de referencia.
- GTL. Combustible *Gas-To Liquid*, de estructura parafínica, obtenido a partir de aplicar a gas natural un proceso *Fischer-Tropsch* a baja temperatura. Fue proporcionado por la empresa surafricana SASOL.
- Farnesano. Combustible renovable de estructura iso-parafínica que, tradicionalmente, se ha utilizado como combustible de aviación. Se obtiene a partir de biomasa azucarada sometida a fermentación, utilizando microorganismos modificados genéticamente lo que dando lugar a la olefina denominada Farneseno. Posteriormente se somete a un proceso de hidrotreatment para obtener una iso-parafina denominada Farnesano (2,6,10-trimetildodecano). Dicho proceso ha sido patentado por la empresa AMYRIS BIOTECHNOLOGY INC., que ha suministrado este combustible.
- Biodiesel. Combustible obtenido a partir de un proceso de transesterificación de aceites vegetales de soja y palma (72% y 28% en volumen, respectivamente), suministrado por la empresa REPSOL. Dichos porcentajes fueron seleccionados debido a que, esta combinación de longitud de cadena y grado de insaturación supone la optimización de las principales propiedades físico-químicas del combustible, sin penalizar las emisiones contaminantes generadas, tal y como se ha comprobado en trabajos previos (28-30).

La composición y las propiedades fisicoquímicas de los combustibles ensayados se muestran en la Tabla 3 (9).

Tabla 3. Propiedades físico-químicas de los combustibles.

Propiedades	Diésel	Farnesano	GTL	Biodiesel
Fórmula Molecular	C _{15,18} H _{29,13} ^a	C ₁₅ H ₃₂	C _{16,89} H _{35,77} ^a	C _{18,52} H _{34,52} O ₂ ^b
Peso molecular [g/mol]	211,4c	212,41	238,6 ^c	289,25
Relación H/C	1,92	2,13	2,12	1,86
Dosado estequiométrico	1/14,64	1/14,92	1/14,95	1/12,46
C [% m/m]	86,13	84,91	84,82	76,91
H [% m/m]	13,87	15,09	15,18	12,03
O [% m/m]	0	0	0	11,06
Densidad a 15°C [kg/m ³]	843	770	771	883
Viscosidad a 40°C [cSt]	2,97	2,32	2,57	4,2
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	41,37	43,39	42,56	37,14
Número de cetano	54,2	56,7 (31)	>73	53,3
POFF [°C]	-17	-40	-7	0
% Destilado	Temperatura (°C)			
10%	207,6	243,5	213,9	279,5
50%	278,2	243,8	269,3	282,7
90%	345,0	244,0	340,7	302,2

^a Calculado mediante el valor del peso molecular y el porcentaje de las distintas familias de hidrocarburos (en el caso del GTL, se considera estructura parafínica). ^b Calculado a partir de la composición en ésteres básicos. ^c Calculado mediante el software *AspenTech HYSYS* a partir del análisis elemental CHNS y el valor densidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestran los datos instantáneos de los parámetros de entrada y de algunos de los resultados que proporciona el programa de diagnóstico termodinámico en dos de los modos de funcionamiento (como ejemplo) seleccionados para este trabajo. Los resultados mostrados corresponden a la media de 20 ciclos analizados para cada combustible en los diferentes modos. Se han representado los modos A (Figura 2a) e I (Figura 2b) al ser el primero de muy baja carga y el segundo de alta carga. La tasa de combustible inyectado y la presión en el cilindro para cada uno de los combustibles (variables de entrada) se muestran en la parte superior de la Figura 2, mientras que la temperatura en el cilindro, la tasa de calor liberado y el calor liberado (resultados proporcionados por el modelo de diagnóstico termodinámico) se representan en las partes media e inferior de dicha figura.

Se observa cómo la inyección del combustible corresponde a una estrategia de inyección “partida”, puesto que la cantidad total de combustible inyectado se divide en una inyección piloto o pre-inyección y una inyección principal. Esta estrategia de inyección se utiliza con el objetivo de disminuir el ruido de combustión y la cantidad de fase premezclada, al reducir el tiempo de retraso como consecuencia de la inyección piloto (32). Generalmente, esto supone también una reducción de la emisión de NO_x , aunque esta tendencia depende de la configuración del motor y del combustible utilizado (33).

Dentro de un mismo modo de funcionamiento, el comienzo de la inyección de los distintos combustibles se produce en un ángulo del cigüeñal muy similar, tanto en la pre-inyección como en la inyección principal, sobre todo en el modo de menor carga. Las diferencias entre combustibles se observan en la duración (en grados) de dichas inyecciones dependiendo, obviamente, de la cantidad de combustible inyectado. En cambio, dónde se producen esas inyecciones y la velocidad del proceso de combustión depende notablemente del modo de funcionamiento.

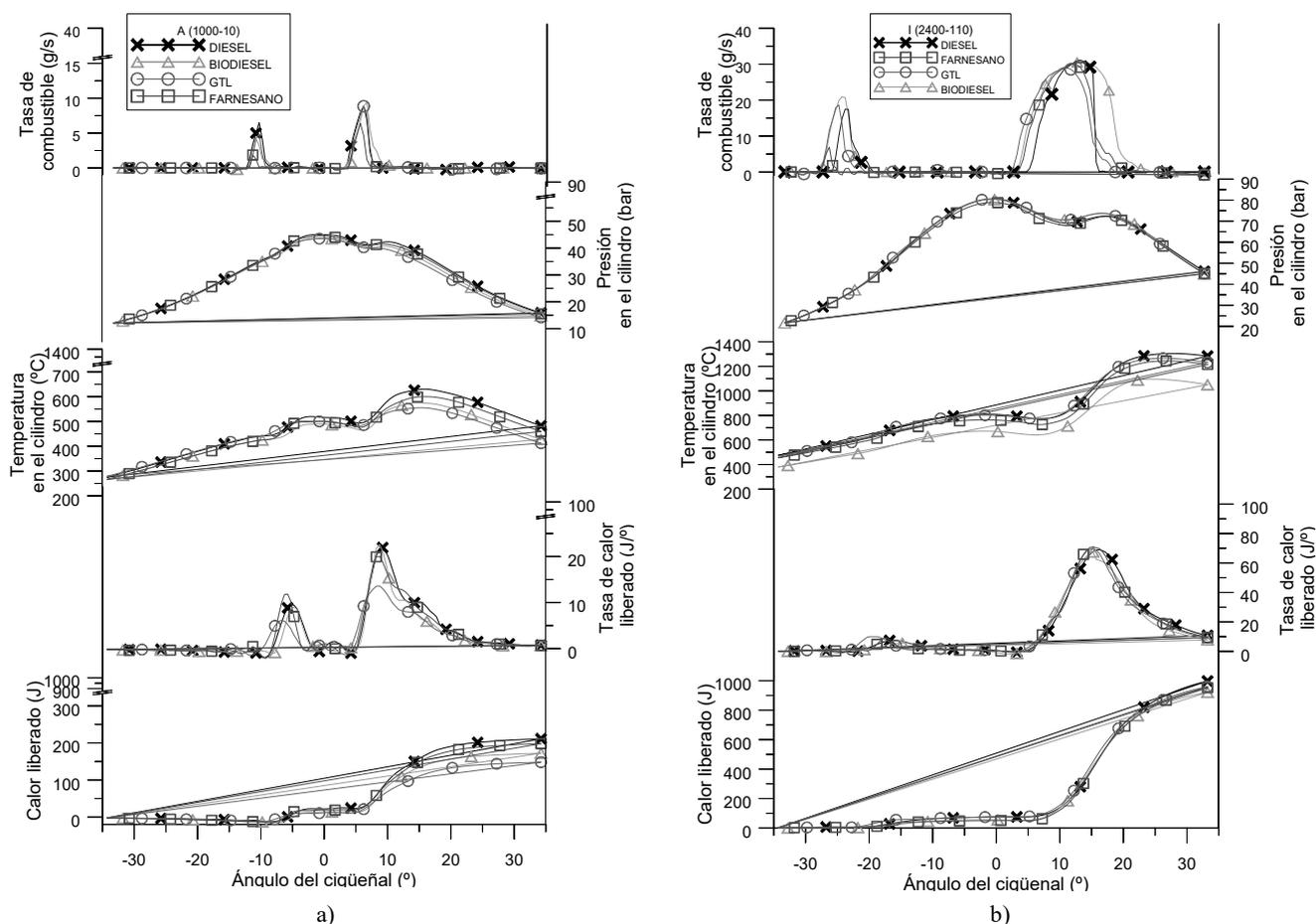


Figura 2. Parámetros instantáneos del diagnóstico termodinámico del proceso de combustión.

Aparte de la presión del cilindro y la tasa de combustible, parámetros instantáneos necesarios para la realización del diagnóstico termodinámico, el modelo necesita otros parámetros de entrada como son, los caudales de combustible y de aire de los cuatro combustibles en los distintos modos de funcionamiento. Los datos de estos parámetros, mostrados en la Figura 3a, permiten justificar tendencias entre combustibles obtenidas en valores medios de los parámetros de salida del modelo. Los valores de consumo de combustible aumentan con la potencia del modo de funcionamiento, pero no de una manera lineal, puesto que el consumo en el modo I es notablemente superior al del resto de modos, tendencia similar a la obtenida en los valores de consumo de aire. Con respecto al efecto del combustible, el consumo de los parafínicos es similar al del diésel, pero con el Biodiesel se obtienen consumos superiores al del resto en todos los modos, aumento debido a su menor poder calorífico. El dosado relativo obtenido con el Biodiesel es el menor en todas las condiciones de funcionamiento, tendencia que se justifica por dos razones: por un lado, el consumo de aire es mayor con el Biodiesel (sobre todo en los modos E e I) y, por otro, el incremento en el consumo de Biodiesel no es de la misma magnitud que el incremento de los dosados estequiométricos.

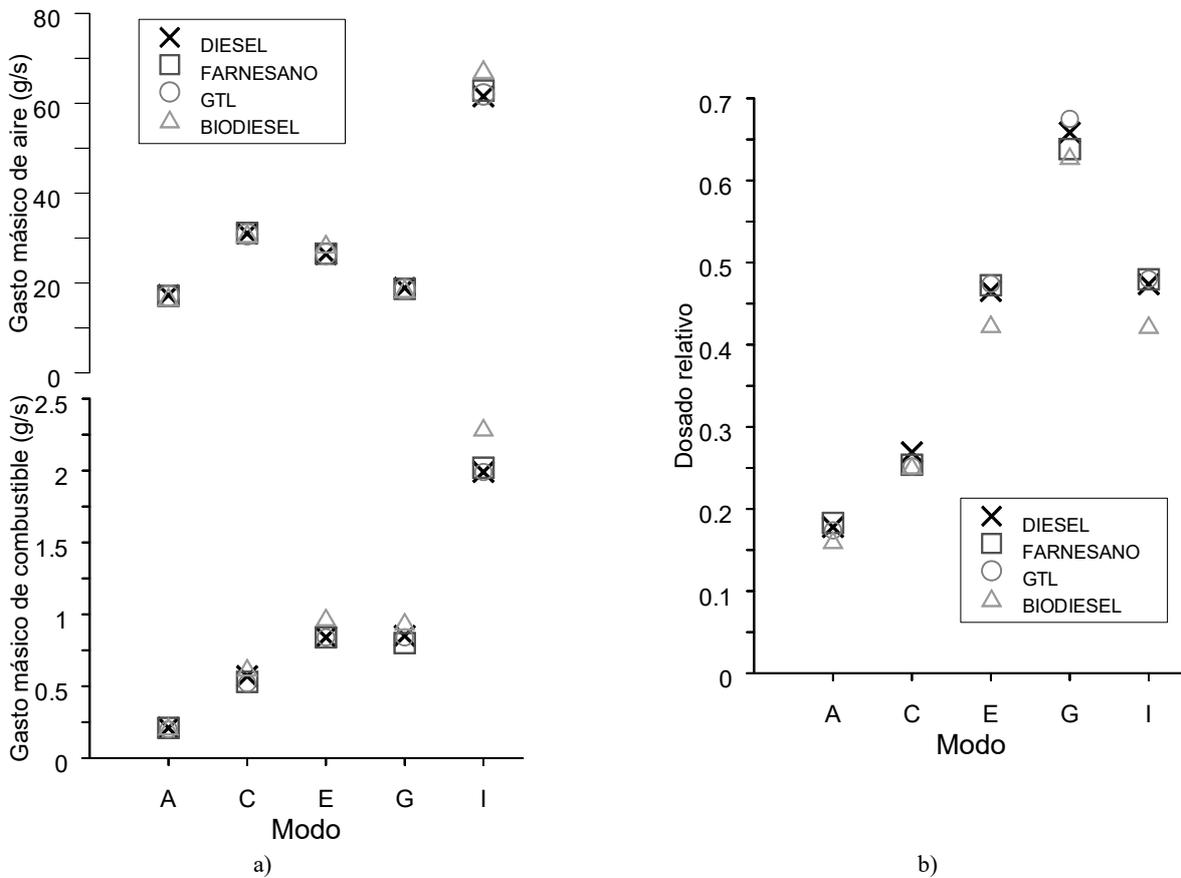


Figura 3. a) Gasto másico de combustible y de aire b) Dosado relativo

En la Figura 4 se muestran los resultados de presión máxima y temperatura media máxima (correspondiente a la media de las temperaturas máximas de la zona de productos quemados y de la zona de mezcla aire-combustible) de todos los combustibles en los cinco modos ensayados. Al aumentar el grado de carga, la presión máxima registrada en el proceso de combustión es mayor, lo cual se debe al mayor consumo de combustible, tal y como se muestra en el Figura 4a. A pesar de que la presión máxima alcanzada en los modos G e I es notablemente mayor que en los otros modos, esta diferencia no se observa en los resultados de temperatura (Figura 3b), puesto que en el modo E (media carga) se alcanzan temperaturas similares que en el modo I que tiene una mayor potencia asociada. Esta tendencia, coherente con la obtenida en los valores de dosado se debe, principalmente, a que en los modos G e I la válvula de EGR permanece cerrada y que, además, en el modo I el consumo de aire es notablemente mayor que en el resto de modos. Con respecto al efecto de los combustibles, no se observan diferencias significativas entre los dos combustibles parafínicos y el diésel, mientras que las temperaturas medias máximas alcanzadas con el Biodiesel

son siempre menores a las del resto de los combustibles, observándose una diferencia muy notable en el modo I. Una de las posibles justificaciones es que, en ese modo, el consumo de aire con Biodiesel también es mayor que con los otros combustibles. Por otro lado, hay autores que justifican la menor temperatura obtenida con el Biodiesel por su mayor entalpia de vaporización (34).

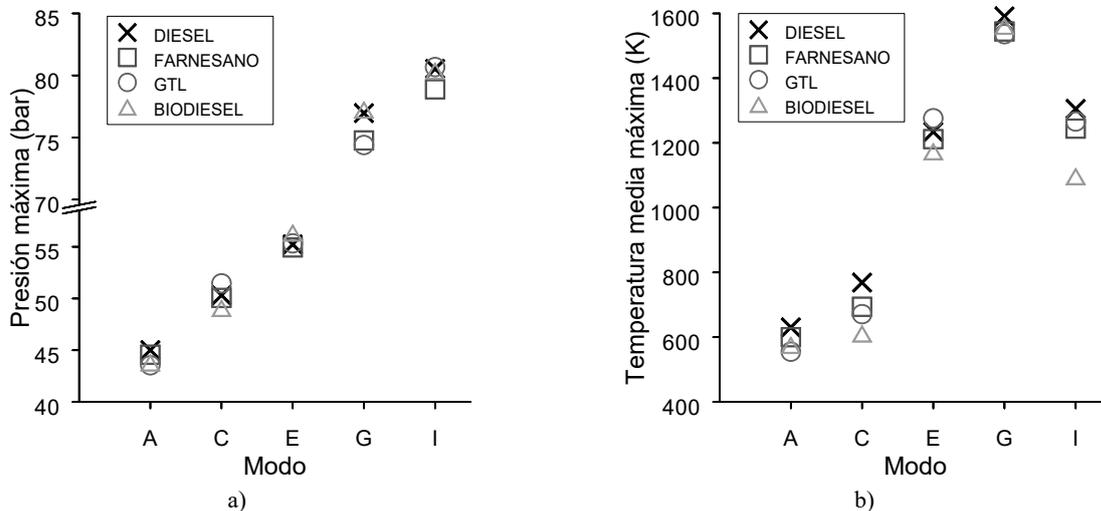


Figura 4. a) Presión máxima en el cilindro y b) Temperatura media máxima en el cilindro

Otros de los parámetros que caracterizan el proceso de combustión son: el retraso en la combustión (diferencia entre la inyección y el ángulo donde se alcanza el 5% del calor liberado) y la velocidad a la que se desarrolla dicho proceso, definiendo este parámetro como el intervalo entre el 90% del calor liberado y el inicio de la combustión. En la Figura 5a se muestran los ángulos donde se registra el 5% (inicio de la combustión), el 75% y el 90% del calor liberado (final de la combustión) para todos los combustibles en los cinco modos ensayados. Además, la Figura 5b corresponde a un zoom de los resultados de inicio de la combustión (5% calor liberado) para apreciar de forma más detallada el efecto de los combustibles. En esta figura se han añadido los valores de inyección, representados con mismos símbolos (que en la Figura 5a) para cada combustible pero de menor tamaño que los correspondientes a la localización del 5% del calor liberado.

En este zoom se observa cómo, en los modos A y C (menor carga, 10 Nm) el inicio de la combustión se produce después de tener lugar la inyección principal. Es decir, en estas condiciones de baja carga, no se alcanzan las condiciones térmicas necesarias en la cámara de combustión para producirse la combustión de la pre-inyección. En cambio, en los modos E, G e I, la liberación de calor comienza antes de que tenga lugar la inyección principal. En esta Figura 5b también se comprueba, de manera más detallada, como el combustible GTL es el primero en el que comienza la liberación de calor. Esta tendencia ha sido comentada en otros trabajos justificada, principalmente, por el alto número de cetano de este combustible (6,34-36). El comportamiento del Farnesano, a pesar de presentar una estructura parafínica como el GTL, es más parecido al del diésel y al del Biodiesel, debido a que su número de cetano es similar al de estos combustibles (56.7, dato obtenido del trabajo (31)). La diferencia en el número de cetano entre el GTL y el Farnesano se tiene dos posibles justificaciones: i) por un lado al mayor número de carbonos (mayor longitud de la molécula parafínica) del GTL, que implica un mayor número de cetano (37) y ii) a posibles aditivos mejoradores de cetano que se añaden a los combustibles utilizados en motores diésel.

Con respecto a la velocidad de combustión, definiéndola como la diferencia entre el inicio de la combustión y el 90% del calor liberado, se comprueba que el Biodiesel es el combustible que alcanza antes el 75% y el 90% del calor liberado, en todos los modos de funcionamiento, a pesar de que no es primero que empieza el proceso de combustión. Las diferencias medias en la velocidad de combustión están en torno al 6% con el Diesel, 11% con Farnesano y 18% con GTL. Esta mayor velocidad de combustión del Biodiesel ha sido comentada en distintos trabajos (38-39) y se justifica, principalmente, por la presencia de oxígeno en su composición (40). Algunos autores consideran que la presencia de oxígeno en el combustible reduce la duración de la combustión porque acorta la combustión en la fase difusiva (41). En el caso de los combustibles parafínicos, los resultados de la velocidad de

combustión dependen del grado de carga. En los modos de baja carga (A y C) la combustión es más lenta que con el diésel y el Biodiésel, tendencia en concordancia con la observada en bibliografía (22), mientras que en los modos de mayor carga (G e I) la tendencia se invierte al menos con el combustible de referencia, de acuerdo con los resultados del estudio de Soloiu et al. (21). Es destacable que, mientras que el ángulo donde se produce el 75% de liberación de calor con los cuatro combustibles es similar, es en el tramo entre el 75% y el 90% donde los combustibles parafínicos y el Biodiésel liberan calor de manera más rápida.

Al comparar ambos combustibles parafínicos, se observa que el proceso de combustión es más rápido en el caso del Farnesano, puesto que alcanza el 75% y el 90% del calor liberado antes que el GTL habiendo comenzado dicho proceso después que el combustible *Fischer-Tropsch*. La mayor duración del proceso de combustión con combustibles con elevado número de cetano, en este caso el GTL, se debe a una combustión difusiva más larga, lo que puede influir en la emisión de hollín puesto que, generalmente, los niveles bajos de hollín se asocian con una gran fase de combustión premezclada y una fase de difusión comparativamente menor (5).

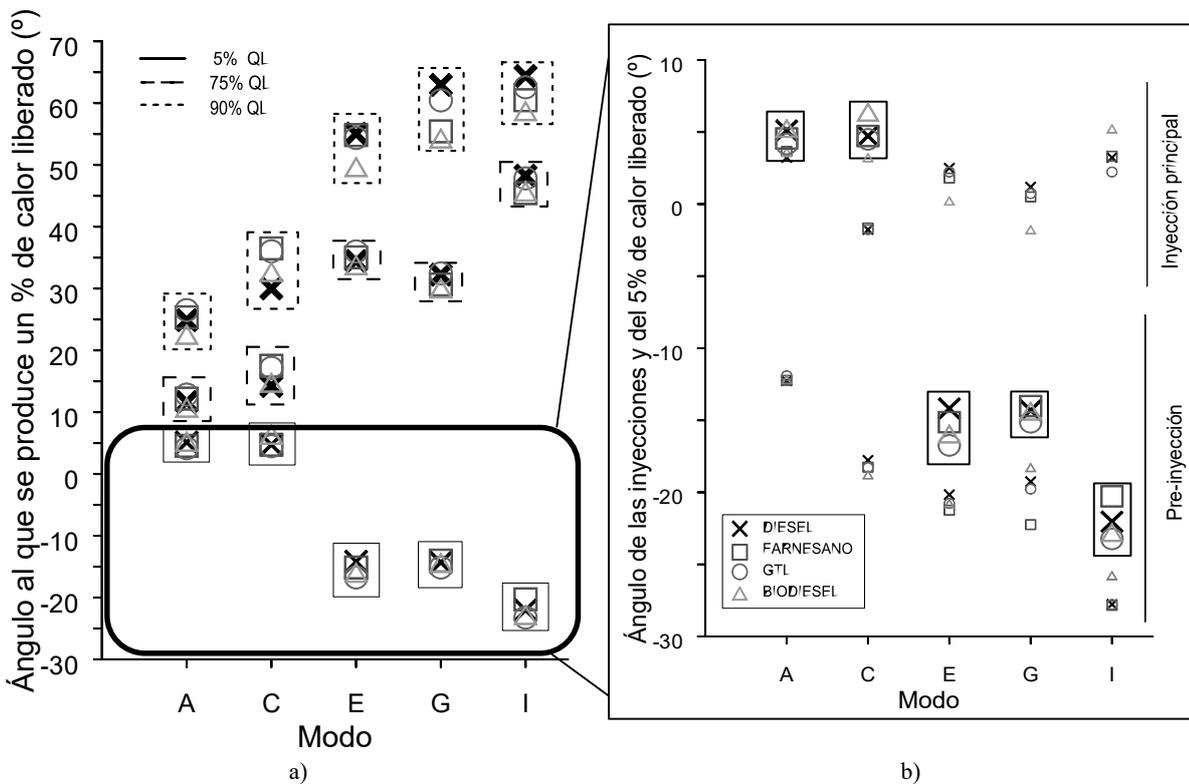


Figura 5. a) Ángulo al que se produce un % de calor liberado y b) Retraso del inicio de la combustión

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo se detallan a continuación:

- En los modos de baja carga, el proceso de combustión comienza después de la inyección principal puesto que con la pre-inyección no se consiguen las condiciones necesarias para la liberación de calor.
- La temperatura media máxima con biodiésel es menor que con el resto de combustibles, debido fundamentalmente al mayor consumo de aire registrado con este combustible, sobre todo en los modos de mayor carga.
- El retraso del inicio de la combustión es mucho menor con el combustible GTL en todos los modos de funcionamiento debido a su mayor número de cetano. El combustible Farnesano, a pesar de tener también estructura parafínica, presenta un retraso similar al de los otros combustibles, por lo que el número de cetano es factor que más influye en el retraso de la combustión.

- La velocidad de combustión con el biodiésel es mayor que con el resto de combustibles, en todos los modos, debido a la presencia de oxígeno en su composición. Las diferencias son del 6%, 11% y 18% con el Diesel, el Farnesano y el GTL, respectivamente. Los combustibles parafínicos presentan una combustión más lenta a baja carga con respecto al diésel, invirtiéndose la tendencia a alta carga. El Farnesano finaliza el proceso de combustión antes que el GTL a pesar de comenzar después, lo que puede tener influencia en la formación-oxidación de las partículas diésel.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer: i) la financiación recibida desde el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto POWER Ref. ENE2014-57043-R y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Feder) por la financiación de la plaza de Jose A. Soriano como técnico de apoyo a centros y grupos de investigación en el ámbito del Plan Propio de Investigación, ii) el apoyo tecnológico recibido desde la empresa Nissan *Europe Technology Centre, Spain*, y iii) el suministro de combustible por parte de las empresas REPSOL, AMYRIS y SASOL.

REFERENCIAS

1. Graboski MS, McCormick RL. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Prog. Energy Combust. Sci* 24: 125–164.
2. Rakopoulos CD, Giakoumis EG. Diesel Engine Transient Operation. Springer Science & Business Media, 2009.
3. Lapuerta M, Armas O, Rodríguez-Fernández J. 2008. Effect of Biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34: 198–223.
4. Schaberg P, Botha J, Schnell M, Hermann H-O, Pelz N, Maly R. 2005. Emissions performance of GTL diesel fuel and blends with optimized engine calibrations. SAE Brasil Fuels and Lubricants Meeting.114 (Section 4): 1074-1087.
5. Gill S, Tsolakis A, Dearn KD, Rodríguez-Fernández, J. 2011. REVIEW - Combustion characteristics and emissions of Fischer–Tropsch diesel fuels in IC engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 37.503–523.
6. Yehliu K, Boehman AL, Armas O. 2010. Emissions from different alternative diesel fuels operating with single and split fuel injection. *Fuel* 89: 423-437.
7. Abu-Jraia A, Rodríguez-Fernández J, Tsolakis A, Megaritis A, Theinnoia K, Cracknell RF et al. 2009. Performance, combustion and emissions of a diesel engine operated with reformed EGR. Comparison of diesel and GTL fueling. *Fuel* 88:1031-1041.
8. Millo F, Bensaid S, Fino D, Castillo- Marcano SJ, Vlachos T., Debnath BK. 2014. Influence on the performance and emissions of an automotive Euro 5 diesel engine fueled with F30 from Farnesane. *Fuel* 138: 134–142.
9. Soriano JA, García-Contreras R, Leiva-Candia D, Soto F. 2018. Influence on Performance and Emissions of an Automotive Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Paraffinic Fuels: GTL and Biojet Fuel Farnesane. *Energy Fuels.* 32: 5125–5133.
10. Gowdagiri S, Cesari XM, Huang M, Oehlschlaeger MA. 2014. A diesel engine study of conventional and alternative diesel and jet fuels: Ignition and emissions characteristics. *Fuel* 136: 253–260
11. Woschni G., 1965. Computer Programs to Determine the Relationship between Pressure Flow, Heat Release and Thermal Load in Diesel Engines. SAE Technical paper 650450.
12. Krieger RB, Borman G.L. 1966. The Computation of Apparent Heat Release for Internal Combustion Engines (ASME paper 66-WA/DGP-4).
13. Benajes J, Molina S, Novella R, Amorin, R. 2010. Study on low temperature combustion for light-duty diesel engines. *Energy Fuels* 24: 355364.

14. Tree DR, Svensson KI. 2007. Soot processes in compression ignition engines. *Prog. Energy Combust. Sci* 33: 272–309.
15. Armas O, Ballesteros R, Gómez A. 2008. The effect of diesel engine operating conditions on exhaust particle size distributions. *Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering*, 222(8): 1513-1525.
16. Liu H, Ma X, Li B, Chen L, Wang Z, Wang J. 2017. Combustion and emission characteristics of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel and PODE/biodiesel fuel blends. *Fuel* 209: 62-68.
17. Rajasekar E, Selvi S. 2014. Review of combustion characteristics of CI engines fueled with biodiesel. *Renew Sust Energ Rev.* 35: 390-399.
18. Armas O, Ballesteros R, Cardenas MD. 2012. Thermodynamic diagnosis of diesel and Biodiesel combustion processes during load-increase transient sequences. *Appl Energy* 97: 558-568.
19. Armas O, García-Contreras R, Ramos Á. 2016. On-line thermodynamic diagnosis of diesel combustion process with paraffinic fuels in a vehicle tested under NEDC. *J Clean Prod* 138: 94-102.
20. Oguma M, Goto S, Oyama K, Sugiyama K, Mori M. 2002. The Possibility of Gas to Liquid (GTL) as a Fuel of Direct Injection Diesel Engine. SAE Technical Paper 2002-01-1706.
21. Soloiu V, Gaubert R, Moncada J, Wiley J, Williams J, Harp S, et al. 2019. Reactivity controlled compression ignition and low temperature combustion of Fischer-Tropsch Fuel Blended with n-butanol. *Renew. Energy* 134: 1173-1189.
22. Nabi MN, Rasul MG. 2019. One-Dimensional Thermodynamic Model Development for Engine Performance, Combustion and Emissions Analysis Using Diesel and Two Paraffin Fuels. *Energy Procedia* 156: 259–26.
23. Armas O. Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia. 1999.
24. Lapuerta M., Ballesteros R, Agudelo JR. 2006. Effect of the gas state equation on the thermodynamic diagnostic of diesel combustion. *Appl. Therm. Eng.* 26: 1492-1499.
25. Payri F., Broatch A., Serrano JR, Rodríguez LF, Esmoris A. 2006. A study of the potential of intake air heating in automotive DI diesel engines. SAE Tech. Paper. 2006-01-1233.
26. Lapuerta M., Armas O, Hernández JJ. 1999. Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas. *Appl Therm Eng.* 19: 513-529.
27. Armas O, Martínez-Martínez S, Mata C, Pacheco C. 2016. Alternative method for bulk modulus estimation of Diesel fuels. *Fuel* 167: 199–207.
28. Pinzi S, Leiva D, Arzamendi G, Gandia LM, Dorado MP. 2011. Multiple response optimization of vegetable oils fatty acid composition to improve Biodiesel physical properties. *Bioresour Technol.* 102: 7280-7288.
29. Pinzi S, Rounce P, Herreros JM, Tsolakis A, Dorado MP. 2013. The effect of Biodiesel fatty acid composition on combustion and diesel engine exhaust emissions. *Fuel.* 104: 170–182.
30. Lapuerta M, García-Contreras R, Agudelo J. 2010. Lubricity of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel Blends. *Energy Fuels.* 24: 1374– 1379.
31. Groendyk M, Rothamer D. 2015. Effects of fuel physical properties on autoignition characteristics in a heavy duty compression ignition engine. *SAE Int.J Fuels Lubr.* 8 (1): 200–213.
32. Payri F, Desantes JM. *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Reverté. 2011.
33. Reijnders J, Boot M, de Goey P. 2016. Impact of aromaticity and cetane number on the soot-NOx trade-off in conventional and low temperature combustion. *Fuel* 186: 24–34.
34. Ghadikolaei MA, Wei L, Cheung CS, Yun K-F. 2009. Effects of engine load and biodiesel content on performance and regulated and unregulated emissions of a diesel engine using contour-plot map. *Sci Total Environ.* 658: 1117-1130.
35. Kitano K, Misawa S, Mori M, Sakata I, Clark RH. 2007. GTL fuel impact on DI diesel emissions. SAE Technical

paper 2007-01-2004.

36. Armas O, García-Contreras R, Ramos Á, López AF. 2015. Impact of Animal Fat Biodiesel, GTL, and HVO Fuels on Combustion, Performance, and Pollutant Emissions of a Light-Duty Diesel Vehicle Tested under the NEDC. *J Energ Eng* 141(2): C4014009.
37. Ghosh P. 2008. Predicting the Effect of Cetane Improvers on Diesel Fuels. *Energy Fuels*. 22: 1073–1079.
38. Wood BM, Kirwan K, Maggs S, Meredith J, Coles SR. 2015. Study of combustion performance of Biodiesel for potential application in motorsport. *J. Clean Prod.* 93:167-173.
39. Hosamani BR, Katti VV. 2018. Experimental analysis of combustion characteristics of CI DI VCR engine using mixture of two Biodiesel blend with diesel. *Eng Sci Technol Int J.* 21(4): 769-777.
40. Ren Y, Huang Z, Miao H, Di Y, Jiang D, Zheng K, Liu B, Wang X. 2008. Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel oxygenated blends. *Fuel* 87(12): 2691:2697.
41. Wei L, Cheung CS, Ning Z. 2018. Effects of Biodiesel-ethanol and Biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine. *Energy* 155: 957-970.

Efecto del empleo de un generador termoeléctrico sobre el trabajo de bombeo de un motor diésel

(Effect of the use of a thermoelectric generator on the pumping work of a diesel engine)

S. Ezzitouni ⁽¹⁾, P. Fernández-Yáñez ⁽¹⁾, L. Sánchez ⁽¹⁾, O. Armas ^{(1)*}

(1) Universidad de Castilla-La Mancha, Campus de Excelencia Internacional en Energía y Medioambiente, Escuela de Ingeniería Industrial de Toledo, Real Fábrica de Armas. Edif. Sabatini. Av. Carlos III, s/n, Toledo, 45071, España.

*Correspondencia. Tel.: +34 926 295462, E-mail: octavio.armas@uclm.es (O, Armas)

RESUMEN

Alrededor de la tercera parte de la energía suministrada por el combustible a un motor diésel (en vehículos ligeros) se desperdicia a través del sistema de escape. La creciente conciencia ambiental y la necesidad de ahorro de combustible han promovido la investigación sobre la recuperación de energía residual en los motores de combustión interna. Este trabajo se centra en la aplicación de la tecnología de generación termoeléctrica en motores de vehículos ligeros diésel como vía de recuperación energética. Por lo general, en la mayoría de los trabajos de investigación sobre esta tecnología, se ha abordado desde la perspectiva de la maximización de la energía recuperada, no siempre considerando el aumento en el trabajo de bombeo del motor o el uso de condiciones de operación representativas del movimiento real de un vehículo. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el efecto de introducir una modificación en la sección del conducto del sistema de escape, para el montaje de un generador termoeléctrico, sobre los parámetros indicados y de bombeo de un motor diésel en condiciones típicas de conducción urbana. A partir de los resultados obtenidos, se ha podido constatar que, dentro del rango de par efectivo y régimen de giro ensayado, la adaptación de la sección del conducto de escape para el montaje de un generador termoeléctrico no ha tenido un significativo efecto negativo sobre el rendimiento de bombeo del motor, lo que permite afirmar que existe un potencial margen de utilización de esta técnica de recuperación energética en vehículos ligeros.

Palabras clave: energía residual, diésel, generador termoeléctrico, bombeo.

ABSTRACT

Approximately a third part of the energy intake of a light-duty diesel engine is wasted through the exhaust system. Rising awareness of environmental issues together with fuel economy have encouraged research upon energy recovery in internal combustion engines. This work focuses on the application of thermoelectric generators in light duty diesel vehicles. Most studies available in literature tend to focus on maximizing the recovered electrical power, not always considering the increase in engine pumping work or testing conditions similar to those of a vehicle. The goal of this work is to evaluate the consequences of the modification of the cross-sectional area in the exhaust pipe that adding a thermoelectric generator implies. The effect on the indicated and pumping parameters of the engine under common urban driving conditions is presented. From the results, it can be drawn that within the limits of engine speed and torque tested, the modification of the cross-sectional area does not have a significant negative effect on the engine pumping efficiency. This means that there is potential for the employment of this technique in energy recovery from light-duty vehicles.

Key words: waste energy, diesel, thermoelectric generator, pumping.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor de la tercera parte de la energía suministrada por el combustible a un motor diésel (en vehículos ligeros) se desperdicia a través del sistema de escape (1). La creciente conciencia ambiental y la necesidad de ahorro de combustible han promovido la investigación sobre la recuperación de energía residual en los motores de combustión interna. Las principales tecnologías encargadas de recuperar la energía de los gases de escape son los motores de seis tiempos, turbocompresores, turbocompresores con accionamiento eléctrico, generadores termoeléctricos (TEG, del inglés Thermoelectric Generators) y los ciclos Rankine (principalmente con fluidos orgánicos) (2,3).

Los motores de seis tiempos (4,5) aprovechan el calor de los gases de escape dentro del cilindro. Los sistemas de sobrealimentación (6,7) ya están implementados en la mayoría de los vehículos diésel. Los sistemas de sobrealimentación con accionamiento eléctrico (3,8) (también conocidos como TERS, del inglés Thermal Energy Recovery Systems) consisten en unidades generadoras que hacen que la turbina del turbocompresor sea más lenta y recupere la energía no aprovechada por el compresor cuando la presión producida supera los requerimientos de sobrealimentación. Los TEG (9,10) y los ciclos de Rankine (11-13) pueden emplearse para convertir el calor de los sistemas de escape en energía eléctrica o mecánica, respectivamente.

Este trabajo se centra en la aplicación de la tecnología TEG en motores de vehículos ligeros diésel, a pesar de que, normalmente, la investigación se haya centrado en los motores de gasolina, ya que se pueden encontrar temperaturas de escape más altas (en comparación con los motores diésel) (14). Un generador termoelectrico es un dispositivo que, bajo el efecto Seebeck, produce energía eléctrica a partir de un gradiente de temperatura entre los extremos frío y caliente de un semiconductor (9). Las ventajas de los TEG son la falta de piezas móviles, su funcionamiento silencioso y su ausencia de mantenimiento. El principal desafío de la recuperación de energía utilizando TEG es la baja eficiencia térmica en los módulos actuales (15). Por lo tanto, la temperatura en el lado caliente del TEG debe ser alta para poder recuperar energía de manera significativa.

Para el empleo de un generador termoelectrico, la forma más sencilla de extraer calor de los gases de escape es utilizar las paredes del propio tubo de escape como foco caliente y la refrigeración por aire del otro lado del generador como foco frío (16). La alta resistencia térmica de los gases de escape hace que la temperatura externa del conducto de escape sea más baja que la deseada y la insuficiente disipación de calor externa conduce al calentamiento del lado frío (como resultado de la transferencia de calor por conducción a través del TEG). En consecuencia, es difícil alcanzar el gradiente de temperatura necesario para que el TEG produzca energía eléctrica útil. De ahí, la necesidad de incorporar un sistema de refrigeración que actúe como foco frío y de esta forma ampliar el gradiente de temperatura entre ambos lados del generador termoelectrico (17,18).

Los primeros estudios se centraron en maximizar la producción eléctrica a pesar de la contrapresión que puede originarse en el sistema de escape. LaGrandeur et al. (19) estimó una potencia de 600 W para un motor de gasolina de 190 kW. Simulaciones de Hussain et al. (20) mostraron una potencia de 300 W de un motor de 2,5 litros. Sin embargo, la contrapresión de escape (alrededor de 10 kPa) era demasiado alta para ser implementada en vehículos de pasajeros por el alto consumo de combustible que generaba, debido al aumento del trabajo de bombeo del motor. Diseños posteriores han sido más limitados en la producción eléctrica, buscando reducir los negativos efectos de la contrapresión de escape y su efecto sobre las pérdidas de bombeo del motor ensayado. Mori et al. (21), recuperaron 200 W de un sistema de escape con una caída de presión de aproximadamente 6 kPa.

El número de publicaciones sobre trabajos de investigación aplicando esta tecnología es aún reducido. La mayoría de los trabajos todavía se centra en el desarrollo de materiales termoelectricos. Por otro lado, en aquellos trabajos aplicados usando esta tecnología, el diseño del TEG siempre se ha enfocado hacia la maximización de la producción de energía eléctrica y no siempre considerando el efecto negativo del trabajo de bombeo generado por el uso de éste o ensayando en condiciones de operación poco representativas del trabajo habitual del motor.

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el efecto de introducir una modificación en la sección del conducto del sistema de escape, para el montaje de un TEG, sobre las prestaciones de un motor diésel, considerando como parámetros fundamentales de estudio el trabajo indicado y el trabajo de bombeo. Para lograr este objetivo, existen diferentes técnicas teóricas y experimentales que permiten estudiar los procesos termo-fluido-dinámicos que ocurren, en general, en el interior del motor, y en particular, en el interior del grupo cilindro-pistón. La utilización de medidas experimentales en la solución de modelos teóricos ha dado lugar al desarrollo de técnicas de carácter teórico-experimental. Entre éstas se pueden citar las conocidas como técnicas de diagnóstico termodinámico.

Desde el punto de vista termodinámico, el planteamiento de este tipo de modelos se basa, fundamentalmente, en la resolución del primer principio de la termodinámica para una sola zona, con el apoyo de la resolución de la ecuación de estado del gas (22,23). Para ello, se utiliza, entre otros parámetros de entrada, la presión en el interior del cilindro,

lo cual permite la determinación, entre otros resultados, del trabajo y el rendimiento indicados, del trabajo y el rendimiento de bombeo, así como la evolución de la tasa de calor liberado durante el proceso de combustión.

En este trabajo, se ha utilizado el diagnóstico termodinámico como herramienta para evaluar el efecto de diferentes modos de operación combinado con la modificación física de una sección del conducto de escape del motor ensayado para evaluar el efecto del montaje de un generador termoeléctrico sobre los parámetros indicados y de bombeo del motor.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Metodología

Para lograr el objetivo del trabajo, se planteó un estudio experimental que, por una parte, determinaría la caída de presión en las secciones original y modificada (Ver esquemas representados en la Fig. 1) del conducto de escape. En ambas figuras se presenta desde la entrada del gas al catalizador de oxidación diésel (DOC, del inglés Diesel Oxydation Catalyst) hasta la salida del gas después de la sección analizada. Los puntos p_1 y p_2 corresponden con los puntos de montaje de los sensores de presión para determinar la caída de presión en la sección estudiada. En la Fig. 1b se muestra, además, un detalle interno de la sección modificada. Los detalles del diseño de la sección modificada se presentaron en un trabajo previo (24).

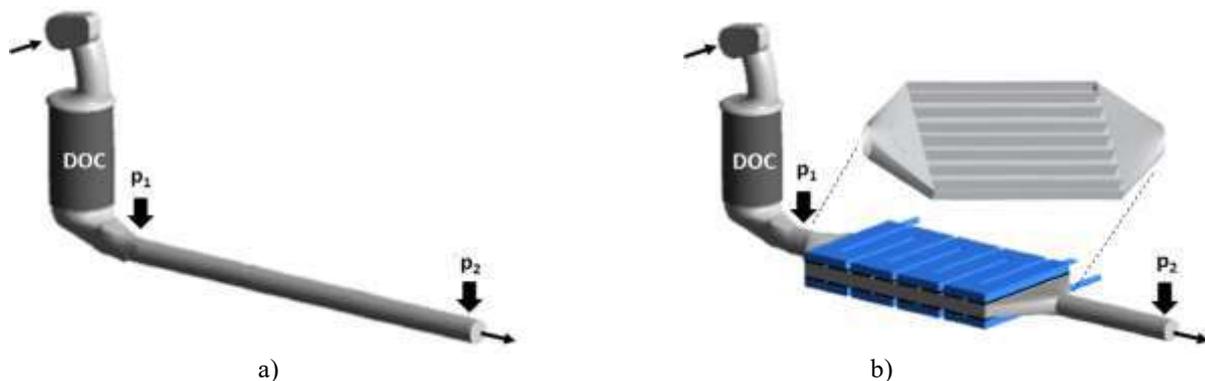


Figura 1. Secciones estudiadas del conducto de escape del motor. a) Sección original y b) Sección modificada.

Por otra parte, el estudio se complementó con la realización del diagnóstico termodinámico mediante el empleo de un modelo que resuelve el primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos (22,23), con el objetivo de determinar el efecto de ambas secciones sobre el trabajo indicado, el trabajo y el rendimiento de bombeo. Asimismo, se determinaron otros parámetros como el consumo específico efectivo de combustible.

El dato principal para la determinación de los parámetros indicados y de bombeo del motor es la presión en el interior del cilindro. En la Fig. 2 se muestra un esquema de diagrama p - V de un motor de cuatro tiempos, donde se destacan las áreas correspondientes al trabajo indicado (trabajo positivo) y de bombeo (trabajo normalmente negativo considerado como pérdida mecánica). A partir de los datos medidos de presión en el cilindro, p [Pa], y de los volúmenes del cilindro asociados (V [m³]) es posible determinar el trabajo indicado, W_i [J], según la ecuación 1 (donde: PMI = punto muerto inferior y PMS = punto muerto superior).

$$W_i = \int_{PMI_{ad}}^{PMI_{es}} p \, dV > 0 \quad (1)$$

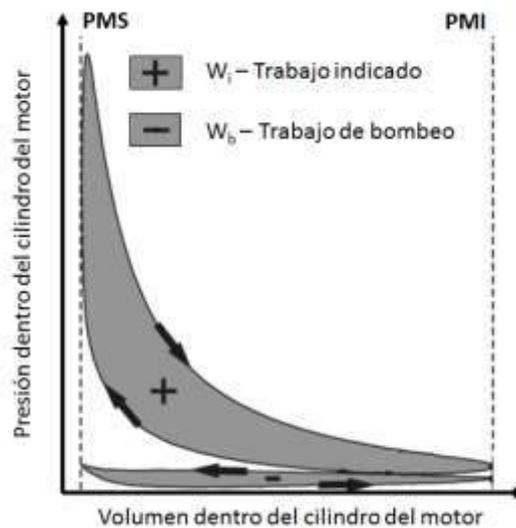


Figura 2. Esquema de diagrama indicador de un motor de cuatro tiempos. Adaptado de (25).

El trabajo de bombeo, W_b [J], se podrá determinar mediante la ecuación 2.

$$W_b = \int_{PMI_{es}}^{PMI_{ad}} p \, dV < 0 \quad (2)$$

El rendimiento de bombeo, η_b [%], se determinará mediante la ecuación 3.

$$\eta_b = \frac{W_i + W_b}{W_i} \cdot 100 \quad (3)$$

El trabajo indicado neto se podrá determinar mediante la ecuación 4.

$$W_{i_{neto}} = W_i + W_b \quad (4)$$

La caída de presión, Δp , en la sección del conducto de escape estudiada se determinará mediante la ecuación 5.

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (5)$$

El consumo específico de combustible, g_{ef} [g/kWh], se podrá determinar mediante la ecuación 6 (donde: \dot{m}_f = gasto másico de combustible [kg/s] y N_e = potencia efectiva del motor [W]).

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} \cdot 3,6 \cdot 10^9 \quad (6)$$

Para todos los ensayos se empleó un combustible diésel (sin biodiésel añadido) que cumplía la normativa EN590, con un poder calorífico inferior de PCI = 42,43 MJ/kg.

2.2. Instalación experimental

La Fig. 3 muestra una vista general de la instalación utilizada para la realización de este trabajo. Sobre ella aparece destacado el generador termoeléctrico montado en el sistema de escape. Como se aprecia en dicha figura, el generador está montado aguas abajo del DOC. Por otro lado, tal y como se puede apreciar, desde la salida del DOC

hasta la entrada del TEG, el conducto de escape ha sido cubierto con aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor a través de las paredes del conducto de escape.

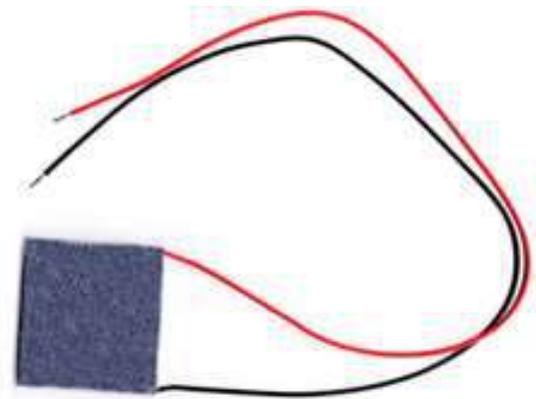


Figura 3. Vista lateral-frontend del banco de ensayos. En óvalo blanco aparece destacado el generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

Dicho generador, en su parte central y en toda su longitud, aloja la sección modificada del conducto de escape y que ha sido comparada con la sección original. La Fig. 4a muestra una vista ampliada del generador. En dicha figura se observa una parte del cambio de sección del conducto de escape a la entrada del generador, puntos de ubicación de sensores, los conductos de entrada y salida de refrigerante en el lateral exterior y los conductores eléctricos que conectan con cada uno de los elementos termoelectricos que lo componen. El generador está compuesto por 80 elementos termoelectricos comerciales de Teluro de Bismuto (Bi_2Te_3), similares al que aparece en la Fig. 4b.



a)



b)

Figura 4. Vista lateral y superior del generador termoelectrico montado sobre la sección modificada del conducto de escape.

En la Fig. 5 se muestra un esquema de la instalación experimental con los detalles de las herramientas necesarias para determinar los valores de los parámetros que permitiesen realizar el ensayo del motor, medir y registrar los datos de ensayo.

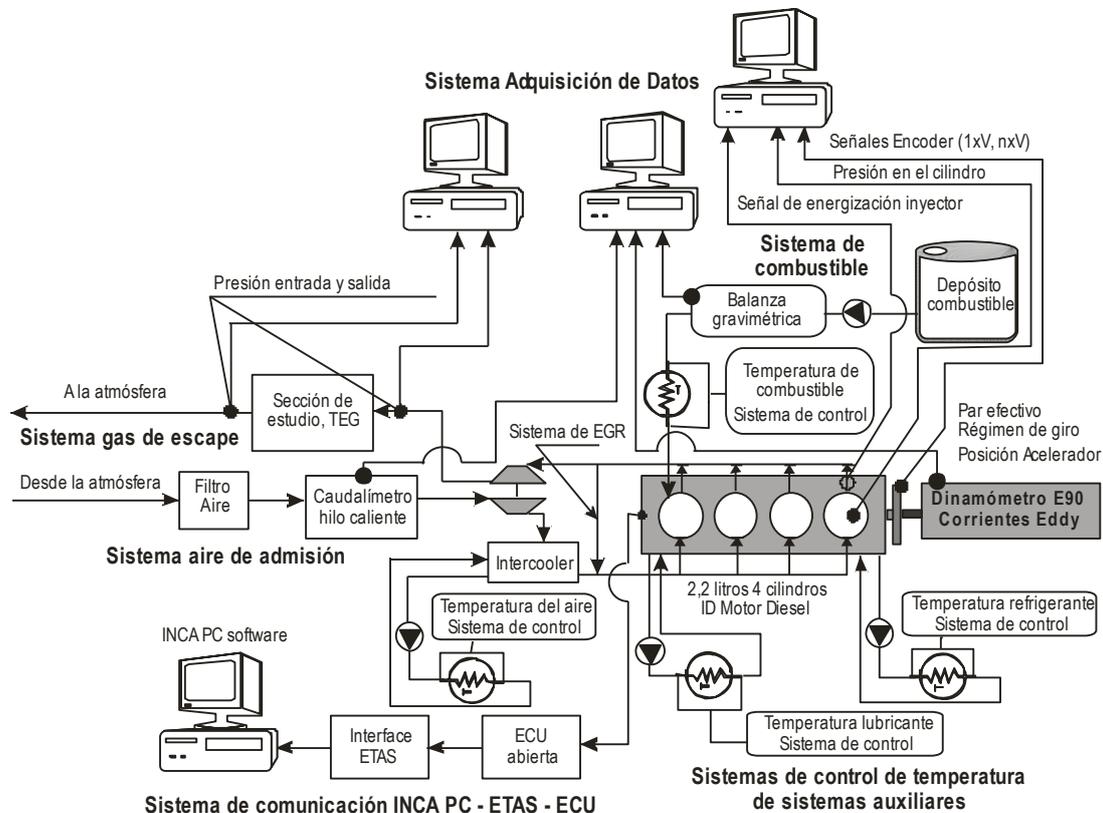


Figura 5. Esquema de la instalación experimental utilizada para los ensayos.

En la Tabla. 1 aparecen todos los parámetros medidos, necesarios para alcanzar el objetivo de este trabajo, el equipo empleado y la precisión del mismo. En la Tabla. 2 se detallan las características del motor utilizado en los ensayos.

Tabla 1. Parámetros medidos durante los ensayos sin y con la sección modificada del conducto de escape.

Parámetro	Sensor o Equipo de medida	Marca y modelo	Precisión
Gasto másico de aire	Caudalímetro de hilo caliente	Siemens 5WK9-628-PBT-GF30	$\pm 1,86$ [kg/h]
Gasto másico de combustible	Balanza	KERN PCB-10000	$\pm 0,1$ [g/h]
Presión de admisión	Sensor de presión	Turck Serie PT	$\pm 0,5$ [%]
Presión de escape	Sensor de presión	Turck Serie PT	$\pm 0,5$ [%]
Presión entrada sección de estudio	Sensor de presión	Turck Serie PT	$\pm 0,5$ [%]
Presión salida sección de estudio	Sensor de presión	Turck Serie PT	$\pm 0,5$ [%]
Presión en el cilindro	Sensor de presión en cámara	Kistler modelo 6055BB80	$\pm 0,24$ [%]
Par efectivo	Célula de carga	Hottinger Baldwin Messtechnik U2A	$\pm 0,1$ [Nm]
Régimen de giro	Tacómetro	Rheintach Messtechnik Gmbh modelo 5515	± 1 [min^{-1}]
Temperatura de aire de admisión	Termopar tipo K	TC Direct	$\pm 2,5$ [°C]
Temperatura de gases de escape	Termopar tipo K	TC Direct	$\pm 2,5$ [°C]
Temperatura del refrigerante	Termopar tipo K	TC Direct	$\pm 2,5$ [°C]

Tabla 2. Características del motor ensayado.

Código del motor	NISSAN YD22
Normativa de emisión	Euro 3
Sistema de inyección de combustible	<i>Common rail</i>
Presión de inyección	200 bar en ralentí (a 750 min ⁻¹) 1 600 bar a potencia máxima (a 4 000 min ⁻¹)
Número y posición relativa de las inyecciones	1 pre inyección antes del PMS 1 inyección principal después del PMS
Sistema de EGR	Externo, caliente, de alta presión
Máxima tasa de EGR (%)	< 25
Sistema de sobrealimentación	Turbocompresor con <i>waste gate</i> , con <i>intercooler</i>
Potencia máxima (kW)	82 kW (a 4 000 min ⁻¹)
Par máximo (Nm)	248 Nm (a 2 000 min ⁻¹)
Cilindros	4, en línea
Diámetro (mm)	86,5
Carrera (mm)	94
Volumen desplazado total (L)	2,2
Relación de compresión	16,7

2.3. Plan de ensayos

El presente trabajo comenzó a gestarse cuando la homologación de vehículos ligeros en Europa se realizaba mediante el ensayo en banco siguiendo el ciclo NEDC (del inglés New European Driving Cycle). Sin embargo, estaban a punto de entrar en vigencia los nuevos Procedimientos Mundialmente Armonizados para Pruebas de Vehículos Ligeros, WLTP (del inglés Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedures) (Ver Fig. 6 izquierda). Al mismo tiempo, en el laboratorio donde se realizaron los ensayos asociados a este trabajo (www.grupogpem.com), sólo se disponía de un banco para realizar ensayos estacionarios de motor con limitaciones de potencia de frenado. Ante estas circunstancias, con la ayuda de las ecuaciones de dinámica longitudinal del vehículo (26), se realizó la traducción discreta de la operación del vehículo que monta el motor ensayado (NISSAN Almera Tino), caracterizada por el perfil de velocidad del ciclo de homologación correspondiente y la posición de la caja de marchas en cada momento.

A partir de dichos cálculos, se obtuvo una secuencia de modos estacionarios, que se presentan sobre el mapa par efectivo-régimen de giro del motor (Fig. 6 derecha). En azul, aparecen los modos derivados de la traducción desde el ciclo NEDC y en rojo los derivados del ciclo WLTP.

Este resultado permitió definir la ubicación de los modos de operación estacionaria a ensayar, de tal forma que fuesen representativos de la mayor parte de mapa motor. La elección de estos modos es el resultado de un trabajo previo de diseño experimental (27).

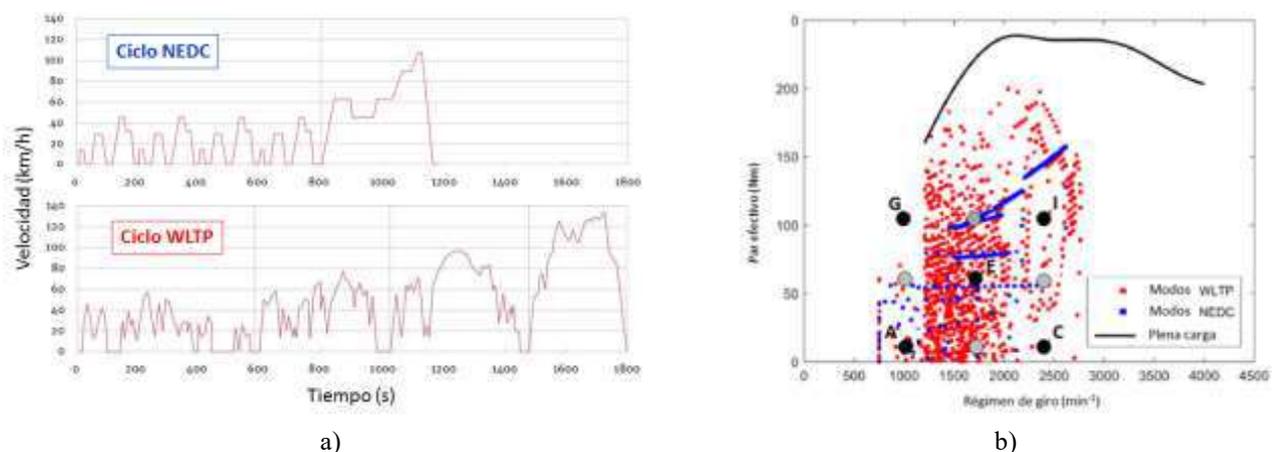


Figura 6. Ciclos de homologación NEDC y WLTP (a) y modos de operación estacionaria traducidos mediante las ecuaciones de dinámica longitudinal del vehículo (b).

En la Tabla. 3 se muestran los valores de par efectivo y régimen de giro de los modos ensayados para cumplir con el objetivo propuesto en este trabajo. Con el objetivo de facilitar la comprensión del código de letras asignadas a los modos de operación ensayados y que aparecen en la sección de resultados y discusión (Modos A, C, E, G, I), se debe explicar que el total de modos que aparece en la Tabla. 3 y su nomenclatura corresponden a planes de ensayo con objetivos diferentes a los de este trabajo (28,29). En resumen, los modos ensayados en este trabajo son aquellos que aparecen en negrillas en la Tabla 3, así como con puntos negros en la Fig. 6.

Tabla 3. Características del motor ensayado.

Me, Par efectivo (Nm)	n, Régimen de giro (min^{-1})		
	1 000	1 700	2 400
110	G	H	I
60	D	E	F
10	A	B	C

Tal y como se aprecia en la Fig. 6, los modos elegidos sobre el mapa par efectivo – régimen de giro del motor cubren el cuadrante inferior izquierdo de dicho mapa, cuadrante que corresponde, fundamentalmente, con el movimiento urbano del vehículo en el que se monta dicho motor. Este plan de ensayos permite ver el efecto del cambio de par a régimen de giro constante (bajo y medio), el cambio de régimen de giro a par efectivo constante (bajo y medio) y el efecto combinado del aumento del par efectivo y el régimen de giro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 7 muestra los valores de par efectivo y régimen de giro obtenidos en los ensayos sin y con generador termoeléctrico montado en el conducto de escape.

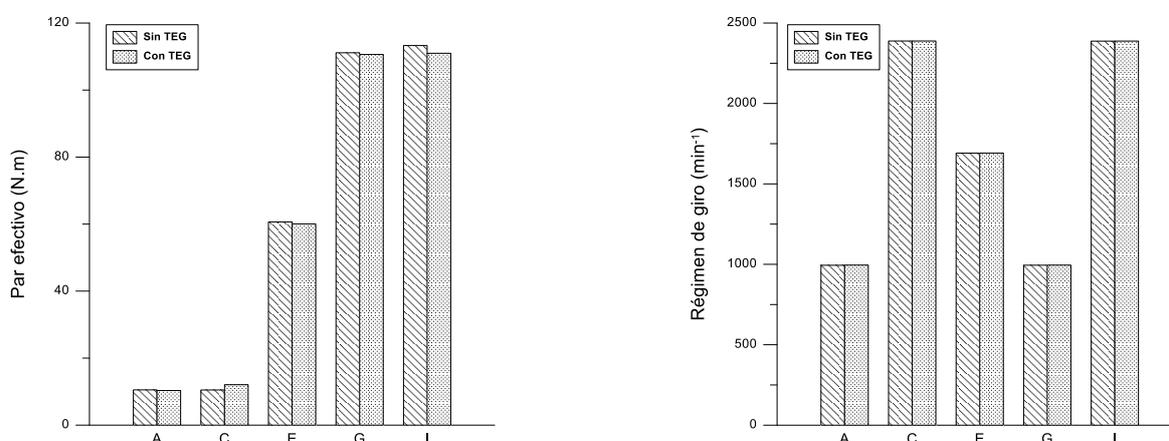


Figura 7. Valores de par efectivo y régimen de giro de los modos de operación ensayados sin y con generador termoeléctrico montado en el conducto de escape.

Los resultados muestran que, en cada modo de operación ensayado, el valor de la consigna de régimen de giro se consiguió con un error absoluto de $\pm 12,5 \text{ min}^{-1}$, lo que supone un error relativo máximo de $\pm 0,5 \%$. Al analizar el par efectivo se observa que los valores medidos se consiguieron con error absoluto máximo de $\pm 2 \text{ Nm}$, lo que supone un error relativo de $\pm 20 \%$ a bajo par y menor que $\pm 3 \%$ a medio y alto par ensayado.

Como se puede apreciar, en la mayor parte de los modos de operación, mientras que el régimen de giro fue prácticamente el mismo con y sin TEG, el par efectivo medido fue mayor cuando se trabajó sin TEG. Sin embargo, este resultado no es concluyente para decidir si la utilización del TEG es quien produce la ligera reducción del par efectivo medido.

Para poder hacer un análisis más exhaustivo, será necesario presentar algunos resultados derivados del diagnóstico termodinámico. Como se podrá observar, la Fig. 8 muestra los valores de trabajo indicado y de trabajo de bombeo de cada modo de operación sin y con TEG.

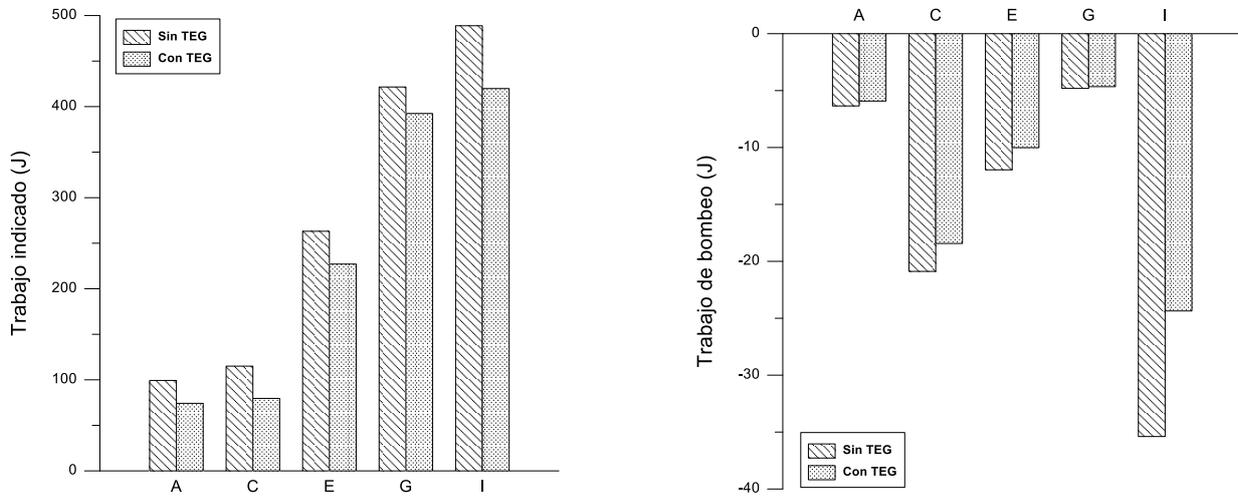


Figura 8. Valores de par efectivo y régimen de giro de los modos de operación ensayados sin y con generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

Los resultados sugieren que el ligero aumento de par efectivo visto en la Fig. 8 se debe, fundamentalmente, a un mayor trabajo indicado realizado por el motor. Obsérvese que en esos mismos modos de operación también se obtuvo un mayor valor absoluto de trabajo de bombeo. Por tanto, el mayor trabajo, tanto indicado como absoluto de bombeo sin TEG se debe al manejo de un mayor gasto másico de gases de escape o lo que es lo mismo: la suma de los gastos másicos de aire (o aire + EGR) admitido y de combustible, tal y como se muestra en la Fig. 9. Cabe recordar que a mismo régimen de giro un mayor gasto másico de gases implica un mayor trabajo de bombeo.

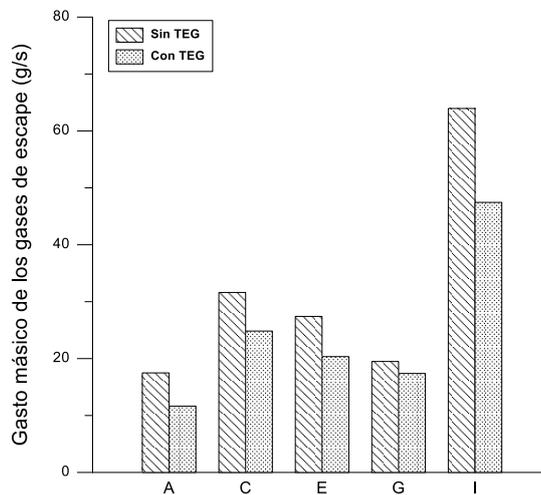


Figura 9. Valores de gasto másico de gases de escape de los modos de operación ensayados sin y con generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

A partir de estos resultados, resulta imprescindible comparar entonces los valores de trabajo indicado neto y de rendimiento de bombeo (Ver Fig. 10) obtenidos en cada modo de operación sin y con el empleo del TEG.

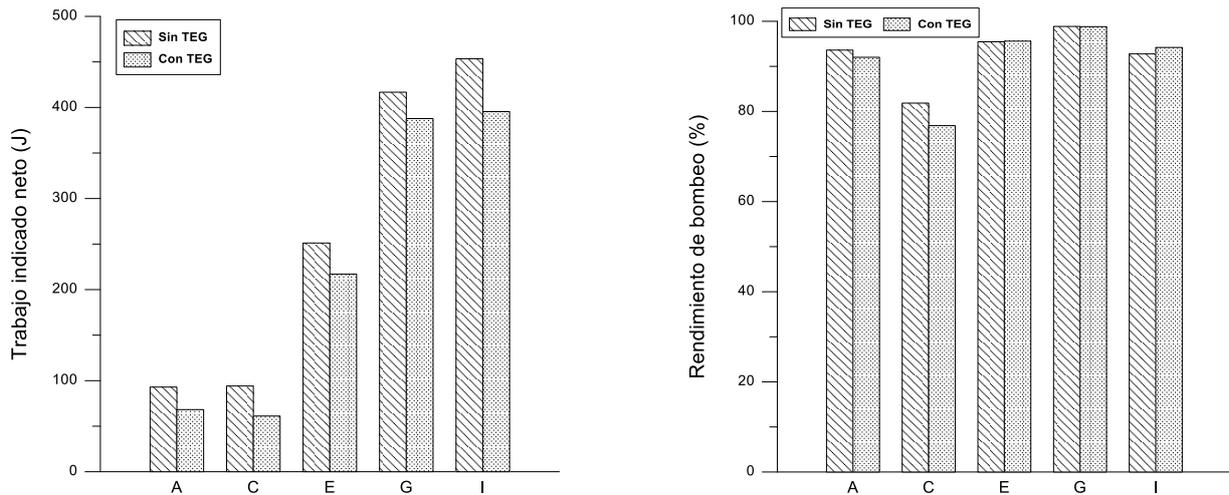


Figura 10. Valores de gasto másico de gases de escape de los modos de operación ensayados sin y con generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

Por un lado, los resultados de trabajo indicado neto mostrados en la Fig. 10 corroboran el porqué del mayor valor de par efectivo obtenido en los distintos modos de operación sin TEG. Por otro lado, los resultados de rendimiento de bombeo sugieren que, excepto en el modo I (el modo de mayor régimen y carga ensayados), la resistencia al paso del gas que produce la sección diseñada y evaluada en este trabajo, comparada con la que produce la sección original del conducto de escape, está dentro del rango de resistencia que soporta el motor sin que se vea notablemente afectado el rendimiento de bombeo del motor.

Las diferencias de Δp entre la salida del catalizador y la salida de las secciones comparadas (original y diseñada para el empleo del TEG) se muestran en la Fig. 11.

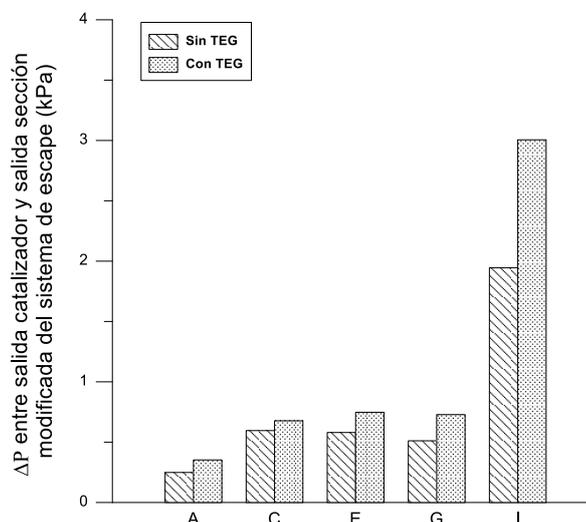


Figura 11. Valores de Δp en la sección comparada del conducto de escape en los modos de operación ensayados sin y con generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

Tal y como muestra la Fig. 11, las diferencias entre los Δp medidos en las secciones estudiadas no superan los 0,3 – 0,4 kPa, excepto en el modo I (máximos régimen y carga ensayados) donde se alcanza 1 kPa, valores alejados de los límites restrictivos que algunos fabricantes se establecen para los filtros de partículas diésel, 4 kPa para el filtro limpio y 8 kPa para el filtro colmatado de hollín antes de regenerar (30,31).

Finalmente, resulta interesante presentar la comparación del consumo específico efectivo tal y como muestra la Fig. 12.

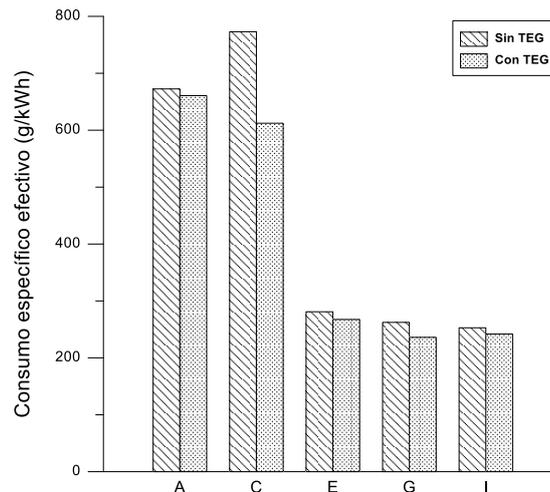


Figura 12. Valores de Δp en la sección comparada del conducto de escape en los modos de operación ensayados sin y con generador termoelectrico montado en el conducto de escape.

Los resultados muestran claramente que, con el empleo del TEG, el consumo específico efectivo, aun cuando no se ha tenido en cuenta la producción eléctrica del generador, es ligeramente mejor en la zona del mapa motor ensayada.

4. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- i) Los valores de par efectivo y régimen de giro de los modos de operación ensayados fueron lo suficientemente similares entre las dos configuraciones (sin y con TEG) como para poder determinar el efecto de un cambio en la sección del sistema de escape por el montaje de un TEG sobre las prestaciones del motor.
- ii) Dentro del rango de par y régimen de giro ensayados, la adaptación de la sección del conducto de escape para el montaje de un generador termoelectrico no ha tenido un significativo efecto negativo sobre el rendimiento de bombeo del motor. Sólo en el caso del modo C (el de menor carga con más alto régimen de giro) el rendimiento de bombeo del motor registró una caída de aproximadamente 9,5 %.
- iii) Dentro del área del mapa par-régimen de giro, cubierta por los modos ensayados, la diferencia de Δp introducida por el cambio de sección no supera 1 kPa, alejados de los 4 kPa y 8 kPa que se imponen como restricción a un filtro de partículas diésel limpio y colmatado de hollín respectivamente. Estos valores nos indican el margen de utilización del TEG combinado con los sistemas de postratamiento de gases de escape (catalizadores y filtro de partículas).
- iv) A juzgar por los resultados obtenidos, es posible afirmar que existe potencial para la utilización de esta técnica de recuperación energética en vehículos ligeros en condiciones de baja carga del motor, debido a que el balance entre la posible baja producción de energía eléctrica del TEG (por baja temperatura de los gases de escape) y el trabajo de bombeo adicional producido por el motor no supondrá un gasto adicional significativo de combustible.

Trabajos futuros

- i) Extender el trabajo de determinación del efecto del montaje del TEG sobre las prestaciones del motor a modos de operación que caractericen el resto del mapa par efectivo-régimen de giro.

- ii) Hacer el estudio incluyendo la medida de la potencia eléctrica producida por el TEG de tal modo que posibilite hacer un balance energético completo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer: i) la financiación recibida desde el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto POWER Ref. ENE2014-57043-R, ii) el apoyo tecnológico recibido desde la empresa Nissan Europe Technology Centre, Spain, iii) la subvención del combustible empleado en los ensayos por la empresa REPSOL y iv) la financiación de los contratos post y pre-doctorales de Pablo Fernández-Yañez Luján y de Samir Ezzitouni Zerhouni respectivamente por la Universidad de Castilla-La Mancha.

REFERENCIAS

1. Hossain SN, Bari S. 2014. Waste heat recovery from exhaust of a diesel generator set using organic fluids. *Procedia Eng.* 90: 439-444.
2. Hatami M, Ganji DD, Gorji-Bandpy M. 2014. A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 37: 168-181.
3. Gabriel-Buenaventura A, Azzopardi B. 2015. Energy recovery systems for retrofitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 41: 955-964.
4. Hayasaki T, Okamoto Y, Amagai K, Arai M. A six-stroke DI diesel engine under dual fuel operation. En: SAE International. *International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*; 1999; Dearborn, MI, USA. SAE Technical Paper: 1999-01-1500.
5. Conklin JC, Szybist JP. 2010. A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery. *Energy.* 35: 1658-1664.
6. Bontempo R, Cardone M, Manna M, Vorraro G. 2015. Steady and unsteady experimental analysis of a turbocharger for automotive applications. *Energ. Convers. Manage.* 99: 72-80.
7. Ravaglioli V, Cavina N, Cerofolini A, Corti E, Moro D, Ponti F. 2015. Automotive turbochargers power estimation based on speed fluctuation analysis. *Energy Procedia.* 82: 103-110.
8. Arsie I, Cricchio A, Pianese C, Ricciardi V, De Cesare M. 2015. Modeling analysis of waste heat recovery via thermo-electric generator and electric turbo-compound for CO2 reduction in automotive SI engines. *Energy Procedia.* 82: 81-88.
9. Saidur R, Rezaei M, Muzammil WK, Hassan MH, Paria S, Hasanuzzaman M. 2012. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16: 5649-5659.
10. Zhang X, Chau KT, Chan CC. 2009. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles.* 6: 1119-1124.
11. Sprouse C, Depcik C. 2013. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 51: 711-722.
12. Shu G, Yu G, Tian H, Wei H, Liang X, Huang Z. 2016. Multi-approach evaluations of a cascade-Organic Rankine Cycle (C-ORC) system driven by diesel engine waste heat: Part A – Thermodynamic evaluations. *Energ. Convers. Manage.* 108: 579-595.
13. Dolz V, Novella R, García A, Sánchez J. 2012. HD Diesel engine equipped with a bottoming Rankine cycle as a waste heat recovery system. Part 1: Study and analysis of the waste heat energy. *Appl. Therm. Eng.* 36: 269-278.
14. Zheng XF, Liu CX, Yan YY, Wang Q. 2014. A review of thermoelectrics research - Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 32: 486-503.
15. Karvonen M, Kapoor R, Uusitalo A, Ojanen V. 2016. Technology competition in the internal combustion engine waste heat recovery: A patent landscape analysis. *J. Clean. Prod.* 112: 3735-3743.
16. Sandu V, Stanca A, Pasaroiu A, Dobre D. Experimental investigation of thermoelectric heat recovery from a diesel engine. *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*; 2012 Oct 25-27. 1-8.

17. Bo L, Yan Y, Twaha S, Zhu J, Huang K, Li Y. 2017. Heat transfer enhancement of a modularised thermoelectric power generator for passenger vehicles. *Appl. Energ.* 205: 868-879.
18. Fernández- Yáñez P, Gómez A, García-Contreras R, Armas O. 2018. Evaluating thermoelectric modules in diesel exhaust systems: potential under urban and extra-urban driving conditions. *J. Clean. Prod.* 182: 1070-1079.
19. LaGrandeur J, Crane D, Hung S, Mazar B, Eder A. Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. En: *IEEE. 25th International Conference on Thermoelectrics; 2006 Ag 6-10; Vienna, Austria.* IEEE. 343-348.
20. Hussain Q, Brigham D, Maranville C. 2009. Thermoelectric Exhaust Heat Recovery for Hybrid Vehicles. *SAE Int. J. Engines.* 2(1): 1132-1142.
21. Mori M, Yamagami T, Sorazawa M, Miyabe T, Takahashi S, Haraguchi T. 2011. Simulation of Fuel Economy Effectiveness of Exhaust Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator in a Series Hybrid. *SAE Int. J. Manuf. Mater.* 4: 1268-1276.
22. Lapuerta M, Armas O, Hernández JJ. 1999. Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas. *Appl. Therm. Eng.* 19: 513-529.
23. Payri F, Molina S, Martin J, Armas O. 2006. Influence of measurement errors and estimated parameters on combustion diagnosis. *Appl. Therm. Eng.* 26: 226-236.
24. Fernández-Yáñez P, Armas O, Capetillo A, Martínez-Martínez S. 2018. Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. *Appl. Energy.* 226: 690-702.
25. Payri, F., Desantes, J.M. editores. *Motores de Combustión Interna Alternativos.* 1ª ed. Valencia: Reverté y UPV; 2011.
26. Pacejka HB. *Tire and Vehicle Dynamics.* Vol. 3a ed. Amsterdam: Elsevier Ltd; 2012.
27. Torres- Jiménez E, Armas O, Lešnik L, Cruz-Peragón F. 2018. Methodology to simulate normalized testing cycles for engines and vehicles via design of experiments with low number of runs. *Energy Convers. Manage.* 177: 817-832.
28. Soriano JA, Mata C, Armas O, Ávila C. 2018. A zero-dimensional model to simulate injection rate from first generation common rail diesel injectors under thermodynamic diagnosis. *Energy.* 158: 845-858.
29. Fernández- Yáñez P, Armas O, Gómez A, Gil A. 2017. Developing Computational Fluid Dynamics (CFD) Models to Evaluate Available Energy in Exhaust Systems of Diesel Light-Duty Vehicles. *Appl. Sci.* 7: 590.
30. Lapuerta M, Rodríguez-Fernández J, Oliva F. 2012. Effect of soot accumulation in a diesel particle filter on the combustion process and gaseous emissions. *Energy.* 47: 543-552.
31. Rodríguez-Fernández J, Lapuerta M, Sánchez-Valdepeñas J. 2017. Regeneration of diesel particulate filters: Effect of renewable fuels. *Renewable Energy.* 104: 30-39.

Análisis de emisión de gases contaminantes en motores de combustión interna con encendido provocado a diferentes altitudes.

(Analysis of emission of pollutant gases in internal combustion engines with spark-ignition at different altitudes)

E. Arroyo Terán^{(1)*}, A. Cevallos González⁽¹⁾, J. Melo Obando⁽¹⁾

(1) Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica del Norte, CP:100105.

* Correspondencia: 0996596737, esarroyo@utn.edu.ec (E. Arroyo Terán)

RESUMEN

Los gases emanados por los motores de combustión interna generan efectos dañinos al medio ambiente y a la salud de las personas. El presente proyecto analiza el efecto de la altitud en la emisión de gases contaminantes en motores de encendido provocado (MEP). La combustión dentro del motor se ve afectada por la reducción de presión atmosférica, principalmente ocasionado por la disminución del porcentaje de oxígeno conforme se incrementa la altura. Se realizó la medición de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos no combustionados (HC) mediante la sonda de medición del analizador de gases Brain Bee AGS-688, la cual se inserta en el ducto de escape del vehículo equipado con un motor de 1,4 L. La investigación se realizó en tres ciudades del Ecuador a diferente altura sobre el nivel del mar (0m, 2 200m, 3 000m), en tres horarios del día y a cuatro velocidades de giro de motor. Los datos analizados muestran que conforme la altitud aumenta las emisiones de CO presentan una tendencia a incrementar, mientras que el CO₂ y HC a disminuir.

Palabras clave: altitud, emisiones, gases de escape, motor de encendido provocado.

ABSTRACT

Gases emitted by internal combustion engines generate harmful effects to the environment and to the health of people. This project analyzes the effect of altitude in the emission of polluting gases in spark-ignition engine (SIE). The combustion inside the engine is affected by the reduction of atmospheric pressure, mainly produced by the decrease of the percentage of oxygen as the height increases. The measurement of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂) and non-combustion hydrocarbons (HC) was performed with a measurement probe of the Brain Bee AGS-688 gas analyzer which is putted into de exhaust pipe of a vehicle with 1,4 L engine. The investigation was realized in three cities of Ecuador at different height above sea level (0m, 2 200m, 3 000m), in three hours of the day and four speeds of engine rotation. The data analyzed show that as altitude increases CO emissions increase, while CO₂ and HC decrease.

Key words: altitude, emissions, exhaust gases, spark ignition engine.

1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz, ha redoblado esfuerzos enfocados a la reducción de gases contaminantes en los vehículos modernos. Las percepciones ambientalistas han influenciado en las últimas décadas el pensamiento de las grandes industrias para considerar el impacto al medio ambiente que generan los motores actuales. (1-3)

Un motor de combustión interna (MCI) de ciclo Otto, es una máquina térmica capaz de transformar energía química en energía mecánica, sin embargo, el proceso de generación de trabajo mecánico genera una cantidad considerable de gases nocivos para el medio ambiente y la salud humana. (3, 4). Entre los principales gases que produce el MCI se encuentran: Hidrocarburos no combustionados (HC), monóxidos de carbono (CO) y dióxidos de carbono (CO₂). (3, 4). Existen varios factores influyentes en la generación de estos agentes contaminantes, no obstante, los que mayor incidencia tienen son: Combustible de la máquina térmica, técnicas de conducción, tecnología del vehículo, parámetros ambientales y condiciones climáticas, que afectan directamente el desempeño del motor.

Bajo esta primicia, un factor importante considerable en el proceso de combustión es la altura a la que opera la máquina. La acción a diferentes metros sobre el nivel del mar obliga al motor a trabajar con distintas condiciones de presión atmosférica, temperatura de aire entrante y humedad. (5,6). Así mismo, la variación de la altitud modifica la densidad del aire y en consecuencia la relación estequiométrica de la carga del MCI que se ve reflejado en las emisiones de gases contaminantes. (7-9)

Un estudio realizado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador enfatiza la importancia del octanaje del combustible y la altura a la que trabaja el motor en la producción de gases contaminantes, específicamente en las emisiones de CO y HC; mientras que el régimen de giro influye directamente en los índices de CO₂. (10) Además, en otros estudios, se presenta que la relación estequiométrica juega un papel importante en la emisión de CO, la cual incrementa mientras más rica es la mezcla. (11)

Por ello, las emisiones de vehículos impulsados por motor de encendido provocado deben ser especialmente consideradas cuando operan a mayor altitud debido a las altas incidencia de gases nocivos generados a esas condiciones de operación. (5,6).

Es importante considerar que en vehículos con motores diésel, las emisiones de HC y CO son despreciables, (12) sin embargo, las emisiones de NO_x tienen mayor incidencia en este tipo de automotores. Por otro lado, en vehículos con motor a gasolina, el principal producto nocivo de la combustión es el CO₂, mientras que los NO_x son bastante reducidos. (13)

Un punto a consideración es que las industrias automotrices, realizar las calibraciones, mediciones y puesta a punto de motores nuevos a condiciones ideales de temperatura y presión atmosférica, que influyen en los resultados presentados por el fabricante. (14). En Ecuador, existe una amplia diversidad de ecosistemas y ciudades con diferentes alturas que permiten realizar un estudio más real del efecto de la altitud en vehículos con motores de combustión interna con encendido provocado.

Por este motivo, el proyecto se realiza en tres ciudades del Ecuador a 0m, 2 200 m y 3 000 m sobre el nivel del mar, probando el vehículo a diferentes rangos de operación del motor, con la finalidad de emitir un criterio real de la producción de gases contaminantes bajo efecto de varias condiciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la investigación, se obtienen datos de las mediciones de gases contaminantes en un vehículo bajos estas condiciones de trabajo:

Gasolina: Extra de 87 octanos

Régimen de motor: Cuatro regímenes de giro del motor (ralentí, 2 000, 3 500 y 4 500 rpm).

Condiciones topográficas: 0m, 2 200 m, 3 000 m (sobre el nivel del mar).

Horarios de operación del vehículo: Tres horarios diferentes del día (8:00, 13:00 y 18:00 horas).

Para cada localidad, horario y revoluciones de giro del motor, se efectúan tres mediciones de gases y toma de datos.

2.1. Equipos utilizados

Se utilizó un vehículo marca Kia modelo Rio, fabricado en el año 2 017, con un motor de cuatro cilindros en línea ciclo Otto. Las características del motor se describen en la Tabla.1.

Tabla 1. Características del motor.

Parámetro	Valor / Referencia
Modelo:	Kia Rio
Tipo:	16 válvulas, DOHC, CVVT
Cilindrada:	1,4 L
Diámetro x Carrera:	75,5mm x 78,1 mm
Potencia:	98 hp a 6 000 rpm
Torque:	13,5 Kg-m a 4 000 rpm
Relación de compresión:	10:1

El incremento de emisiones de los vehículos ocasionado por el deterioro normal es perceptible a partir de los 50 000 Km de uso, por este motivo se ha escogido un vehículo con 26 000 Km de recorrido, que permita obtener datos más reales del verdadero efecto de las condiciones ambientales en la generación de gases nocivos. (15)

Para la medición de emisiones se utilizó un analizador de gases marca Brain Bee serie AGS-688, el cual realiza una compensación automática de presión entre 850 -1 060 mBar. De igual manera, el equipo se auto calibra mediante el uso de una bombona de gas modelo. Posee una sonda de medición que se inserta en el ducto de escape del vehículo mediante la cual es capaz de medir los porcentajes en volumen de dióxido de carbono CO₂, monóxido de carbono CO, oxígeno O₂; además de las partes por millón de Hidrocarburos no combustionados HC y el factor lambda λ en el motor.

La adquisición de datos de revoluciones realizó con el equipo RPM Counter Brain Bee MGT-300, que admite conexión con el analizador de gases.

2.2. Protocolo de pruebas

Antes de realizar cada prueba, el motor debe estar a temperatura normal de funcionamiento (90°C) y la transmisión en posición neutral. Es importante señalar, que previo al desarrollo de las pruebas, se realizó el mantenimiento preventivo del motor para asegurar resultados fehacientes evitando la influencia del deterioro normal de los componentes del vehículo debido al uso cotidiano del mismo.

El mantenimiento preventivo incluyó: Reemplazo de filtro de aire y combustible, cambio de bujías, cambio de aceite de motor.

Se realizaron tres mediciones para cada nivel de altura sobre el nivel del mar, horarios del día y revoluciones del motor, dando lugar a un total de 108 mediciones.

El protocolo de pruebas de los ensayos es:

- Verificar el buen estado del sistema de escape del vehículo.
- Colocar la transmisión en posición neutral.
- Esperar que el motor del vehículo llegue a condiciones óptimas de funcionamiento.
- Verificar que no existan cargas adicionales en el funcionamiento del motor.
- Colocar el medidor de revoluciones de motor.
- Esperar que los equipos de medición realicen el proceso de calentamiento y estabilización.
- Verificar el correcto estado y limpieza de la sonda e introducirla en el tubo de escape.
- Llevar las revoluciones del motor según se requiere (ralentí, 2 000, 3 500 y 4 500 rpm), esperar 30 segundos para la estabilización de este y se procede a tomar los datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez concluidas todas las pruebas se procesan los resultados alcanzados en cada condición de altura, horario de prueba y régimen de giro del motor.

El equipo Brain Bee AGS-688, tiene una capacidad de medición de gases bajo los siguientes parámetros:

- Medición de CO de 0 a 9,99 (%vol) con una incertidumbre de 0,01 (%vol).
- Medición de CO₂ de 0 a 19,99 (%vol) con una incertidumbre de 0,1 (%vol).
- Medición de HC de 0 a 9 999 (ppm) con una incertidumbre de 1 (ppm).
- Medición de O₂ de 0 a 25 (%vol) con una incertidumbre de 0,01 (%vol).
- Medición de Lambda de 0,5 a 5 con una incertidumbre de 0,001.

En la Tabla.2 se muestran los resultados promedio de las mediciones a diferentes horas del día, realizadas en la localidad de Las Peñas a 0 m, en función de las revoluciones de motor.

Tabla 2. Emisiones de gases, altitud 0 m.

Parámetro	Revoluciones de motor [rpm]			
	600	2 000	3 500	4 500
CO [% vol]	0,038	0,078	0,182	0,139
CO ₂ [% vol]	15,88	15,92	15,84	15,73
HC [ppml]	93,556	95,667	65,111	48,222

Para la ciudad de Ibarra, ubicada a 2 200 m, se detallan en la Tabla.3 los datos promedio obtenidos de las mediciones realizadas en tres horarios del día.

Tabla 3. Emisiones de gases, altitud 2 200 m.

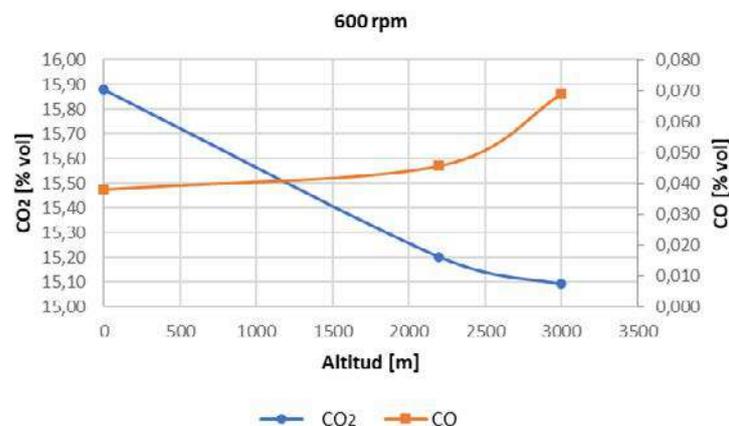
Parámetro	Revoluciones de motor [rpm]			
	600	2000	3500	4500
CO [% vol]	0,046	0,123	0,251	0,182
CO ₂ [% vol]	15,20	15,26	15,21	15,06
HC [ppml]	79,000	45,222	36,889	25,889

En la Tabla.4 se puede apreciar las emisiones de gases promedio obtenidas en la parroquia de Zuleta, ubicada al sur de la provincia de Imbabura con una altitud de 3 000 m. De igual manera se muestran resultados promediados de las pruebas realizadas en los tres horarios del día.

Tabla 4. Emisiones de gases, altitud 3 000 m.

Parámetro	Revoluciones de motor [rpm]			
	600	2000	3500	4500
CO [% vol]	0,069	0,122	0,210	0,149
CO ₂ [% vol]	15,09	15,13	15,12	15,11
HC [ppml]	77,444	68,778	38,000	28,000

En la Fig. 1 se muestra el efecto de la altitud en las emisiones de CO y CO₂, con el motor funcionando a ralentí. Las emisiones de CO aumentan, mientras el CO₂ disminuye a medida que se incrementa la altitud; mostrando la incidencia durante el proceso de combustión de la disminución de la columna de aire y específicamente de oxígeno a mayor altura.

Figura 1. Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO y CO₂, 600 rpm.

En las Fig. 2, 3 y 4, se observa una tendencia similar en la reducción de CO₂ y el incremento de CO conforme aumenta la altitud. Sin embargo, se observa un fenómeno particular que muestra que a medida que se incrementan las revoluciones del motor, sobre las 2 000 rpm, y se supera los 2 200 m las emisiones de CO y CO₂ cambian de

comportamiento, mostrando un mejor desempeño del motor con combustiones más completas, debido al funcionamiento del sistema de control de emisiones del vehículo (sistema EGR, EVAP, PCV) y el efecto del funcionamiento del sistema CVVT.

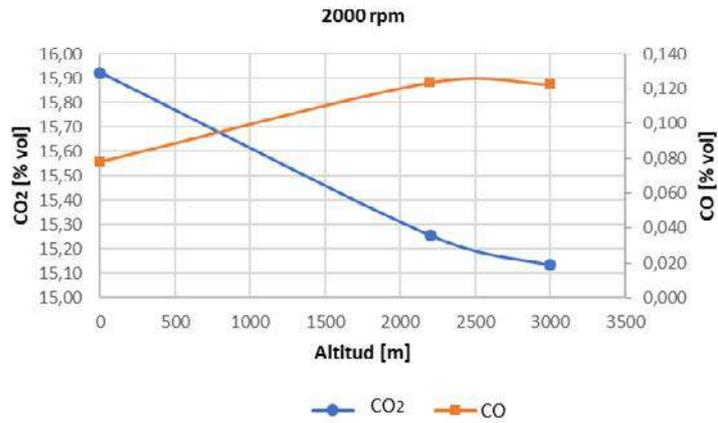


Figura 2. Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO y CO₂, 2 000 rpm.

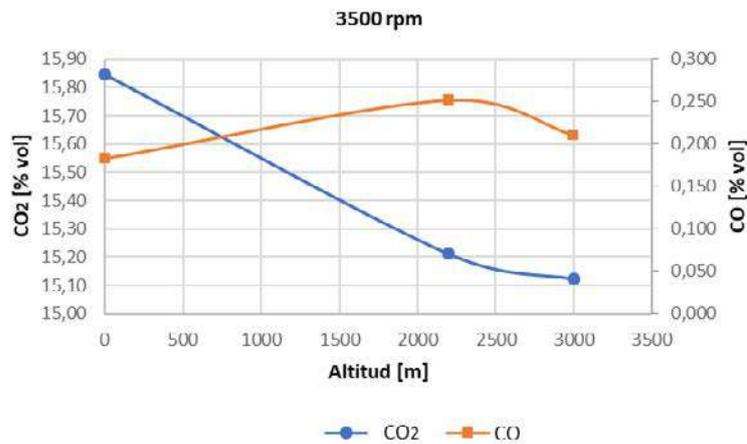


Figura 3. Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO y CO₂, 3 500 rpm.

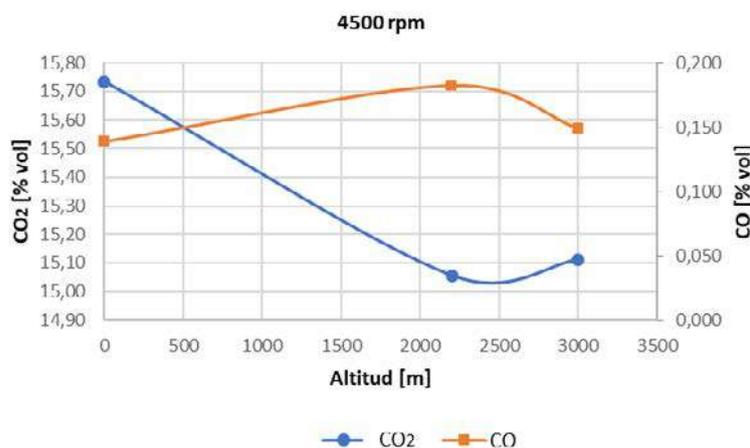


Figura 4. Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO y CO₂, 4 500 rpm.

En la Fig. 5 se presenta el efecto que produce la altitud en la emisión de HC. Los hidrocarburos no combustionados tienden a disminuir con la altitud, sin embargo, al superar los 2 200 m y las 2 000 rpm comienzan a incrementarse, corroborando el comportamiento descrito antes para el caso del CO₂ y CO. Se puede observar que no existe una

correlación de los valores obtenidos debido al efecto de la activación de la válvula de recirculación de gases de escape que trabaja solo en alto régimen.

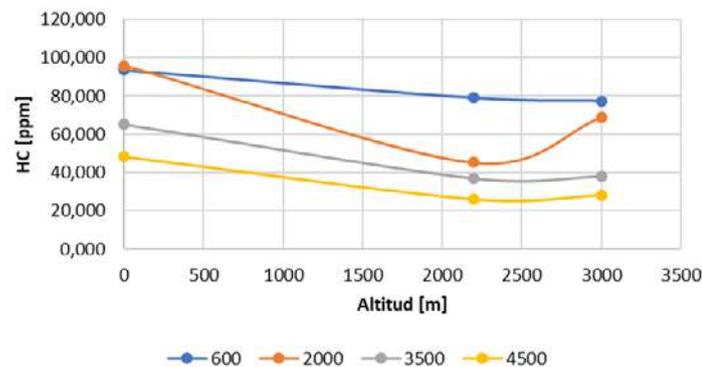


Figura 5. Efecto de la altitud sobre las emisiones de HC.

4. Conclusiones

La altitud a la cual trabaja un motor de combustión interna influye directamente sobre su funcionamiento y emisiones de gases contaminantes, principalmente por la disminución de presión atmosférica y por ende del oxígeno presente en el aire conforme se incrementa la altura. El vehículo analizado realiza el cálculo de la carga del motor mediante la depresión en el colector de admisión medido por su sensor MAP.

A mayor altitud las emisiones de CO presentan una tendencia a aumentar, mientras que el CO₂ y HC a disminuir. Durante el funcionamiento del motor, una combustión incompleta influye en la mayor emisión de CO y HC. La producción elevada de CO durante la combustión indica una mezcla rica o por defecto una combustión incompleta. Por su parte cuando el nivel de CO₂ alcanza sus valores máximos revela el correcto proceso de combustión dentro del motor, mientras que un nivel bajo se relaciona a un proceso de combustión deficiente. Estos resultados son comparables con los datos obtenidos en estudios similares (5,11). Los HC representan los hidrocarburos que salen del motor sin combustionar, una concentración elevada de HC muestra una mezcla rica.

El régimen de giro del motor es un factor influyente durante la producción de monóxido de carbono e hidrocarburos, a medida que incrementan las revoluciones también lo hace el porcentaje de CO emanado, mientras que HC disminuye. Por su parte, en la emisión de CO₂ la velocidad de giro del motor no tiene incidencia representativa como la presión atmosférica referente a la altura.

REFERENCIAS

1. Chenxu J, Zilong L, Yong Q, Wang X, Yahui Z, Xingcai L. 2018. Experimental studies on the co-effects of engine operating parameters and fuel functional groups on the performance and emissions of a GDI engine. *Applied Thermal Engineering*. 140: 707-715. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.095
2. Chen Y, Jinqiu M, Bin, Peng Z, Haining H, Hao C, Xin S. Emissions of automobiles fueled with alternative fuels based on engine technology: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.001
3. Baratta M, Ferrari A, Zhang Q. 2018. Multi-zone thermodynamic modeling of combustion and emission formation in CNG engines using detailed chemical kinetics. *Fuel*. 231:396-403. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.088
4. Diaz L. Estimación de factores de emisión para vehículos automotores de gasolina [Tesis de posgrado]. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco; 2002.
5. Nagpure A, Gurjar B, Kumar P. 2011. Impact of altitude on emission rates of ozone precursors from gasoline-driven light-duty commercial vehicles. *Atmospheric Environment*. 45:1413-1417. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.12.026

6. Soares S, Sodré J. 2002. Effects of atmospheric temperature and pressure on the performance of a vehicle. *Journal of Automobile Engineering*. 216: 473-477. DOI: 10.1243/09544070260137499
7. Lapuerta M, Armas O, Agudelo J, Sánchez C. 2006. Study of the Altitude Effect on Internal Combustion Engine Operation. Part 1: Performance. *Información Tecnológica*. 17:21-30. DOI: 10.4067/S0718-07642006000500005
8. Lapuerta M, Armas O, Agudelo J, Agudelo A. 2006. Study of Altitude Effect on Internal Combustion Engines Operation. Part 2: Diesel Engines. *Información Tecnológica*. 17: 31-41. DOI: 10.4067/S0718-07642006000500006
9. Agudelo J, Agudelo A, Pérez J. 2009. Energy and Exergy analysis of a light duty diesel engine operating at different altitudes. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 48: 45-54. ISSN: 2422-2844
10. Tipanluisa LE, Remache AP, Ayabaca CR, Reina SW. 2017. Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Información Tecnológica*. 28: 3-12. DOI: 10.4067/S0718-07642017000100002
11. Rivera N, Chica J, Zambrano I, García C. 2017. Estudio Del Comportamiento De Un Motor Ciclo Otto De Inyección Electrónica Respecto De La Estequiometría De La Mezcla Y Del Adelanto Al Encendido Para La Ciudad De Cuenca. *Revista Politécnica*. 40: 59-67.
12. Ramos A, García-Contreras R, Armas O. 2016. Performance, combustion timing and emissions from a light duty vehicle at different altitudes fueled with animal fat biodiesel, GTL and diesel fuels. *Applied Energy*. 182: 507-517. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.159
13. O'Driscoll R, Stettler M, Molden N, Oxley T, ApSimon HM. 2017. Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars. *Science of the Total Environment*. 621: 282-290. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.271
14. Efthimios Z. 2011. Impact of altitude on fuel consumption of a gasoline passenger car. *Fuel*. 90: 2340-2342. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.02.004
15. Borken-Kleefeld J, Chen Y. 2015. New emission deterioration rates for gasoline cars – Results from long-term measurements. *Atmospheric Environment*. 101: 58-64. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.013

“SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS DEL PROCESO DE INYECCION DEL PARACHOQUES POSTERIOR DE UN AUTO DEPORTIVO, UTILIZANDO PARA ESTE CASO UN COMPUESTO DE POLIPROPILENO MODIFICADO”

SIMULATION FOR FINITE ELEMENTS OF THE PROCESS OF INJECTION OF THE LATER BUMPER OF A SPORTS CAR, USING FOR THIS CASE A COMPOUND OF MODIFIED POLYPROPYLENE

F, Cargua Colcha ⁽¹⁾ O, Yupanqui Taipe ⁽²⁾ B, Corrales Bastidas ⁽³⁾

(1) Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos, Euskal Herriko Unibertsitatea / Universidad del País Vasco.

(2) Escuela de Ingeniería Automotriz. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

(3) Facultad CIYA, Carrera Ingeniería Electromecánica, Universidad Técnica de Cotopaxi.

RESUMEN

En el presente trabajo se describe al moldeo por inyección como un proceso en relación al medio ambiente más favorable comparado con la producción de acero, la fabricación de papel, la tala de árboles o producción. No contamina el ambiente de forma directa, no emite gases ni desechos acuosos, y su producción y otros procesos relacionados con su ciclo de vida, generan bajos niveles de ruido. Una de las industrias en las que el plástico ha entrado con mayor fuerza en los últimos años es en el transporte. En automoción, elementos estructurales y de interior que tradicionalmente se fabricaban en metal han pasado a ser elaborados con plástico. La popularidad de este método de producción de plásticos, se explica con la versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, el diseño escalable desde procesos de prototipos rápidos, altos niveles de producción y bajos costos, alta o baja automatización según el costo de la pieza, se pueden obtener geometrías muy complicadas, que serían imposibles por otras técnicas, las piezas moldeadas requieren muy poco o nulo acabado pues son terminadas con la rugosidad de superficie deseada, color y transparencia u opacidad, buena tolerancia dimensional de piezas moldeadas. Además de los materiales comúnmente utilizados en la inyección de plásticos, para la aplicación de parachoques, evaluaremos un material con una tasa más alta de reciclado (Daplen EE112AE).

Palabras clave: sistema de inyección, refrigeración, fuerza de cierre, deformación, moldflow.

ABSTRACT

In the present work, injection molding is described as a process in relation to the most favorable environment compared to steel production, paper making, tree felling or production. It does not pollute the environment directly, it does not emit gases or aqueous waste, and its production and other processes related to its life cycle generate low noise levels. One of the industries in which the plastic has entered with greater force in recent years is in transportation. In automotive, structural and interior elements that were traditionally made of metal have been made with plastic. The popularity of this method of production of plastics, is explained by the versatility of parts that can be manufactured, the speed of manufacture, the scalable design from rapid prototype processes, high levels of production and low costs, high or low automation according to cost of the piece, you can get very complicated geometries, which would be impossible by other techniques, the molded parts require very little or no finish because they are finished

with the desired surface roughness, color and transparency or opacity, good dimensional tolerance of molded parts. In addition to the materials commonly used in the injection of plastics, for the application of bumpers, we will evaluate a material with a higher rate of recycling (Daplen EE112AE).

Key words: injection system, cooling, closing force, deformation, moldflow

1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros vehículos automóviles de combustión interna fabricados en Alemania hasta hoy en día, los elementos estructurales chasis y carrocería han sido modificados tanto en materiales de fabricación como en diseño; específicamente nuestro elemento de análisis el parachoques ha sufrido una gran evolución, tanto en forma, material y propósito.

El perfil posterior de los vehículos, está introduciendo cambios constantemente. Mientras que hace algunos años, el aspecto más importante a tener en cuenta era la resistencia a los impactos, actualmente la protección de peatones es el aspecto más importante que se considera desde las fases iniciales de diseño del vehículo. [1].

El moldeo por inyección es un proceso con relación al medio ambiente más favorable comparado con la producción de acero, la fabricación de papel, la tala de árboles o producción. No contamina el ambiente de forma directa, no emite gases ni desechos acuosos, y su producción y otros procesos relacionados con su ciclo de vida, generan bajos niveles de ruido. [2].

La producción de plásticos, se explica con la versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, el diseño escalable desde procesos de prototipos rápidos, altos niveles de producción y bajos costos, alta o baja automatización según el costo de la pieza, se pueden obtener geometrías muy complicadas,

Además de los materiales comúnmente utilizados en la inyección de plásticos, para la aplicación de parachoques (PP, ABS), evaluaremos un material con una tasa más alta de reciclado (Daplen EE112AE) [4].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales Plásticos

La palabra plástico procede del término griego plásticos, que significa (capaz de ser moldeado). El término expresa la principal propiedad de este material: su capacidad para deformarse y, por tanto, su facilidad para adoptar prácticamente cualquier forma. [3].

Los plásticos están compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno

2.2. Clasificación de los Plásticos

Se pueden clasificar por su estructura química, ya que es la que determina sus propiedades, la clasificación por su estructura química es de acuerdo a su comportamiento al calor, cristalinidad y presencia de monómeros. Generalmente los plásticos se clasifican por su comportamiento al calor en: Termoplásticos, Termoestables y Elastómeros [6].

Materiales Termoplásticos

Son materiales cuyas macromoléculas están ordenadas a manera de largas cadenas unidas entre sí por medio de enlaces secundarios



Figura 1. Ordenación Estructura Termoplástica.

Materiales Termoestables

Los materiales Plásticos termoestables, en general son líquidos durante la fase de mezcla, pero endurecen cuando son calentados.

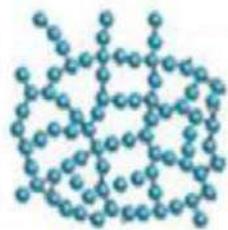


Figura 2. Ordenación de moléculas material termoestable

Materiales Elastómeros

La goma es un material capaz de deformarse varias veces su forma original y al interrumpir la acción de la fuerza que ha provocado dicha deformación recupera la forma original.

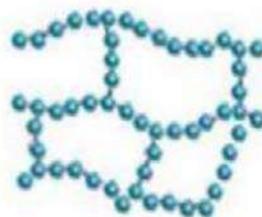


Figura 3. Ordenación de moléculas materiales elastómeros.

Los datos entregados por parte de la máquina permiten apreciar porcentajes de los diferentes materiales que contiene la muestra, registrados por el software que se comunica con el aparato.

2.3. Tipos de moldeo

Moldeo Por Inyección.

El moldeo por inyección es la técnica de procesamiento de plástico más utilizadas a nivel industrial en la producción de piezas de material polimérico, más del 60 % de la industria se soporta en máquinas de inyección, debido a que simplifica la producción de piezas con formas geométricas de alta complejidad. [7]. La producción se realiza en ciclos rápidos, consiguiendo un producto terminado al salir del conjunto molde y máquina de inyección [8]. A continuación, en la Figura 9, se puede observar los principales sistemas de una máquina de inyección.

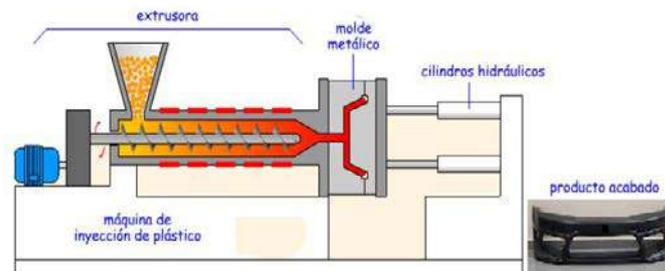


Figura 4. Principales sistemas de una máquina de inyección.

Proceso de Inyección

El ciclo de inyección consiste en 4 etapas principales:

1. Cierre del molde.
2. Llenado y mantenimiento del molde.
3. Plastificación y enfriamiento de la pieza.
4. Apertura y Desmolde.

Como se puede observar en la Figura 5, Cada una de las etapas comprende el funcionamiento de diversos sistemas de la máquina de inyección.

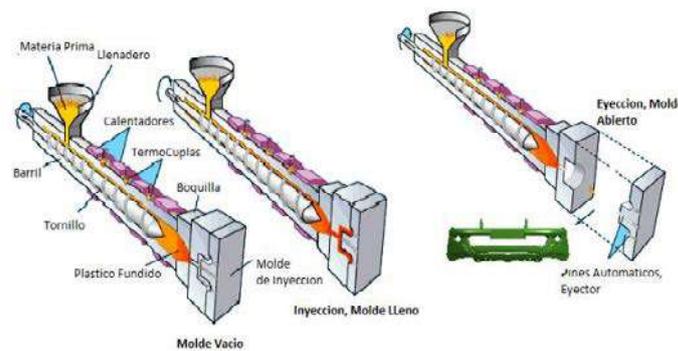


Figura 5. Etapas proceso de inyección.

Material a Moldear.

Cada tipo de material plástico tiene sus características particulares, tanto en lo que se refiere a las que poseen una vez transformadas, como a las relativas a sus condiciones de procesado. El conocimiento de ellas, no sólo es necesario al moldeador que va a inyectar la pieza, sino también al diseñar el molde. En general, hay que tener en cuenta que la elección del material requiere estudio de los puntos favorables y desfavorables de cada uno de ellos, en función del fin a que va destinado el producto final, algunas de las características a considerar son las siguientes [9].

Elasticidad. Temperatura de uso, resistencia a la llama. Resistencia al impacto, transparencia, resistencia mecánica, propiedades eléctricas, resistencia a la abrasión, resistencia a la humedad, permeabilidad, resistencia a medios ambientales, fluencia, limitación de diseño.

Materiales Plásticos.

Automoción

Actualmente existe un aumento creciente de la utilización de plásticos en la industria de automoción, este hecho se debe fundamentalmente a las ventajas que presentan los plásticos frente a otros materiales. Características como resistencia a la corrosión, bajo peso, alta facilidad para moldear, posibilidad de

reciclaje, y buenas propiedades como aislamiento eléctrico, térmico y acústico, hacen de los plásticos materiales de gran utilidad en la fabricación de componentes del automóvil. [10].

Especificaciones para Plásticos usados en Inyección en la aplicación parachoques.

Por lo general, actualmente en la fabricación de los parachoques para vehículos, las características que se requieren para el polímero que va a ser transformado en el proceso de inyección, y que cumple con los requerimientos en esta aplicación son las siguientes [11].

Ausencia de defectos

Adecuada relación entre modulo elástico y resistencia al impacto

Gran estabilidad dimensional térmica y mecánica

Bajo coeficiente de expansión térmica lineal

Excelente adherencia de la pintura

Fundamentos de la respuesta del material

Puede considerarse al procedimiento de moldeo por inyección como una trilogía cuyos componentes son la unidad de inyección, el molde y el polímero. Se trata de estudiar el comportamiento del material durante su tratamiento y sus efectos sobre la calidad del producto. [12] Los principales parámetros de control del proceso son:

- La temperatura del material fundido
- La temperatura del molde
- La presión de inyección y la presión de retención
- La velocidad de inyección
- La distribución del tiempo para las diversas partes del ciclo del proceso.

Materiales Parachoques.

En automoción para la fabricación de parachoques, en los principales fabricantes de vehículos europeos. Se mencionarán las principales características de los materiales, centrándose en las características mecánicas y en las de procesabilidad de los mismos.

DAPLEN EE 112AE

Es un compuesto de polipropileno modificado con elastómero relleno de cargas de mineral 13 %. Este material es apto para los sistemas de pintura primarios en la línea de ensamblaje y cumple con todos los criterios de adhesividad de la pintura definidos por BMW. Por otra parte, el buen balance de resistencia al impacto y rigidez exhibido por Daplen EE112AE permite el diseño de piezas con peso reducido. (Información catalogo Borealis). Observar tabla de propiedades 1

Tabla 1. Tabla de propiedades del DAPLEN EE112AE

Propiedades	Resultado	Normas
Densidad	980 kg/m ³	ISO 1183
Índice de fluidez	14 g/10 min	ISO 1133
Módulo de flexión	1500 MPa	ISO 138
Resistencia a la tracción	18 MPa	ISO 527-2
Temperatura de flexión bajo carga	95 °	ISO 75-2

Resistencia al impacto Charpy, con muescas (23°)	65 KJ/m ²	ISO 179/1Ea
Resistencia al impacto Charpy, con muescas (-20°)	12 KJ/m ²	ISO 179/1eA

Este material ha sido desarrollado especialmente para la industria del automóvil y es adecuado para aplicaciones como: Parachoques, Elementos exteriores.

Ha sido desarrollado para moldeo por Inyección, por lo que puede ser procesado fácilmente de moldeo por inyección estándar. Los siguientes parámetros deben ser utilizados

Temperatura de alimentación 40 - 80 ° C

Temperatura de masa 220 - 260 ° C

Contrapresión baja a media

Presión de retención 30 - 60 MPa

Temperatura del molde 30 - 50 ° C

Velocidad de tornillo baja a media

Velocidad de flujo frontal 100 - 200 mm / s

El producto es adecuado para el reciclaje utilizando métodos modernos de trituración y limpieza.

Caso de Estudio.

La pieza a evaluar, es el parachoques trasero del Audi R8, V10. Observar Figura 7

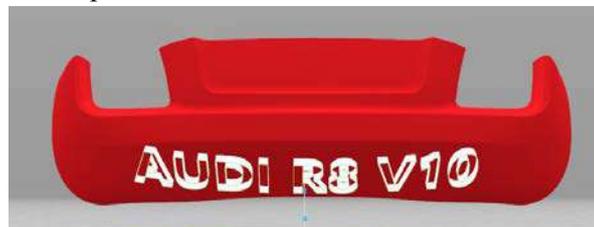


Figura 6. Solido de parachoques Posterior Audi R8 V10. Formato Katia.

Esta pieza hace parte del sistema de protección trasero del vehículo, además como se puede observar en la Figura 7, es el elemento continuo, a cara vista más grande del todo el vehículo por lo que debe cumplir con los más altos estándares de calidad de la marca.

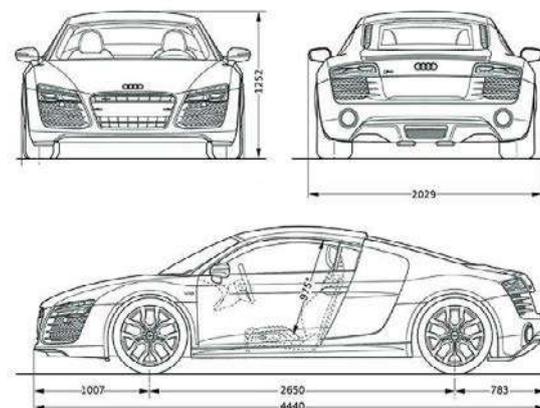


Figura 7. Medidas en milímetros del vehículo Audi R8

Hay que tener en cuenta que la pieza, tiene una medida única, y que esta debe acoplar perfectamente a la carrocería, por lo que no es permitido resultados con una presencia de deformación superior a la tolerada. El acabado superficial de la pieza debe ser excelente, y no debe presentar diferencias con el resto del acabado del vehículo, garantizando la satisfacción del cliente y los más altos estándares de vehículos esta gama. Por lo que estudiaremos la inyección de la pieza con diferentes polímeros y determinaremos, cuál de ellos garantiza la calidad exigida por el fabricante.

Datos Geométricos parachoque.

Volumen Total de la Pieza: 2764 **cm³**

Superficies de las piezas proyectadas sobre el plano de partición del molde: **8065,10 cm²**

Espesor Pieza: **2,5 mm**

Material de la pieza

El material del cual estará hecho la pieza, y que se evaluaría su comportamiento en la simulación mediante la herramienta de elementos finitos, Moldflow. Como observamos en la Figura 8, este material, es fabricado por la casa Borealis Europe, DAPLEN EE 112AE.

Material termoplástico

Descripción	Propiedades de contracción		Carga / fibra		Impacto medioambiental		Indicadores de calidad	
	Procesamiento recomendado		Propiedades reológicas		Propiedades térmicas	Propiedades pVT	Propiedades mecánicas	
Nombre de la familia	POLYPROPYLENES (PP)							
Nombre comercial	EE112AE							
Fabricante	Borealis Europe							
Vínculo								
Abreviatura de familia	PP							
Estructura del material	Crystalline							
Origen de los datos	Manufacturer (Borealis Europe) : pvT-Measured : mech-Measured							
Fecha de la última modificación	19-AUG-14							
Fecha de ensayo	19-AUG-14							
Estado de los datos	Non-Confidential							
Id. del material	15627							
Código de grado	CM 15627							
Código de proveedor	PCD							
Fibras/cargas	13% Mineral cargado							

Figura 8. Presentación Daplen EE112AE Moldflow

Como podemos ver en la Figura 9, la herramienta utilizada para la simulación del proceso, el programa Moldflow muestra las propiedades de cada material, y tiene definida las condiciones de Procesamiento Recomendado.

Material termoplástico

Descripción	Propiedades de contracción		Carga / fibra		Impacto medioambiental		Indicadores de calidad	
	Procesamiento recomendado		Propiedades reológicas		Propiedades térmicas	Propiedades pVT	Propiedades mecánicas	
Temperatura de la superficie del molde	50	C						
Temperatura de masa fundida	240	C						
Intervalo de temperaturas del molde (recomendado)								
Mínimo	20	C						
Máximo	60	C						
Intervalo de temperaturas de masa fundida (recomendado)								
Mínimo	220	C						
Máximo	280	C						
Temperatura absoluta máxima de masa fundida	300	C						
Temperatura de expulsión	122	C						
			Ver información del ensayo para temperatura de expulsión...					
Esfuerzo de cizalla máximo	0.25	MPa						
Velocidad de cizalla máxima	100000	1/s						

Figura 9. Recomendaciones de Procesado Daplen EE112AE

En la Figura 10, se observa la grafica de las propiedades térmicas del material escogido para la simulación

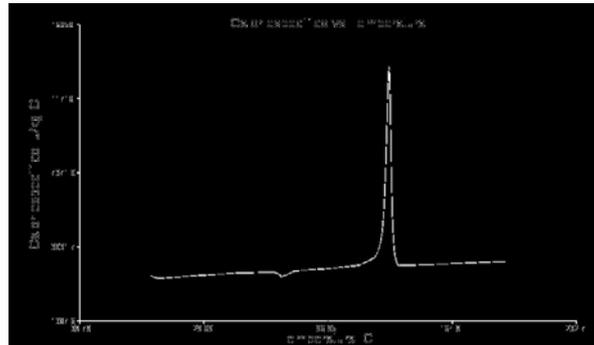


Figura 10. Propiedades Térmicas Daplen EE112AE

SIMULACIÓN EN MOLDFLOW

Se procederá a realizar un estudio de llenado de la pieza para así poder obtener los parámetros de inyección y la configuración óptima para el caso de estudio.

El primer paso, para simular la inyección de una pieza en Moldflow, es proponer modelos con diferentes puntos de inyección y evaluar las características de los resultados y comparar, entre ellos escoger la mejor configuración. Empezaremos con un análisis previo de llenado, donde tendremos en cuenta como principales parámetros, la calidad y confianza del proceso de llenado, líneas de soldadura, atrapamientos de aire, rechupes y temperatura de como criterio principal para la evaluación y posterior escogencia del modelo, la presión de llenado y su balance homogenizado en la pieza.

PROPUESTAS DE INYECCIÓN.

Al ser una pieza de grandes dimensiones se necesitan varios puntos de inyección. A continuación presentaremos los 7 modelos de estudios más representativos. Se harán varios estudios con diferentes conjuntos de puntos de inyección con el fin de compararlos y elegir el más adecuado.

Es muy importante las limitaciones de la pieza a la hora de colocar los puntos de inyección: no se podrá colocar ningún punto en cualquier cara vista. Se deberán poner en las aristas interiores de la pieza. Ya que son localizaciones donde el filete resultante del proceso de inyección no afecte las caras vistas de la pieza.

Modelo 1

Como se observa en la Figura 11, esta consta de 4 Puntos de Inyección, la localización en la parte superior del parachoques, 1 punto en el medio y 3 en la zona en la zona media. Cara interior.



Figura 11. Propuesta de Inyección 1

Modelo 2

Como se observa en la Figura 12, este tiene 2 puntos en la barra interior.



Figura 12 Propuesta de Inyección 2

Modelo 3

Como se observa en la Figura 13, esta propuesta está definido por tres puntos de inyección. Dos zonas media barra y uno parte superior, porta placa. Zona interior.

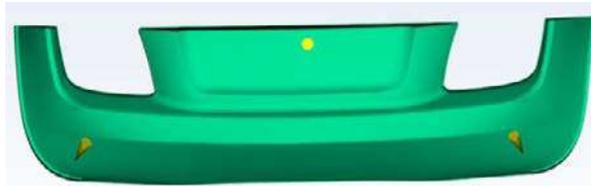


Figura 13 Propuesta de Inyección 3

Modelo 4

Como se observa en la Figura 14, este modelo tiene tres puntos de inyección, en la parte superior, de la parte interior.



Figura 14 Propuesta de Inyección 4

Modelo 5

Como se observa en la Figura 15. Este modelo, tiene distribuidos 5 puntos de inyección. 3 en la parte superior de la pieza y dos en la zona media de la barra.



Figura 15 Propuesta de Inyección 5

Modelo 6

Como se observa en la Figura 16. Este tiene 3 puntos en la zona media.

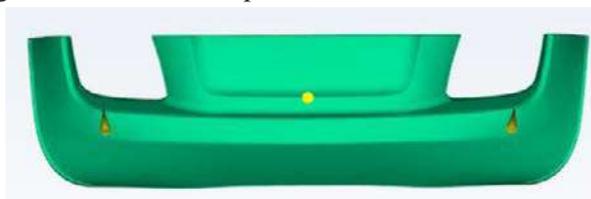


Figura 16 Propuesta de Inyección 6

Modelo 7

Como se observa en la Figura 17 este modelo consta de 3 puntos en la barra, en la parte media interior.



Figura 17 Propuesta de Inyección 7

En primer lugar se analiza el llenado previo, de todas las propuestas fijándose en los siguientes puntos clave, que dirán que modelos son los más beneficiosos.

Tiempo de Llenado

En los modelos 1 al 5, como se puede apreciar en la Figura 18 en los segundos 2.90, observamos un mapa de colores, donde el azul es el inicio del llenado, y los bordes en rojo, representan el último tiempo de llenado, apreciamos desbalanceo del proceso de llenado en estos modelos, como en ese tiempo determinado quedan islas sin material.

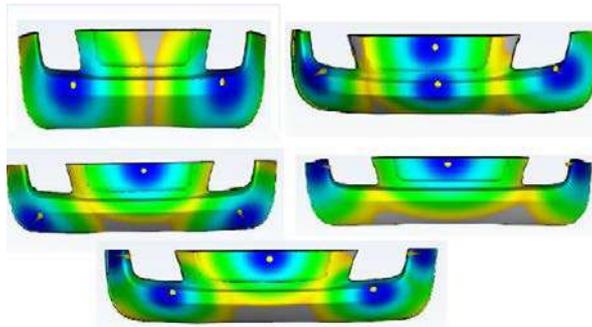


Figura 18 Tiempo de Llenado. Modelos 1 al 5

Efectos que se pueden considerar perjudiciales, porque en esas zonas se quedan gases que no pueden escapar y transmiten defectos a las piezas tales como ampollas o burbujas. En los modelos 6 y 7 el llenado es más simétrico y este fenómeno no ocurre.

Para corroborar esto, se muestra en la Figura 19, los análisis de "Atrapamiento de aire" y líneas de soldaduras, en la cara vista de las propuestas de inyección con 2, 4, y 5 inyectores. Aquellos que presentan los valores más altos, de estos defectos.

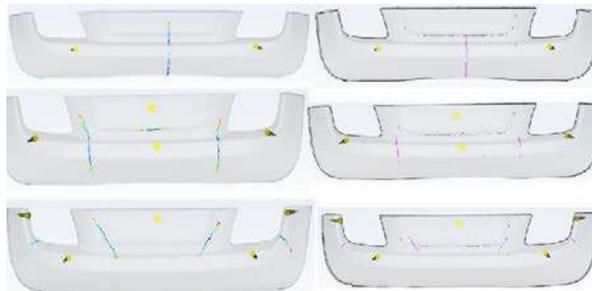


Figura 19 Presentación de Líneas de Soldadura Y Atrapamientos de Aire. Modelos 2, 4, 5

Defectos que hacen descartables, estas propuestas, pues la calidad del producto obtenido es inferior a la solicitada por el control de calidad del posible cliente.

Calidad de Refrigeración

Respecto a la revisión previa de calidad de refrigeración, se observa en la Figura 20, todos los modelos presentan valores muy similares. Todos se determinan, como sistemas fáciles de refrigerar. Teniendo en cuenta la experiencia adquirida realizando este informe, se debe controlar los salientes superiores, donde habrá que diseñar más superficie de refrigeración en esa zona para poder conseguir una buena calidad en esa parte de la pieza.

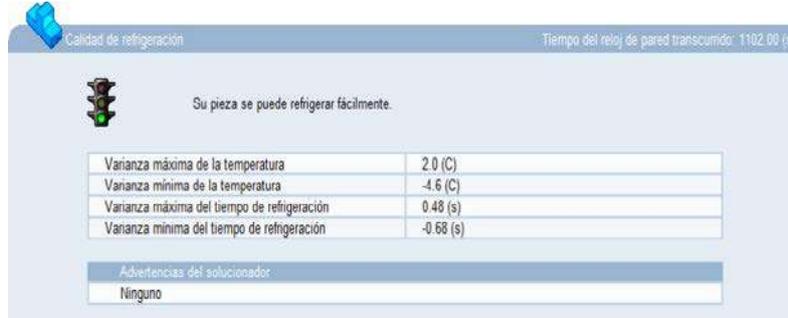


Figura 20 Análisis de Refrigeración Previa

Estimación Rechupes.

Respecto a la revisión previa de presencia de rechupes, todos los modelos presentan valores muy similares. Todos se determinan, como modelos que no presentan rechupes. En promedio los resultados son inferiores al 0,5%. Valores mínimos Que se pueden despreciar y que no son determinantes a la hora de escoger un modelo.

Presión de Inyección Y Calidad.

Teniendo en cuenta los resultados, observados en la Figura 21. Descartamos los modelos con 2 inyectores, pues usan presiones de inyección mucho mayor. Y por el gran tamaño de la pieza, presentan calidades reducidas, como se observa en la Figura 21. Que por las exigencias de calidad hacen descartar el modelo.

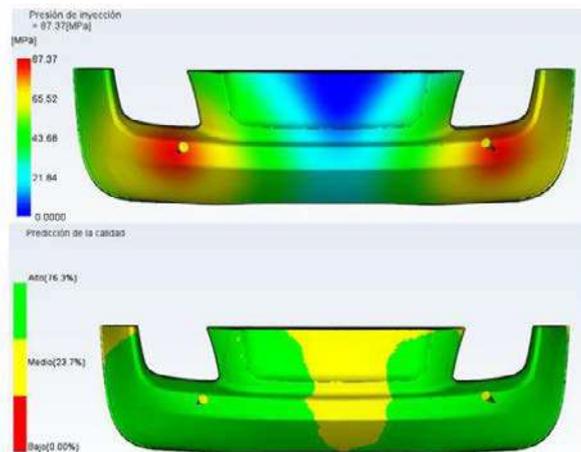


Figura 21 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 2 Inyectores

Los modelos con cuatro inyectores, también son descartados pues a pesar que presentan una presión más baja de llenado, como se observa en la Figura 22, la diferencia con las propuestas que presentan 3 inyectores es menor a 10 Mpa. Necesita una mayor inversión, así como una mayor dificultad: Para refrigerar, y en el proceso de fabricación del molde.

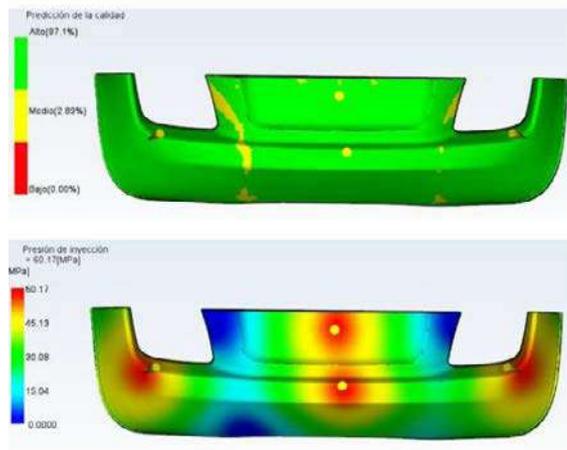


Figura 22 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 4 Inyectores

También se descarta la propuesta con cinco inyectores, y como se podrá observar en la Figura 23, la cantidad de inyectores no garantizan la disminución de la presión de inyección y resultados altos en la predicción de calidad, si no se encuentran bien ubicados. Por lo que descartamos también esta propuesta.

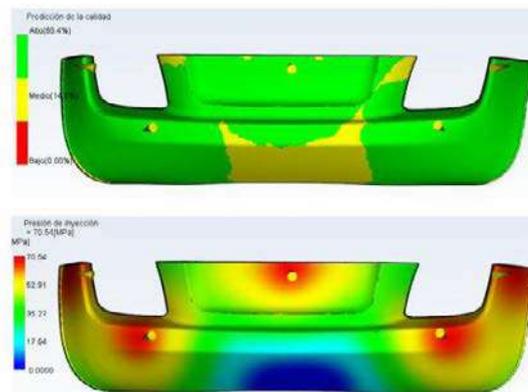


Figura 23 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 5 Inyectores

Los que nos deja para escoger los modelos con 3 inyectores, los modelos 3, 4, 6,7 como se puede observar en las Figuras 24 a la 27 y será criterio máximo de escogencia los resultados de la predicción de calidad y presión del proceso de llenado.

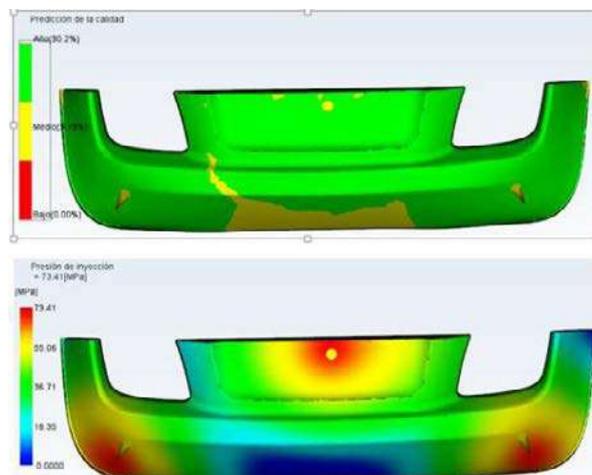


Figura 24 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 3 Inyectores. Propuesta 3

Como se observa en la Figura 24 los resultados de este modelo. Calidad 80,7 %. Presión 73,41 Mpa

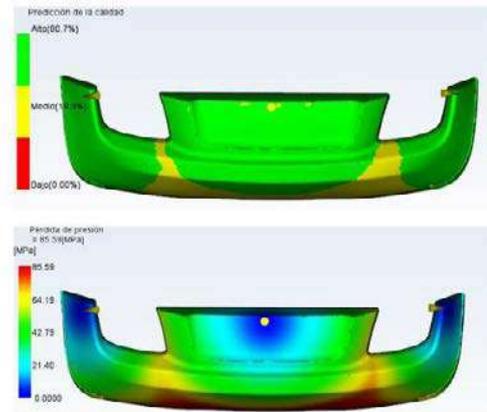


Figura 25 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 3 Inyectores. Propuesta 4

Como se observa en la Figura 25 los resultados de este modelo. Calidad 80,7 %. Presión 85,59 Mpa

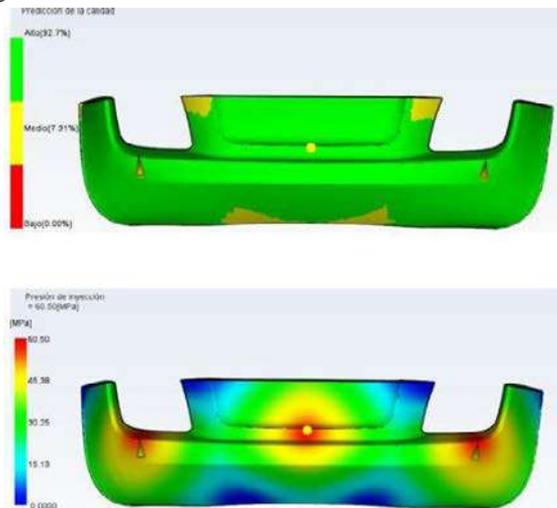


Figura 26 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 3 Inyectores. Propuesta 6

Como se observa en la Figura 26 los resultados de este modelo. Calidad 92,7%. Presión 60,50 Mpa

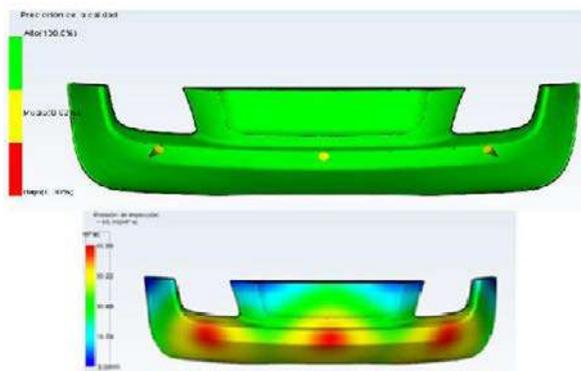


Figura 27 Resultados de Calidad y Presión Modelo con 3 Inyectores. Propuesta 7

Como se observa en la Figura 27 los resultados de este modelo. Calidad Presión 100 % y 66,96 Mpa.

Como se pudo observar en los resultados obtenidos con las propuestas de tres inyectores, las calidades obtenida en promedio son mejores, sin embargo entre ellos son los que están ubicados en la zona media, donde se puede distribuir de manera más simétrica el flujo el plástico en el proceso de llenado, los que tiene mejores calidades y una presión balanceada.

Se ha escogido el modelo 7, con presión de 66,96 Mpa y una predicción de calidad de 100%.

Análisis Moldflow Parachoques.

Con los puntos de inyección en su posición óptima es hora de realizar un análisis más preciso, a la propuesta 7. Añadiendo la distribución de los sistemas de inyección y de los sistemas de refrigeración.

Cálculos previos

- **Cantidad de Material**

Se empieza calculando la fuerza de cierre y la cantidad de material, necesario en cada colada

Para el cálculo de la masa de plástico a inyectar en el molde, bastará con tomar el volumen de la pieza 2763,95 cm³ y la densidad promedio del Daplen EE112AE 0,868815, resultado de la suma de la densidad de la masa fundida 0,74922, y la densidad de sólido del material 0,98841. Y multiplicarlo por el número de piezas que se inyectarán a la vez.

El volumen de la mazarota se considera despreciable frente al de la pieza al igual que los canales de distribución.

Cálculos Matemáticos.

$$\text{Masa de pieza} = \text{Volumen} \cdot \rho \text{ Material a Inyectar} \cdot n$$

$$\text{Masa de pieza} = 2763,95 \text{ (cm}^3\text{)} \times 0,868815 \text{ (g/ cm}^3\text{)}$$

$$\text{Masa de pieza} = 2401,36 \text{ Gramos}$$

Cálculos Moldflow.

Peso total de la pieza al final del llenado	2455,783 (g)
Volumen inyectado	2763,9500 (cm ³)

La diferencia entre los resultados, 55 gramos se a que el valor calculado se ha empleado para la densidad del material un valor intermedio en la temperatura ambiente de este y el material fundido, por lo que solo se trata de una estimación. El valor obtenido con el Moldflow Adviser presenta un valor más ajustado a la realidad del proceso.

- **Fuerza de Cierre**

Para seleccionar la máquina de inyección adecuada para un determinado molde es necesario comprobar numerosos factores de tipo técnico. Una técnica habitual es considerar la fuerza de cierre, y en todo caso el volumen de inyección y las dimensiones del molde.

Para un volumen como el de nuestra pieza 2764 cm³, solo es factible elaborar un molde de una cavidad. Consecuente a que requerirá una máquina con un volumen máximo de inyección elevado. Se moldeará en moldes de 1 cavidad. También con Moldflow obtenemos el valor de la fuerza de apertura, que se produce en el molde.

Presión real de inyección	102,702 (MPa)
Área de fuerza de cierre	6065,0979 (cm ²)
Fuerza de cierre max, durante el llenado	3869,795 (ton)
Conmutacion de velocidad/presión a % volumen	97,35 %
Conmutacion de velocidad / presión en tiempo	3,21 (s)
Peso total de la pieza al final del llenado	2455,783 (g)

Valor que nos asegura que podemos trabajar con este material, en las condiciones de simulación deseadas. La presión obtenida, no excede el criterio de máxima presión en la ventana configuración de proceso. Además el valor de la fuerza de apertura obtenida rondaría en torno a los **3870 Tns**. Presión que a su vez no es uniforme y por tanto la fuerza de cierre de la máquina escogida será aproximadamente de **4000 Tns**. Se establece que la presión de inyección, y en consecuencia, la presión que se produzca en el interior del molde, para el Daplen EE112AE sea de un máximo de **180**. Como se observa en la Figura 28.

Propiedades del material

Temperatura del molde [20.00:60.00] C

Temperatura de masa fundida [220.00:280.00] C

Límite máximo de la presión de inyección

Presión máxima de inyección de la máquina [10.00:500.00] MPa

Figura 28 Limitantes de Presión

Tamaño del Molde:

Seleccionando las dimensiones del molde donde se inyectará la pieza y las partes del molde. El molde real tendrá 2 placas con un único plato de partición. Como se puede observar en la Figura 29. El molde tiene las siguientes dimensiones, y será realizado, en el material Tool Steel P-20.

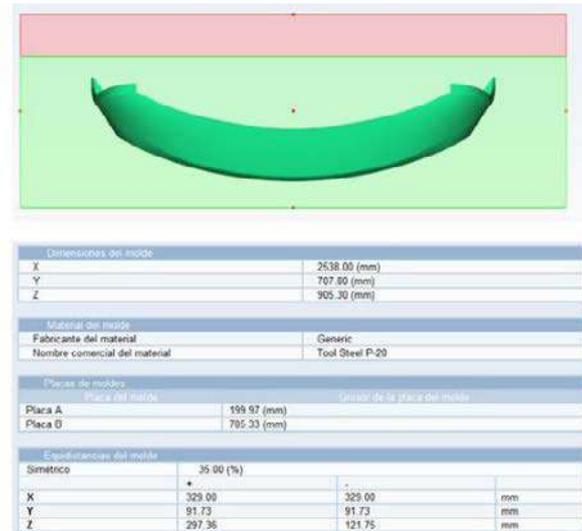


Figura 29 Dimensiones Molde

Es importante mencionar que por sencillez del modelo, el plano de partición se ha situado a la final del bebedero. Y que por defecto en la versión Adviser la cota Z del final del bebedero es también la cota Z del plano de partición.

Sistema De Inyección.

El sistema de inyección es muy sencillo, como se puede ver en la Figura 30. El bebedero se encuentra en el centro del molde (coincidiendo con la posición de la puntera de inyección de la máquina).

Escogimos un sistema de cámara caliente, debido al volumen y peso de la pieza, debido a que estos sistemas de canal caliente presentan una menor pérdida de presión respecto a moldes comparables con sistemas de canales fríos.

En este sentido se puede reducir el tiempo de llenado, lo cual significa una reducción del tiempo de ciclo.

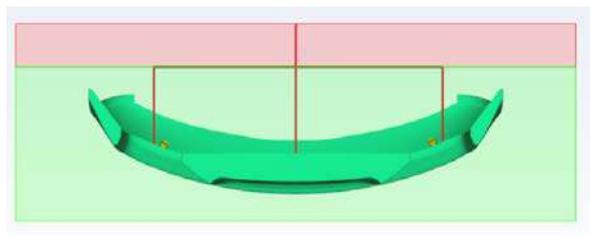


Figura 30 Sistema de Canales Y Bebedero

Resultados Inyección:

Tiempo de Llenado

En la representación de la Figura 31. Se puede observar el momento en el que se llena cada parte de la pieza, que va desde 0 segundos en la zona más próxima a los puntos de inyección, que se representa en color azul hasta los casi 3.359 segundos en las partes más alejadas de este y adonde tarda más en llegar, que se representa en color rojo. Esto indica claramente cómo progresa el frente del flujo de material en el tiempo una vez entra en la pieza. La distribución es balanceada.

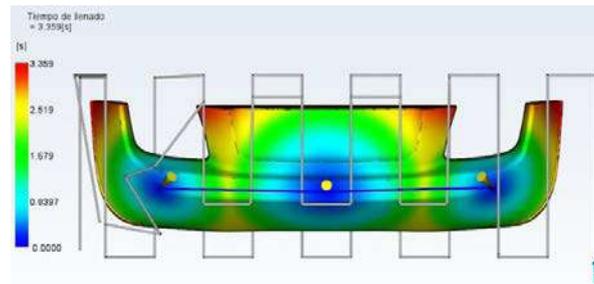


Figura 31. Tiempo Llenado De La pieza

Presión de Inyección

La Figura 32 muestra las presiones en la pieza y en los canales de alimentación al final del llenado. El polímero siempre se mueve en el sentido del gradiente de presión negativo, desde la presión más alta hacia la más baja; por tanto, la máxima presión se produce en los puntos de inyección del polímero y la presión mínima se produce en el frente de masa fundida durante la fase de llenado.

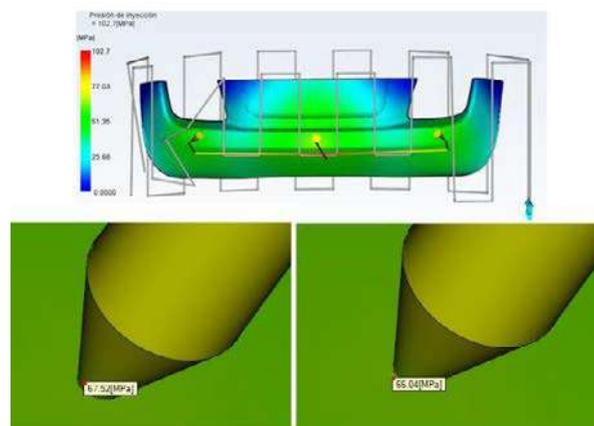


Figura 32 Diferencia de Presión Entre Inyector y Pieza

También se observa en las Figura 32, en el llenado de la pieza, como aparece una caída de presión aceptable, menor a 10 Mpa (100 bares) entre todas las entradas y la pieza, en el punto de inyección, con más presión, (la del centro) la caída de presión, es menor a 3 Mpa. (20 bares), es de 67,52 a 66,04 Mpa. (14,8 bares). Estos valores son típicos de procesos de inyección de termoplásticos, Los polímeros van del punto de más presión al de menor presión y suelen ser indicativos de procesos viables, sin problemas asociados a tensiones residuales excesivas en pieza, Además de garantizar una confianza de llenado máxima. Como se observa en la Figura 33.

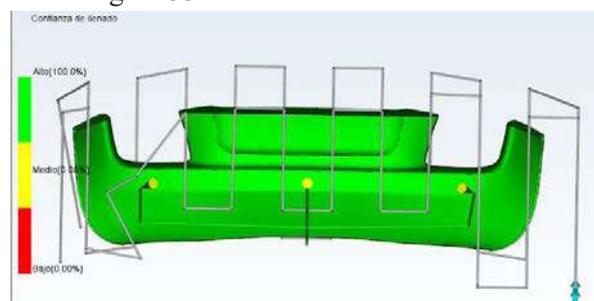


Figura 33 Resultados Confianza de llenado

Tiempo Para Alcanzar La Temperatura De Expulsión

El resultado Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión muestra el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de expulsión, que se mide desde el inicio del llenado.

En nuestro caso, análisis Dual Domain, el valor que se muestra es el tiempo necesario para que el 100% del espesor local alcance la temperatura de expulsión.

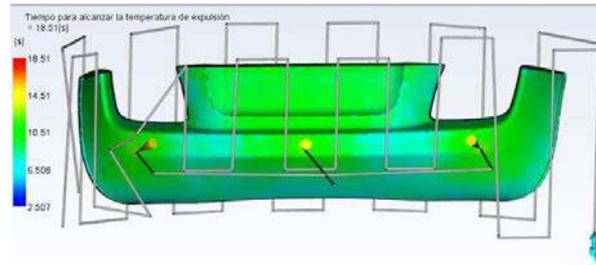


Figura 34 Tiempo para Alcanzar la Temperatura de Expulsión

Como se ve en la Figura 34. Este tiempo alcanza un valor entorno a los 10.51 segundos y como es lógico el mayor tiempo está cerca de los puntos de inyección ya que es el último punto donde el material entra.

Resultados Sistema de Refrigeración

Con este diseño de canales de refrigeración, obtenemos un número de Reynolds de 16062, como se ve en la Figura 35, lo que es natural con la reducción de 200 C en temperatura, en la zona crítica en tan poco tiempo. Lo que significa que necesitaremos un equipo que suministre una presión en el sistema de 134,8 Kpa.

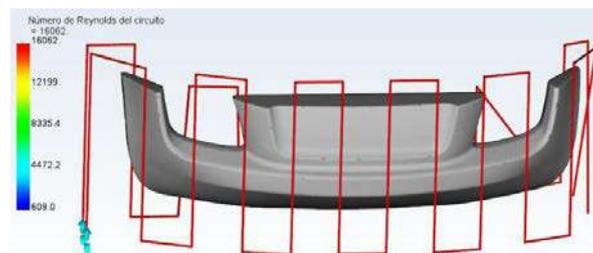


Figura 35 Resultados Número de Reynolds

La diferencia de temperatura entre la entrada y salida de refrigerante, agua en este caso es de 11,62 grados centígrados. Como se puede observar en la Figura 36.

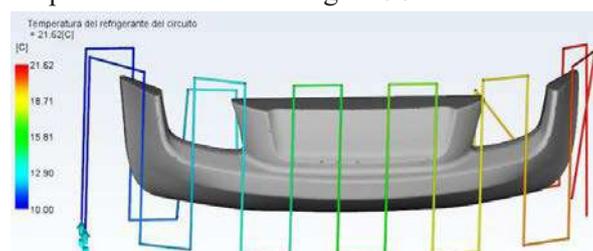


Figura 36 Temperatura Refrigerante Entrada y Salida

La cantidad de calor, adsorbida por el agua, por minuto, al ganar temperatura, está determinada por la formula.

$$Q = c_p \text{ agua} M \text{ agua} (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})$$

$$Q = 10 \text{ kilogramos} \cdot 1 \text{ kcal/KgC} (21.62 - 10) \text{C}$$

$$Q = 116,2 \text{ Kilocalorias}$$

Análisis de Deformación.

Contracción Volumétrica en la Expulsión.

En toda inyección se tiene presente que las cavidades del molde tendrán que ser de unas dimensiones mayores a las dimensiones que se quieran en la pieza, debido a que la pieza en la etapa de enfriamiento sufre una cierta contracción.

La contracción depende de:

1. Las condiciones de inyección y su configuración
2. La Refrigeración.
3. La cantidad de humedad en los materiales
4. El tamaño de la pieza. Espesor, longitud.
5. El Material del Molde

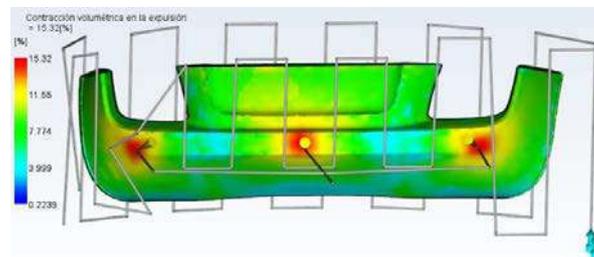


Figura 37 Resultados Contracción Volumétrica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los análisis y datos obtenidos entendemos que se podrían tener mejores resultados, al desarrollar un sistema de refrigeración más eficaz, que permitan reducir el tiempo de ciclo total del proceso de inyección. Esto haciendo que las diferencias de temperatura puedan ser menores a los 15 C obtenidos en este informe.

En nuestro caso, se analizó con agua pura y notamos como el tiempo de refrigeración total, poco mejoraba, se reducía menos de un segundo, aumentando el número de canales y reduciendo la temperatura del agua, en consecuencia en desarrollos futuros se puede intentar desarrollar un sistema de refrigeración con refrigerantes de tipo industrial.

4. CONCLUSIONES

- Se ejecutó la simulación por elementos finitos del proceso de inyección de un parachoques en automoción, que permitió encontrar los parámetros óptimos de la inyección de la pieza escogida, con tres inyectores en una cámara caliente, y estudiar así el comportamiento de diferentes materiales poliméricos, en el interior de la cavidad del molde, logrando obtener datos que sirven para comparar los valores obtenidos en la simulación, con el proceso real de fabricación, para la contracción y los defectos que conllevan a la deformación de la pieza.
- El Material Daplen EE 112AE, al ser un compuesto de polipropileno cargado con cargas de mineral al 13 %, creado especialmente para la industria del automóvil, por la empresa Borealis Europe. Tiene grandes propiedades de resistencia al impacto y los resultados obtenidos en la simulación, demuestran que se obtienen grandes resultados de calidad.

- La máxima deformación, en la configuración escogida como optima se da en los extremos de la pieza. En el resto de la pieza la deformación es mínima y variable.
- La utilización de nuevas tecnologías en materiales aportan a la disminución de contaminación ambiental en el campo de la manufactura automotriz.

REFERENCIAS

- [1] Análisis de variables geométricas del parachoques en la protección de peatones D. Gallegos XVIII congreso nacional de ingeniería Mecánica
- [2] María Eliza Alanís Rodríguez, 2014, Implementación de APQP y PPAP en Área de Inyección. Universidad Tecnológica de Querétaro.
- [3] Miguel Angel Samaniego Lema,(2014). Evaluación de Contaminación de Insecticida en la Planta de la Empresa Industrial y Comercial Trilex C.A. Universidad de Guayaquil, Ecuador
- [4] Felix Miessen, Automotive And Transport European Plastics Converters
- [5] Marcial Castro, 2014, Historia del Parachoques Inpenor Gabinete de Ingeniería y Peritaje de Nordeste, Coruña.
- [6] Miguel Ángel Escobar Guachambala,(2013), Diseño y construcción de Un Molde Para Inyección De Un Casco Decorativo de Plástico, Utilizando Ingeniería CAD/Cam, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba Ecuador.
- [7] Jon Jauregui Cano (2018) Modelado Mecanico Y Estudio De Inyección de un Dron Multirrotoir Mediante Elementos Finitos. Universidad del Pais Vasco, Bilbao.
- [8] David Juarez 2012Estudios y análisis del moldeo por inyección de materiales Poliméricos termoplásticos, Revista de investigación 3 Ciencias. Análisis de variables geométricas del parachoques en la protección de peatones D. Gallegos XVIII congreso nacional de ingeniería Mecánica
- [9] JAIME SÁNCHEZ LEDESMA (2001), METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO DE COLADA cámara , Instituto Tecnológico y De Estudios Superiores de Monterey, México.
- [10]María Concepción Pérez (2000). Carrocería Y Pintura. Centro Zaragoza, Instituto de Investigación sobre Vehículos S.A.
- [11]Julian Fabra, Maria Amparo (2014) TFG caracterización de Polipropilenos Técnicos Modificados con Talco Para Su Uso en Parachoques. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España
- [12]Laura A. Fasce (2012)COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE POLIPROPILENO MODIFICADO CON UNA POLIOLEFINA ELASTOMÉRICA , Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales INTEMA Universidad Nacional de Mar del Plata – CONICET, Argentina.

Evaluación del consumo de combustible, torque y potencia al aplicar la conducción ecológica en la ciudad de Quito.

(Evaluation of fuel consumption, torque and power when applying ecological driving in the city of Quito.)

J. Leguisamo*⁽¹⁾, A. Remache⁽¹⁾, J. Pérez⁽²⁾

(1) Departamento de Ingeniería Automotriz, Facultad de Arquitectura, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.

(2) Departamento de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

*Correspondencia. Tel.: 0992742310, E-mail: julio.leguisamo@uisek.edu.ec (J. Leguisamo)

RESUMEN

El sector del transporte es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero. La conducción ecológica ha buscado ser una eficiente técnica de conducción para reducir el consumo de combustible. Específicamente, este trabajo investiga, la variación en diferentes parámetros tales como potencia, torque y consumo de combustible entre dos modos de conducción. Siendo el primero la conducción normal o convencional con respecto al Eco Driving. Esta investigación se ha llevado a cabo en una ruta específica mixta entre Supermaxi de Cumbayá, Av Interoceánica S/N y la Universidad Católica de Quito en la 6 de diciembre y Jorge Washington. Esta investigación concluye que la conducción ecológica reduce el consumo de combustible y mantiene una amplitud de variación para torque y potencia más elevada. El tener un torque más elevado y una potencia más elevada incurre en un consumo mayor de combustible. Se ha obtenido que se puede ahorrar aproximadamente \$400.00 por año siempre y cuando se tome como referencia una conducción de 20 000 km por año. Por lo tanto, sería recomendable establecer las políticas de conducción ecológica y sobre todo realizar pruebas a largo plazo para confirmar lo encontrado en esta investigación.

Palabras clave: Eco Driving, potencia, torque, consumo de combustible.

ABSTRACT

The vehicle transport is one of the largest emitters of greenhouse gases. Ecological driving has been told to be an efficient driving technique to reduce fuel consumption. Specifically, this experiment investigates the variation in different parameters such as power, torque and fuel consumption between two driving modes. The first is known as normal or conventional driving and it will be compared to Eco Driving. This investigation has been carried out in a specific mixed route between Supermaxi of Cumbayá, Av Interoceánica and Universidad Católica de Quito on av. 6 de Diciembre and Jorge Washigton. This research concludes that ecological driving reduces fuel consumption and maintains a range of variation for higher torque and power and that more power and more torque represent a more fuel consumption. The approximate of saving obtained on this research is \$400.00 per year if your vehicle runs an average of 20 000 km per year. Therefore, it would be advisable to establish ecological driving policies and, above all, to carry out long-term tests to confirm what was found in this investigation.

Key words: Eco Driving, torque, power, fuel consumption

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo excesivo de recursos energéticos plantean un problema global en términos de Tanto sus causas como sus consecuencias (1). El sector del transporte es uno de los más grandes. Emisores de GEI (2), a pesar de los avances en el campo de la tecnología de motores y las mejoras en la calidad de combustible. Este sector representó el 25,6% del consumo mundial de energía en 2015. Se espera que aumente un 1,1% cada año hasta 2040 (3). Las autoridades públicas tienen diferentes maneras de lograr objetivos ambientales: promover cambios sociales en Patrones de movilidad para lograr un mayor uso de modos más limpios, mejorando la tecnología del vehículo y el combustible (4), reduciendo el número de viajes motorizados a través de

la gestión de la demanda (5), y utilizando Tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para mejorar la eficiencia del transporte (6).

La investigación automotriz realizada en la UE ha identificado el potencial de los estilos de conducción para reducir Consumo y emisiones de CO₂ (7). También destaca la necesidad de proporcionar datos en tiempo real para utilizar las Infraestructuras de la manera más eficiente posible. Hay muchos dispositivos y tecnologías disponibles para planificar los viajes. Pero cuyo potencial aún no se ha cuantificado para permitir un uso más eficiente de las infraestructuras de transporte (Incluyendo la conducción). En este contexto, la conducción eficiente dirigida a reducir el consumo de combustible al modificar el comportamiento del conductor ha aumentado En importancia desde los años noventa. Sin embargo, esta definición simple incluye muchos conceptos y acciones estratégicas, Dependiendo del nivel de decisión considerado (8,20).

El mayor potencial para las políticas de conducción ecológica parece estar en áreas donde los niveles de tráfico no son muy altos y que factores geográficos como altura o inclinaciones lo afecten, y sin embargo, la mayoría de los estudios han analizado el impacto de la conducción ecológica en las grandes ciudades que sufren problemas crónicos de congestión. (9)

No obstante, parámetros del motor como el torque y la potencia son dos indicadores del funcionamiento del motor, nos dicen qué tanta fuerza puede producir y con qué rapidez puede trabajar (18). El torque es la fuerza que producen los cuerpos en rotación, A revoluciones muy bajas, la fuerza de combustión de la explosión todavía es débil y, por lo tanto, el torque es bajo. En todo caso, cuando el conductor acelera, entrega más combustible al motor haciendo que aumente la presión de combustión, la velocidad de giro y, por tanto, también el torque (10,18)

Actualmente el ritmo de vida que lleva la gente hace que conduzca de una forma más apresurada sin pensar en el consumo de combustible y el medio ambiente. Actualmente el 90% de los conductores desperdician más del 40% del combustible lo que supone un importante gasto energético (10,17,19). El eco driving es una nueva manera de conducir, enfocada en lograr una manera de economizar combustible y conducción segura, aprovechando al máximo las tecnologías actuales de los vehículos, así logrando los siguientes beneficios de ahorro del 15% de combustible, disminución global de la contaminación ambiental, reducción del 15% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, disminución de la contaminación acústica, aumento del confort en el vehículo, disminución del riesgo de accidentes, reducción del estrés del conductor y ahorro en costos de mantenimiento de nuestro auto.(12,15)

Actualmente, los combustibles en el Ecuador han aumentado de precio. El Extra ha pasado de \$1.45 a \$1.85 por galón y el precio del Súper se ha liberado teniendo un precio de venta en las gasolineras del estado ecuatoriano de \$2.98 cuando antes este estaba en \$2.26. Este aumento ha preocupado a los ciudadanos y cualquier método de ahorro de combustible siempre será aceptado. Por estas razones el objetivo de esta investigación es la del análisis del consumo de combustible, torque y potencia utilizando dos métodos diferentes de conducción (normal y Eco Driving) para identificar las diferencias y posibles beneficios de aplicar uno u otro método de conducción. (16)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Vehículo de Pruebas

En las pruebas se ha utilizado combustible Extra, de la estación de combustible MasGas a un precio de \$1.85 / galón. Para estas pruebas se ha utilizado un vehículo Ford Escape Modelo S, versión 4x2 de origen España. A continuación, se presenta una ficha técnica del vehículo utilizado ver Fig. (1).

2.2. Software de registro de datos

Se utilizó el software de diagnóstico “OBD FUSION” que es un app para iPhone, iPad, iPod Touch y Android que permite la lectura de datos de diagnóstico del vehículo. Adicional, permite registrar parámetros deseados y exportarlos vía archivo CSV , en la Fig. (2) se observa las diferentes opciones que permite el software. La dirección web de descarga en AppStore es <https://itunes.apple.com> y para android en <https://play.google.com> la aplicación OBD FUSIÓN.



MOTOR	
Tipo	2.5L I4 iVCT DOHC 4V
Potencia máxima	168 HP @ 6000 RPM
Torque máximo	170 Lb - ft (230 N-m) @ 4500 RPM.
TRANSMISIÓN	
Tipo	Automática 6 vel. (6f35) - Select Shift (sst).
NEUMÁTICOS Y RINES	
Neumáticos	P235 / 55 - R1799 V
Ruedas	Rueda Aluminio 17" x 7.5"
SISTEMA DE DIRECCIÓN	
Tipo	Electrónica - Asistida (Rack & Pinion) EPAS
Relación	15.2:1
SISTEMA DE FRENS	
Tipo	Sistema Anti - Bloqueante en 04 ruedas (4 Wheels ABS)
Delanteros	De Potencia / Discos
Traseros	De Potencia / Discos

Figura 1. Captura pantalla de ficha técnica Ford Escape 2015 (13).



Figura 2. Funciones disponibles en OBD Fusion (14).

Para más información del software, ingresar a:
<https://www.obdsoftware.net/software/obdfusion>

2.3. Escáner OBD2

A nivel de hardware se ha utilizado un escáner Bluetooth OBD2 Universal característico por tener un chip ELM327. Se recomienda que si se va a utilizar dispositivos con iOS se adquiera un escáner de Wifi en lugar de uno Bluetooth debido a las limitaciones que tiene iOS respecto a las conexiones Bluetooth. Este es un dispositivo con un chip que permite la lectura de los protocolos OBD2 de prácticamente todos los vehículos con esta tecnología. El dispositivo adquirido se presenta a continuación ver fig. (3)



Figura 3. Escáner OBD2 Bluetooth utilizado (Autor Propio).

Como interfaz en este caso se ha utilizado un celular Android Samsung J6+ para registrar las pruebas en conjunto con el escáner y la aplicación móvil. Son muy pocos los celulares que no son compatibles con este tipo de interfaz. Se recomienda un Android 8.1 o mayor y para iOS, iOS 9 o mayor.

2.4. Ruta de prueba

Se ha seleccionado una ruta en la ciudad de Quito que comprende un ciclo combinado con una ruta que inicia en el Supermaxi de Cumbayá para después continuar por la Av. Interoceánica hasta el redondel del Ciclista, de ahí conducir hasta la -Av De Los Shyris y girar a la izquierda para conducir en sentido norte-sur por dicha avenida. Se sigue el recorrido por la Av. 6 de Diciembre, Orellana, 12 de Octubre donde finaliza el recorrido en la intersección con la calle Jorge Washington, frente a la Universidad Católica, con un recorrido total de 18,09 km. El recorrido se lo puede observar el fig. (4).

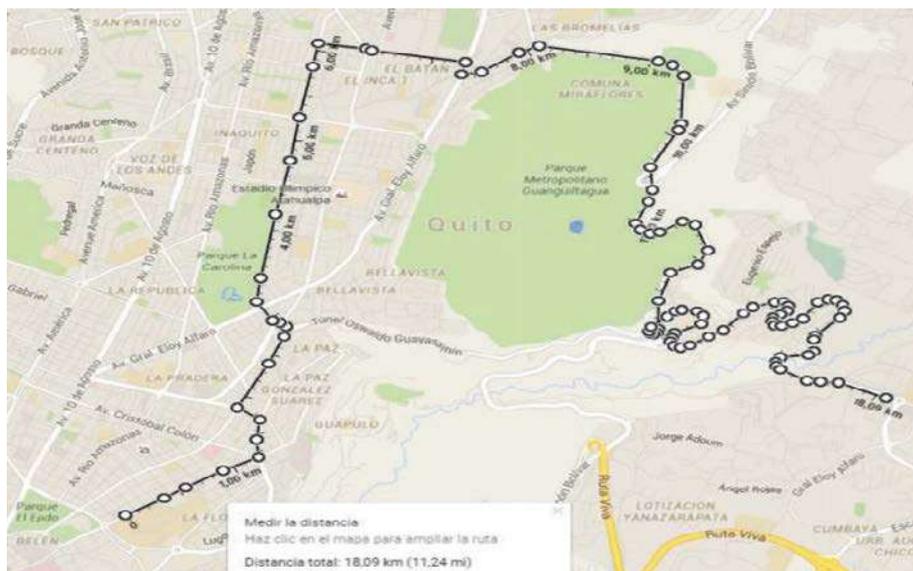


Figura 4. Mapa de Ruta de Pruebas (21).

Una vez definidos todos los equipos y ruta a utilizar, se procede a determinar los parámetros de conducción de la prueba. Se realiza dos métodos de conducción diferentes para realizar un análisis comparativo. Se utiliza el método llamado conducción normal donde es el típico hábito del conductor que se pone a prueba. En la ciudad de Quito, hemos podido identificar entre los factores típicos de conducción normal : aceleraciones rápidas y con acelerador a fondo, cambio de marchas a altas revoluciones (sobre los 3000 rpm), frenado bruscos y pocas veces con freno de motor, uso de aire acondicionado o ventanas abiertas, acelerar en bajadas, frenos bruscos antes de curvas, aceleraciones bruscas en caso de subida prolongada y cambio de carril constante con aceleraciones

Con estos parámetros considerados para ser aplicados al momento de la prueba se revisa los parámetros de la conducción Ecodriving a utilizarse que son: aceleraciones suaves sin presionar pedal a fondo, cambio de marchas prioritario entre 2 000 y 2 500 [rpm], aprovechar la gravedad e inercia del vehículo en caso de bajadas para no pisar el acelerador, priorizar el frenado del vehículo con freno de motor, no utilizar aire acondicionado ni tener las ventanillas abajo, no realizar frenados ni aceleraciones bruscas, mantener una velocidad constante (80 km/h en zona perimetral, 45 km/h en zona urbana), intentar siempre colocar la mayor marcha posible (Sexta en el Ford Escape)

Tomando en cuenta estas consideraciones para el proceso de pruebas. Se inicia el dispositivo en el lugar y se procede a realizar 4 pruebas con conducción normal y 4 pruebas con conducción Eco Driving. Utilizando la app se registran los siguientes parámetros con unidades del sistema internacional de consumo de combustible en litros [l], torque del motor en Newtons por metro [N.m] y potencia del Motor en Pferdestärke [PS].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

Para el resumen de estadística descriptiva se toma en cuenta absolutamente todos los datos de las pruebas de inicio a fin sin importar los valores de 0 ni la duración de cada prueba. Se realiza inicialmente un análisis estadístico utilizando el análisis de valores de Excel. Para esto se toman todos los valores de las pruebas realizadas, sin importar su número y se realiza el resumen estadístico. A continuación, se presenta el resumen de la conducción normal.

Tabla 1. Resumen estadístico de Conducción Normal

	TRIP FUEL (l)	ENGINE POWER (PS)	ENGINE TORQUE (N.m)
<i>Mean</i>	2,504	19,043	64.652
<i>Standard Error</i>	0,014	0,169	0,425
<i>Median</i>	2,509	9,242	46,280
<i>Mode</i>	1,413	4,710	79,377
<i>Standard Deviation</i>	1,464	17,319	43,411
<i>Sample Variance</i>	2,144	299, 963	1884,512
<i>Kurtosis</i>	-1,154	0,363	-1,406
<i>Skewness</i>	-0,108	1,101	0,450
<i>Range</i>	4,857	93,315	218,055
<i>Minimum</i>	0,000	0,000	0,000
<i>Maximum</i>	4,857	93 315 199	218 055
<i>Sum</i>	26 187,475	134,963	676 071.055
<i>Count</i>	1 0457	1 0457	10 457

En conjunto, se realiza un resumen estadístico de conducción Eco Driving.

Tabla 2. Resumen estadístico de Conducción Eco Driving

	TRIP FUEL (l)	ENGINE POWER (PS)	ENGINE TORQUE (N.m)
<i>Mean</i>	1,930	17,611	64, 232
<i>Standard Error</i>	0,011	0,144	0,429
<i>Median</i>	2,162	9,739	46,509
<i>Mode</i>	1,317	4,903	120,324
<i>Standard Deviation</i>	1,118	14,539	43,420
<i>Sample Variance</i>	1,250	211, 395	1885,328
<i>Kurtosis</i>	-1,108	-0,212	-1.400
<i>Skewness</i>	-0,231	0,895	0,448
<i>Range</i>	3,767	71,235	179,202
<i>Minimum</i>	0,000	0.000	0.000
<i>Maximum</i>	3,767 19	71 235	179 202
<i>Sum</i>	810,482	180756.417	659275.338
<i>Count</i>	10 264	10 264	10 264

Una vez completos los resultados estadísticos se realiza un análisis gráfico donde se compara el consumo de combustible, la potencia y el torque. Para el análisis gráfico se filtran los datos de las pruebas inicialmente. Se toma para esto como referencia el valor mínimo de tiempo de cada prueba, y se ajusta el resto de los valores a este dato. Esto se hace ya que existen pruebas que duraran más o menos tiempo y para poder realizar el análisis gráfico de promedios se debe igualar el número de datos obtenido. Los resultados se presentan a continuación, Fig. (5, 6, 7).

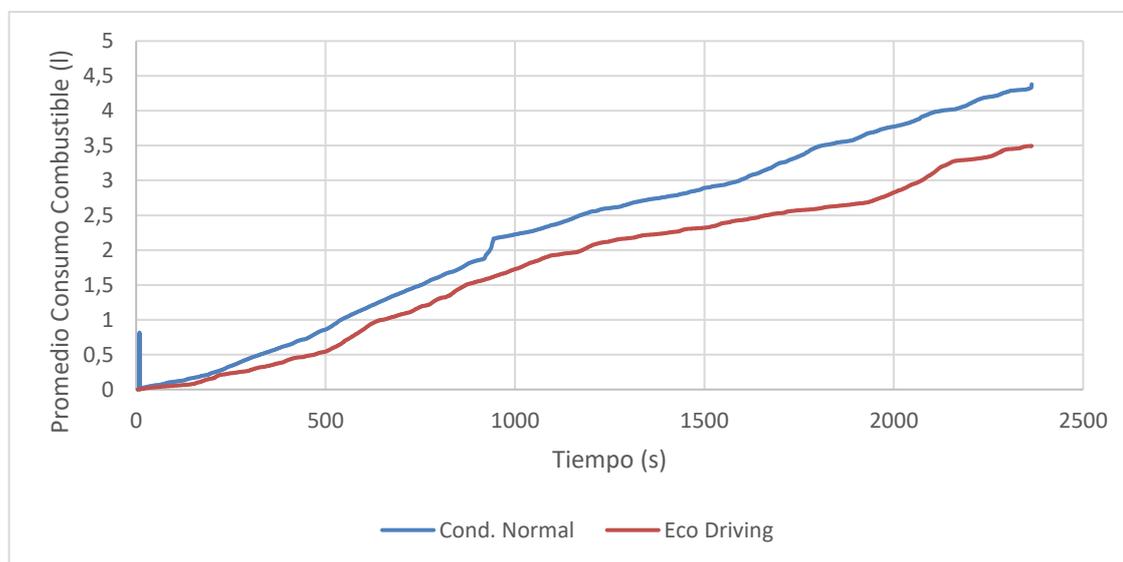


Figura 5. Comparativa gráfica del consumo promedio de combustible en litros en función del tiempo en segundos para la conducción normal y la conducción eco driving.

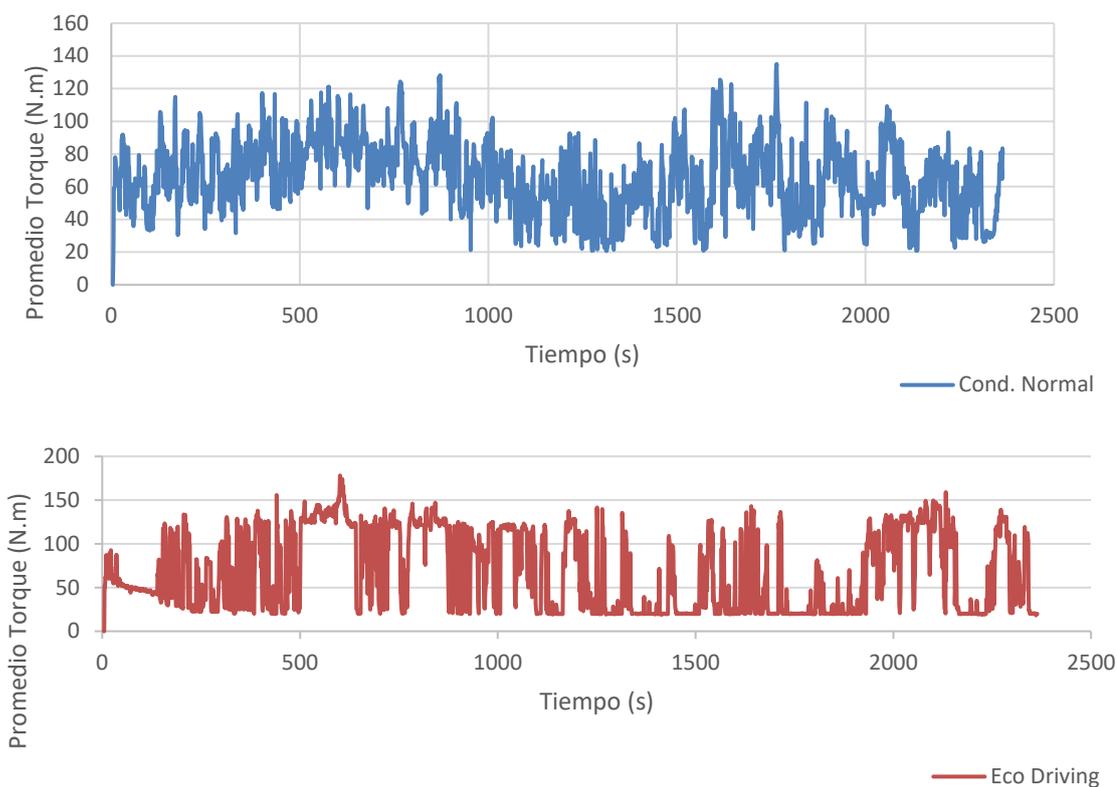


Figura 6. Torque en función del tiempo para Conducción Normal y Conducción Eco Driving.

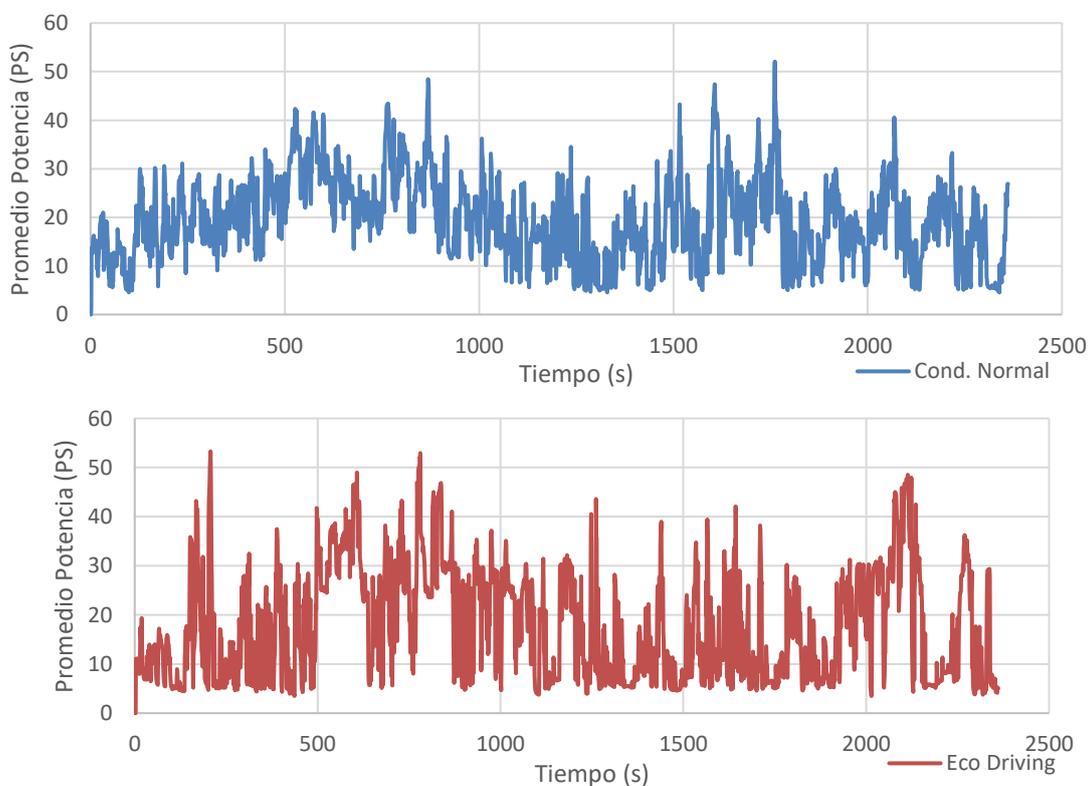


Figura 7. Potencia en función del tiempo en segundos para Conducción Normal y Conducción Eco Driving.

3.2 Discusión de resultados

Revisando los resultados estadísticos se ha obtenido resultados curiosos y satisfactorios. A nivel del consumo de combustible que se puede observar en la tabla 3.

Tabla 2. Consumo de combustible en ruta

Modo de Conducción	Prueba 1 (l)	Prueba 2 (l)	Prueba 3 (l)	Prueba 4 (l)	Promedio (l)
<i>Normal</i>	4,843	4,857	4,275	4,521	4,624
<i>Ecodriving</i>	3,767	3,735	3,765	3,702	3,742

Para la conducción normal, se obtiene un promedio general de 2,504 [l] de combustible consumido. No se observa una tendencia central de los datos lo que indica un proceso que no es uniforme, sino que tiene tendencia a acumular datos del lado izquierdo de la curva de distribución con una curtosis de -1,154. La desviación estándar es de 1,464 siendo este un valor que se puede considerar como alto. Se ha obtenido finalmente un valor máximo de consumo de combustible de 4,857 [l]. En resumen, un promedio de consumo máximo con conducción normal es de 4,624 [l]. Por su parte, la conducción Eco Driving arroja valores menores con un promedio general de consumo de 1,930 [l] de combustible siendo este valor 0,574 menor al de conducción normal. De igual manera, la desviación estándar es 1,118 siendo un valor menor de desviación en el proceso. Sin embargo, la curtosis se mantiene con un número negativo de -1,108 y el coeficiente de asimetría de -0,231 indicando una tendencia o cola de datos en la parte izquierda de la distribución. La tendencia de los datos se puede explicar por la mayor velocidad que se alcanza en la primera sección de la ruta que involucra la av. Simón Bolívar y la Interoceánica. En este caso, el consumo máximo es de 3,767 [l], siendo este valor 1,09 [l] menos que el valor máximo en conducción normal. Al final del recorrido se ha obtenido un resultado promedio de máximos de 3,742 [l]. Este valor es 0,882 l menos que el obtenido por conducción normal.

Por otra parte, analizando ahora el torque obtenido, se observa que se obtiene un promedio de todos los datos para conducción normal se obtiene un torque de 64,652 [N.m], mientras que para conducción Eco Driving se obtiene un torque de 64,232 [N.m], dando así una diferencia baja de 0,42 [N.m]. Esto indica que no existe mayor diferencia entre el torque promedio aplicado en Eco Diving y en conducción normal. Esto se confirma con las desviaciones estándar similares que tienen los dos métodos de conducción, con 43.420 de desviación estándar para el Eco Driving y 43,411 para la conducción normal. Estos siendo valores muy altos que explican la gran variación del proceso. Ambos resultados tienen un coeficiente de asimetría positivo, indicando que los datos tienen hacia la derecha de la distribución central en la misma proporción. Para el caso del Eco Driving se ha obtenido un valor máximo de torque de 179,202 [N.m], mientras que para la conducción normal fue de 218,055 [N.m]. En este caso, la conducción normal obtuvo 38,853 [N.m] más que la Eco Driving. Esto se explica debido a que la conducción normal que permite aumentar más las revoluciones y aceleraciones bruscas que generar resultados de torque más elevado.

Considerando ahora el torque, se puede observar que para la conducción normal se tiene una acumulación de datos entre 40 y 80 [N.m]. la mayoría de datos oscilan entre estos valores dando una señal de oscilación constante sin bajar al mínimo de la tabla. Es así que el torque se mantiene alto debido a los cambios en altas revoluciones y aceleraciones bruscas de ser necesario. Por otro lado, en la conducción Eco Driving el torque tiene oscilaciones más pronunciadas y esta vez se mantiene una tendencia de variación entre 140 y 20 [N.m]. Estos valores en conjunto son más elevados para el Eco Driving seguramente por el uso del freno motor que eleva las revoluciones y el mantener constantes las revoluciones entre 2 000 y 2 500 rpm provoca que se transmita más torque por el motor para mantener la velocidad constante entre subir y bajar marchas entre estas revoluciones, mientras que en el caso de conducción normal con un solo pico de torque se llega a la aceleración deseada y este se deja de aplicar.

Adicionalmente, la potencia en conducción normal ha obtenido un promedio general de 19,043 [PS], mientras que la Eco Driving obtuvo un valor de 17,611 [PS]. Al igual que con el torque, las desviaciones estándar son similares y no varía por más de 0,5 por lo que los procesos obtienen valores similares obteniendo un coeficiente de asimetría en los dos casos positivos mostrando una tendencia de acumulación de valores a la derecha de la tendencia. En este caso, para la conducción normal se registró un valor máximo de 93,315 [PS] mientras que la conducción Eco Driving

obtuvo un valor 22,08 [PS] menos. Esto confirma igual el método de conducción donde no se acelera mucho y se cambia de marchas entre 2 000 y 2 500 [rpm]. A nivel estadístico se observa una tendencia de disminución de valores en combustible, torque y potencia para la conducción Eco Driving vs la conducción normal. Por otro lado, a nivel gráfico donde se analiza el comportamiento de los promedios a lo largo del tiempo se observa para el consumo de combustible una disminución de consumo gracias a la conducción Eco Driving. Si bien el comportamiento de las dos curvas es lineal y ascendente, estas lucen prácticamente paralelas manteniéndose siempre el consumo de combustible en Eco Driving menor al de conducción normal.

Para el caso de la potencia, se tiene un comportamiento similar al del torque. Los valores en la conducción normal tienen menos variación vertical reagrupándose gráficamente entre 10 y 30 [PS] y se observan ciertos picos, señal de aceleraciones bruscas donde se requirió mayor potencia. En el caso del Eco Driving, estos valores tienen más variación vertical mostrando que gráficamente la potencia varía más en EcoDriving reagrupándose entre valores mínimos y máximos, con flujos más cortos y picos largos, seguidos y de corta duración. Se puede decir que para la conducción normal se tiene un comportamiento más homogéneo mientras que para el Eco Driving este varía con una amplitud mayor.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, para el consumo de combustible se puede decir que existe un ahorro máximo de 0,882 [l] en el caso de mayor consumo y un promedio de ahorro de 0,574 [l] entre todas las pruebas realizadas. Considerando que el vehículo tiene una capacidad de combustible de 57 [l] se puede alcanzar un ahorro de 13 litros para la comparación entre promedios totales de las pruebas y hasta 11 litros considerando la comparación entre promedios máximos. Transformando esto a costo, la conducción Eco Driving puede generar un ahorro en el primer caso de \$6,35 por tanque lleno y en el segundo caso \$5,38 por tanque lleno. Cabe recalcar que estos valores se obtienen consumiendo completamente el tanque y llenándolo nuevamente a tope, cosa que no sucede. Por ello el ahorro es proporcional al nivel de combustible. Analizando los promedios máximos de consumo, el costo de recorrido que se realizó al utilizar el método de conducción normal sería de \$2,26 y con conducción Eco Driving de \$1,83. Siendo en conclusión un ahorro de \$0,43 en 18 kilómetros de la ruta, lo que se traduce en un ahorro de \$0,02 por kilómetro. Ahora si comparamos un uso normal de conducción en Ecuador donde un vehículo recorre aproximadamente 20 000 km al año, esto representaría un ahorro de combustible de \$400,00 al año.

Al parecer, la alta potencia y alto torque provocado por las aceleraciones bruscas, cambios de carriles y variación en la velocidad provocan un mayor consumo de combustible. El tener fluctuaciones de mayor amplitud en el caso del Eco Driving genera que el consumo de combustible sea menor. Mientras que si se tiene menor variación de amplitud con una concentración de valores en un rango específico este genera mayor consumo como es el caso de la conducción normal. Se registran valores máximos mayores en el caso de la conducción normal tanto para el torque como la potencia. Esto debido a la posibilidad de aceleraciones y frenados bruscos. Es muy probable que los picos en la conducción Eco Driving se deba a la influencia del modo Sport de la caja de cambios del vehículo Ford Escape, que al utilizarlo en modo secuencial para poder mantener el cambio de marchas entre las revoluciones indicadas por el Eco Driving las pruebas se vieron obligadas a utilizarse en este modo.

REFERENCIAS

1. Coloma, J.F., García, M., y Wang, Y. 2018. Eco-Driving Effects Depending On the Travelled Road. Correlation between Fuel Consumption parameters. *Transportation research procedia.*, 33: 29-266
2. Emberger, G, 2015. Low carbon transport strategy in Europe—A critical review. *Int. J. Sustain. Transp.* doi:10.1080/15568318.2015.1106246.
3. Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook; (No. DOE/EIA-0484(2017)); DOE: Washington, DC, USA, 2017. Available online: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (accessed on 30 November 2017).
4. Bottiglione, F.; Contursi, T.; Gentile, A.; Mantriota, G. 2014. The fuel economy of hybrid buses: The role of ancillaries in real urban driving. *Energies*, 7: 4202–4220.

5. Betella, A.; Verschure, P. F. 2016. The affective slider: A digital self-assessment scale for the measurement of human emotions. *PloS one*. 11 Suppl 2: 1-11. DOI:10.1371/journal.pone.0148037
6. Dirección General de Tráfico (DGT). 2016. Censo conductores 2016. Available online: http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-eindicadores/censo-conductores/tablas-estadisticas/2016/censo_2016_anuario.xlsx (accessed on 1 December 2017). Dirección General de Tráfico (DGT), 2016b. Parque de Vehículos por provincias. 2016.
7. Fiat Eco-Drive. 2010. Eco-Driving Uncovered—The Benefit and Challenges of Eco-Driving, Based on the First Study Using Real Journey Data. 2010. Available online: www.fiat.com/ecodrive (accessed on 14 December 2017).
8. Michael Sivak, Brandon Shoettle. 2012. A Note: The Changing Gender Demographics of U.S. Drivers. *Traffic Injury Prevention* 13 Suppl 6:575-576
9. McIlroy, Rich. and Neville, Stanton. 2016. What Do People know about Eco-Driving. *Ergonomics*, 60 :. 754–69.
10. Vera, E. (14 de Septiembre de 2018). El Universo. Obtenido de: <http://www.eluniverso.com/>
11. Ferreyra, G. (16 de Junio de 2009). *autocosmo.com*. Obtenido de <https://noticias.autocosmos.com.mx/2009/06/16/sabes-que-es-la-eco---conduccion>
12. Michelle Rutty, Lindsay Matthews, Daniel Scott & Tania Del Matto. 2014. Using vehicle monitoring technology and eco-driver training to reduce fuel use and emissions in tourism: a ski resort case study, *Journal of Sustainable Tourism*, 22 Suppl 5: 787-800, DOI: 10.1080/09669582.2013.855221
13. Ford Escape. 2019. Obtenido el 2 febrero 2019 Obtenido de <http://www.quitomotors.com.ec/escape-especificaciones.php>
14. Telegrafo, E. (16 de Septiembre de 2018). Automovil Club del Ecuador "ANETA". Obtenido de <http://www.aneta.org.ec/wordpress/en-quito-los-vehiculos-son-los-que-mas-contaminan-el-aire/>
15. Dossier. (17 de Julio de 1999). DAPHINIA. Obtenido de <http://istas.net/descargas/daphnia17.pdf>
16. Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía (IDAE). 2011. Plan de Acción de Ahorro
17. Kobayashi, I.; Tsubota, Y.; Kawashima, H. Eco-driving simulation: Evaluation of eco-driving within a network using traffic simulation. *Urban Transp.* XIII 2007, doi:10.2495/UT070701.
18. Rueda, J. 2018. Torque y Potencia Obtenido de: <http://juanruedaconinternational.com/content/torque-y-potencia>
19. Vera, E. (14 de Septiembre de 2018). El Universo. Obtenido de: <http://www.eluniverso.com/>
20. Ahn, K.; Rakha, H., 2008. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transp. Res. Part D*. 13: 151–167.
21. Google, *Google maps*. actualizada el martes 16 de octubre del 2018, acceso martes 16 de octubre del 2018, Disponible en: <http://www.google.com/maps/search/supermaxi+cumbaya,+Quito/@-0.2030964,-784363157,16z/data3m14b1>

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE SEGURIDAD EN VEHÍCULOS M1 AL UTILIZAR ANCLAJES ISOFIX

Reyes, Gorky¹; Iñiguez, Juan²; Antamba, Jaime³; Cañizares, Carlos³

1. Facultad Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador

2. Facultad Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador

3. Facultad Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador

4. Facultad Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador
gureyesca@uide.edu.ec

RESUMEN

El uso de las sillas para niños en vehículos con anclajes Isofix ayudan a mejorar la seguridad en el caso de un impacto al vehículo, es por ello que en el presente estudio se analizaron varios parámetros realizando pruebas de laboratorio para demostrar la eficacia y seguridad que brindan la silla correctamente colocada en un vehículo. Para las evaluaciones se utilizó una prueba de trineo considerando 2 tipos de severidades de accidentes, para este caso se tomó un impacto frontal a 31Km/h. Los valores obtenidos de las muestras Q1 y Q3, se observa que el 29% de los maniquies Q3 están con valores positivos de supervivencia de HIC, y poseen un 17% de riesgo AIS. Al observar las muestras de los maniquies Q1, se observa valores alentadores, ya que el 56% están por debajo de lo que determina el HIC, como valores de supervivencia de un 70%, estos valores bajo un entorno de infantes menores o iguales a 75cm.

Palabras clave: Isofix, AIS, pruebas de impacto, HIC.

ABSTRACT

The use of child seats in vehicles with Isofix anchorages helps to improve safety in the event of an impact on the vehicle, which is why in the present study several parameters were analyzed by performing laboratory tests to demonstrate the effectiveness and security that provide the chair correctly placed in a vehicle. For the evaluations a sledge test was used considering 2 types of accident severity, for this case a frontal impact was taken at 31 km / h. The values obtained from the samples Q1 and Q3, it is observed that 29% of the Q3 manikins are with positive survival values of HIC, and have a 17% risk of AIS. When observing the samples of the manikins Q1, encouraging values are observed, since 56% are below what determines the HIC, as survival values of 70%, these values under an environment of infants less than or equal to 75cm.

Keywords: Isofix, AIS, impact tests, HIC.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel nacional se comercializan vehículos los cuales son importados de varias procedencias es por ello que los fabricantes de las distintas marcas emplean normativas propias de su país, estas implican en la seguridad vehicular donde muchos de los vehículos no cumplen con las exigencias de normativas internacionales al momento de un impacto causando accidentes, daños y la muerte.

Muchas de estas normativas solo piensan en el conductor y en el acompañante delantero, y no en las personas que van en la parte posterior, generalmente en esta parte del vehículo los ocupantes son niños, por lo que los usuarios deberían colocarles de una forma adecuada en el asiento ya sea con su cinturón o con su silla, por su seguridad, lamentablemente los vehículos que se venden a nivel nacional no cumplen con exigencias de normativas internacionales, en las normativas nacionales se menciona solo el uso del cinturón de seguridad y no el uso de elementos que favorezcan a la seguridad de los niños principalmente y no es más por el tema económico sino por la seguridad al momento de un impacto. Aproximadamente los vehículos importados que poseen anclajes Isofix que son evaluados en la Latin-ncap representa un porcentaje del 44% en el mercado nacional (AEADE).

Las nuevas tecnologías en el mundo han avanzado exponencialmente, es por ello que los vehículos han mejorado con nuevos sistemas y subsistemas de seguridad activa y pasiva, para este estudio se tomó en cuenta sistemas de seguridad pasiva el cual estará enfocado en los cinturones de la parte posterior de vehículos y en los puntos de anclaje de los asientos posteriores, para el análisis de estos elementos existen programas de seguridad para automóviles como es el Latin ncap, Euro ncap, entre otros para la investigación se tomó como referencia a estos dos programas que realizan pruebas de impacto en automóviles, para estandarizar y normar estos elementos de seguridad. En la actualidad se realizan pruebas de seguridad enfocadas más en los asientos delanteros, se puede mencionar que valoran más la seguridad en dicha parte del vehículo, y no se preocupan de la parte posterior, teniendo en consideración que los ocupantes en los asientos traseros en la mayoría de los caso son niños, estos elementos deben cumplir con normativas internacionales al momento de un impacto. A nivel nacional existe la INEN 034 que estas son elementos mínimos de seguridad, la INEN 034 garantiza que los vehículos que ingresan al país tengan elementos de seguridad tanto activa como pasiva.

El anclaje Isofix, es un sistema de sujeción estandarizado, internacionalmente para asientos de retención infantil en vehículos que en caso de colisión, el niño cuenta con una mayor protección gracias a la firme sujeción [1]. A nivel nacional en la categoría de vehículos deportivos utilitarios SUV y M1 como son; el Chevrolet Grand Vitara SZ, Hyundai Tucson y el Chevrolet Aveo, estos vehículos cuentan con dos anclajes Isofix en los asientos posteriores.[4]

Existen también vehículos que no constan con este tipo de anclajes porque sucede que en los vehículos N1 (camionetas) todavía no rige la obligatoriedad de estos anclajes, por tratarse de

modelo destinados al trabajo y no al transporte familiar [2], también en vehículos deportivos porque son vehículos para transportar en mucho de los casos un máximo de dos personas y en otros que su espacio es muy reducido [15].

Se realizaron pruebas de impacto en vehículos en un laboratorio normado cumpliendo criterios de seguridad internacional y normativas internacionales como es la ECE 044/04, para después realizar una comparativa general de los vehículos. Como en el país existe la norma INEN 034 (E.M.S) que menciona que los vehículos que consten con un solo anclaje pueden ser comercializados sin ningún inconveniente este tipo de ley no nombra a los ocupantes posteriores generando una controversia en la seguridad en este tipo de acompañantes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de protección para niños pasajeros en la Union Europea deben cumplir con la normativa ECE 44 , esto implica que vehículos que ingresan a latinoamerica cumplan con dicha normativa, con el objetivo de garantizar el buen nivel de seguridad. Esta prueba consiste en generar un impacto frontal en el que las mediciones físicas o impacto a los maniquies no excedan los límites especificados por la norma, los puntos de evaluación serán cinemáticos determinando la desaceleración del maniquí donde su punto importante es la cabeza, el análisis a realizar genera un universo de maniquies de niños que no sobrepasen los 6 años donde los impactos serán reales y frontales teniendo como resultado los parámetros físicos correspondientes a los diferentes puntos de lesiones infantiles, de igual manera determinar cuales son los elementos importantes para evitar lesiones graves.

2.1. Materiales

Para las pruebas de laboratorio realizadas se utilizó herramientas normadas que garanticen una medición estandarizada utilizando maniquies con equipamiento electrónico que garantice los resultados de las desaceleraciones bruscas y lesiones súbitas luego de un impacto. En la prueba de trineo se consideró 2 tipos de severidades de accidentes, y por ende las desaceleraciones medidas serán según el tipo de velocidad programada en el trineo, para este caso se tomó el peor escenario, observando en el acelerómetro valores de hasta 10g en impactos frontales a 31Km/h

2.1.1. Vehículo

El vehículo a utilizar es de la categoría M1. Esto significa que los vehículos que ingresan a sudamerica y por ende al país deben cumplir con la regulación ECE44, dichos vehículos tendrán los anclajes apropiados para garantizar la sujeción de los asientos en la parte posterior.



Figura 9. Vehículos de ensayo

Fuente: Autores

Tomando en cuenta esta consideración se utilizó dos vehículos de la línea europea que poseen dichos anclajes y cumplen con la norma, como son los vehículos renault y fiat. Estos vehículos no son considerados los más vendidos a nivel país, pero en relación a latinoamérica cumplen los mismos criterios de seguridad tanto en Europa como en Sur-América.

2.1.2. Asiento

En la actualidad conviven dos normativas que regulan los sistemas de retención infantil (SRI): la normativa ECE R44/04 (en vigor desde 1982) y la normativa ECE R129 o i-Size (en vigor desde 2013). Se realizó las pruebas de choque para las sillas que cumplan con la normativa ECE R129, utilizando dummies que posean criterios de lesiones más avanzados, a fin de mejorar la seguridad de los más pequeños.



Figura10: Requerimientos Asiento

Fuente: ECE R129

La nueva normativa deja de clasificar a las sillas por grupos (0/0+/I/II/III) como sí hace la normativa ECE R44, y pasa a dividir las sillas por intervalos de peso y altura. Teniendo en cuenta que la norma indica que los ocupantes, incluso niños no deben viajar en brazos y estar colocados en una silla o asiento ergonómico según la edad y peso, para el presente estudio se utilizó una silla para niños entre 9 y 18 kg el cual posee elementos de sujeción a los puntos de anclaje isofix y un cinturón de cuatro puntas que mantiene fijo al niño a su asiento.

2.1.3. Normativa

Para este tipo de ensayo se tomó en cuenta la regulación ECE 44, cuyo reglamento determina que se realicen pruebas de trineo en el que se encuentren puntos de anclaje isofix, tomando en cuenta la norma I-SIZE-R129, cuyo reglamento establece tomar en cuenta el peso, estatura, ajuste, y que sean compatibles con los airbag de cortinilla, garantizando así la seguridad completa de los ocupantes posteriores menores de 6 años.

2.1.4. Dummy

Desde enero de 2013, la Regulación 129 Fase I, que trata con el CRS Integral (Restricciones para niños que tienen el sistema de cinturón en el asiento), especifica el uso del Q0, Q1, Q1.5, Q3 y Q6. En la Fase II de la Regulación 129, que trata del SRI no integral (sistemas de retención para niños que usan el cinturón para adultos para restringir al niño), se especifica el uso del Q3, Q6 y Q1, que entrará en vigencia en junio de 2017. Para los respectivos ensayos de colisión,

para este caso utilizando la prueba de trineo se utilizarán maniqués-dummies de tipo Q1, Q3 y Q6, considerando que en el asiento posterior normalmente viajan niños en sus respectivas sillas ancladas y ajustados adecuadamente [17]. Los maniqués utilizados serán de tipo Q1, Q3 y Q6, con arreglo al rango de estaturas indicado por el fabricante para el sistema de retención infantil, según especificaciones ECER44, como se aprecia en la tabla 1

Tabla 1. Criterio de selección de maniqué

Estatura	≤ 60	$60 \leq X \leq 75$	$75 \leq X \leq 87$	$87 \leq X \leq 105$	$105 \leq X \leq 125$
Dummy	Q0	Q1	Q1,5	Q3	Q6

Fuente: ECE R44/04

En las tablas 2 y 3 se muestra la distribución de pesos y dimensiones de los maniqués de la familia Q, los que se utilizan actualmente para el estudio de las lesiones para menores de 6 años. Los maniqués de la serie Q son la evolución natural de los maniqués de la serie P.

Tabla 2. Distribución de Masas de maniqués Q

	Q1	Q3	Q6
Cabeza + cuello (incl. acelerómetros)	2,41 ± 0,10	3,17 ± 0,10	3,94 ± 0,10
Torso (incl. acelerómetros y sensor de deformación del pecho)	4,21 ± 0,25	6,00 ± 0,30	9,07 ± 0,40
Piernas (juntas)	1,82 ± 0,20	3,54 ± 0,10	6,90 ± 0,10
Brazos (juntos)	0,89 ± 0,20	1,48 ± 0,10	2,49 ± 0,10
Ropa	0,27 ± 0,05	0,40 ± 0,10	0,55 ± 0,10
Total	9,6 ± 0,80	14,59 ± 0,70	22,95 ± 0,80

Fuente: ECE R44/04

El desarrollo de la familia Q se empezó en el año 1993, estos maniqués son mucho más avanzados en términos biomecánicos y antropomórficos; incorporan sensores que los capacitan para registrar datos en impactos laterales. Es por eso que para el presente ensayo se escoge los maniqués Q según normativa ECE R 129.

Los maniqués llevan unos acelerómetros que miden las aceleraciones de la cabeza y del pecho en los tres ejes, adicionalmente el dummy P1 posee un acelerómetro adicional en la pelvis. La nueva generación de dummies infantiles se denomina Q. Sustituye a los P y ha sido diseñada tanto para el estudio de los choques frontales como de los laterales. El dummy Q3 tiene la constitución antropológica de un niño de 6 años de edad y 14,5 kilos de peso según las características de un niño sudamericano.

3. RESULTADOS

El objetivo de la prueba de trineo es reconstruir un choque de acuerdo a varios criterios y determinando las lesiones ausadas y como se puede minimizar las lesiones en los niños. Los criterios a tomar en cuenta se basan en el tipo de choque que puede sufrir los ocupantes posteriores, y como pueden actuar instantaneamente los sistemas de seguridad pasiva para disminuir las lesiones que pueden sufrir dichos ocupantes que normalmente en los niños son cerebrales y cervicales (HIC).

En las pruebas de trineo se toma en cuenta 2 grados de severidad. En la prueba dinámica de severidad alta es generado una velocidad de impacto de 31km/h, de acuerdo con la regulación 80R03 con un sistema de retención infantil específico. En la prueba dinámica de severidad baja es generado una velocidad de impacto de 20km/h, teniendo resultados de aceleraciones no mayores a 2 g, lo que no puede influenciar en los resultados, tomando en cuenta para los ensayos las pruebas dinámicas de severidad alta

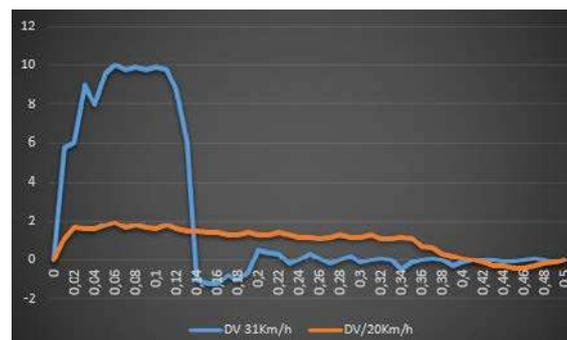


Figura 11: Grados de severidad

Fuente: Autores

3.1. Pruebas de laboratorio

Los escenarios anteriormente descritos fueron reproducidos experimentalmente en un laboratorio normado, cuyas variables externas se fueron acoplando e involucrando a un accidente real. Considerando que los maniquíes Q1, Q3, y Q6 estén debidamente instrumentados y ubicados según las características antropométricas de América del Sur en los trineos respectivos.



Figura 12: Pruebas de impacto.

Fuente: Autores

3.2. Curvas de riesgo de lesiones

Para la evaluación de un impacto frontal es muy importante conocer los criterios y escala de lesiones, por lo que según los maniquies instrumentados en diferentes puntos del cuerpo se tomo en cuenta los datos mas relevantes que pueden influenciar en una mortandad. Para la cabeza, torax y pelvis, se realizo un análisis comparado con el nivel de lesión AIS (*Abbreviated injury scale*), para el estudio de las aceleraciones en la cabeza se utilizó el HIC, criterio de lesión encefalica, para el cuello se utilizó los resultados de la instrumentación y determinar el tipo de lesión, sea esta por flexion, sisallamiento o un daño mayor en la médula espinal (*DENS*), ya se por flexión y tracción. Con aproximadamente 2.000 entradas puntúa las lesiones de forma individual y los clasifica de AIS 1 (Leve) al AIS 6 (Mortal).

Tabla 4. riesgo de lesiones

1	Lesión menor
2	Lesión moderada
3	Lesión severa, sin compromiso vital
4	Lesión severa con compromiso vital, supervivencia probable
5	Lesión crítica, supervivencia incierta
6	Lesión incompatible con la vida

Fuente: AIS

3.3. Criterios de lesión

Como resultado de las pruebas de impacto se observa el nivel de AIS de la cabeza en relación con el valor HIC, en un tiempo predeterminado de 30ms, tomando en cuenta un impacto frontal, considerandose como un peor escenario en grado de severidad alta. Para este ensayo se consideró una curva de riesgo estandarizada de HIC [18].

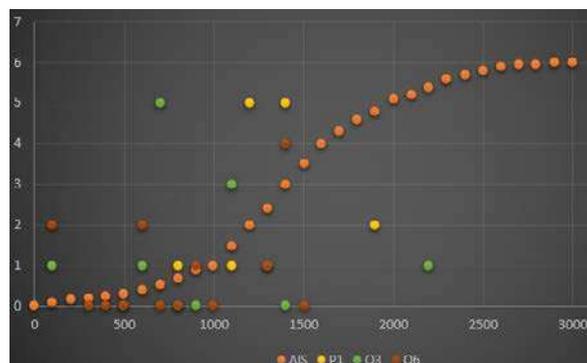


Figura 13: Evaluacion HIC.

Fuente: Autores

En el gráfico anterior se tiene en cuenta que los valores de AIS no sobrepase de 4, de la misma manera los parametros de HIC no tenga valores mayores a 1113, si sobrepasa ese valor es considerado una lesión con riesgo de muerte en su masa encefálica [18]. Para obtener los datos

de lesión del cuello en relación con el HIC es importante observar que los valores de fuerza no sobrepasen los 30 Nm, ya que si se obtiene estos valores, resultan favorables para disminuir exponencialmente las lesiones encefálicas. Si se observan picos durante el ensayo, estos valores pueden causar daños del tipo “DENS”, cizallamiento o daño en la medula espinal.

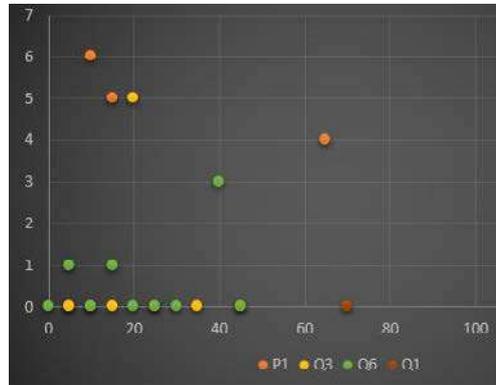


Figura 14: Nivel de lesión del cuello.

Fuente: Autores

Los picos que se pueden observar durante la prueba corresponde a que las muestras no han sido debidamente sujetadas, este ensayo se lo hizo a propósito para determinar los posibles daños que se pueden causar a los infantes si no están debidamente colocados los cinturones al niño y las sujeciones a los anclajes ISOFIX, provocando que incluso lesiones mortales, lo que es muy importante que el niño no solamente se encuentre ajustado en el asiento, sino que posea un asiento ergonómico en el que el cinturón que viene de los hombros y de las piernas estén debidamente calibrados según la geometría del infante. Es importante considerar las desaceleraciones que se pueden ocasionar en la cabeza del infante en un impacto lateral, determinando el nivel de lesión que puede producir una aceleración extrema.

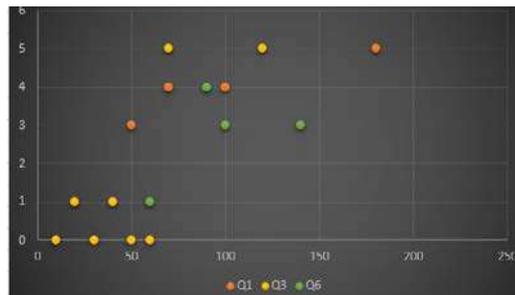


Figura 15: Nivel de desaceleraciones.

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos serán comparados con los límites establecidos por la OMS, específicamente en los criterios de lesión de los valores de HIC, por lo que es importante considerar que los valores de criterio de lesión también estén tutelados bajo la normativa ECE R44.

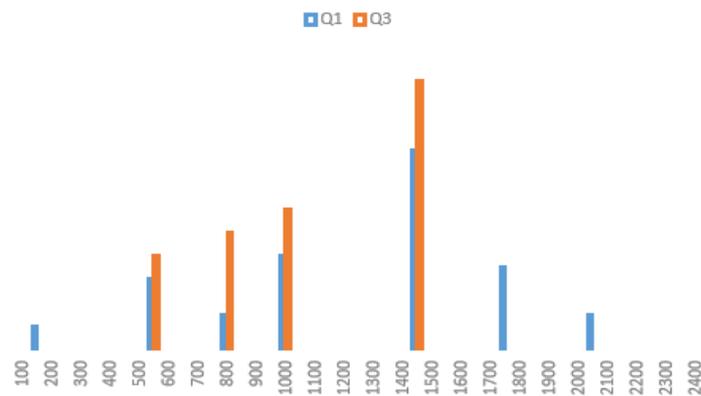


Figura 16: Nivel de gravedad HIC.

Fuente: Autores

En la figura 17 se tiene en cuenta 2 criterios, que el valor de HIC, no sobrepase los 113, ya que valores mayores son considerados mortales, estos valores seán comparados con los de la AIS, cuyos datos serán menores a 3, considerando lesiones donde el Dummy puede tener valores favorables de supervivencia.

Considerando los valores obtenidos de las muestras Q1 y Q3, se observa que el 29% de los maniquies Q3 están con valores positivos de supervivencia de HIC, y poseen un 17% de riesgo AIS. Al observar las muestras de los maniquies Q1, se observa valores alentadores, ya que el 56% están por debajo de lo que determina el HIC, como valores de supervivencia de un 70%, estos valores bajo un entorno de infantes menores o iguales a 75cm.

4. CONCLUSIONES

- Después de haber analizado las procedencias de los vehículos que ingresan al país, se puede mencionar que muchos de estos vehículos, no poseen sistemas de seguridad, los cuales cumplan con las exigencias de las Normas Internacionales en el presente estudio se da a conocer que los puntos de anclajes requeridos en los asientos posteriores de los vehículos, no son instalados por los fabricantes que envían sus autos hacia el país, por lo tanto no se pueden utilizar de una forma adecuada las sillas con anclaje Isofix, en muchos modelos de vehículos que son importados.
- Tomando en cuenta las curvas se observaron unos picos los cuales pueden causar daños del tipo “DENS”, cizallamiento o daño en la medula espinal, estos picos son causados por una mala colocación de los puntos de anclaje de la silla, o no está diseñada para el peso o la altura del niño, es por ellos que después de analizar los resultados se puede concluir que una mala colocación de las sillas puede causar daños “DENS” ya que la carga al momento del impacto no es repartida por que los apoyos no están fijos, es decir que para colocar una silla adecuadamente en un vehículo se debe tener en cuenta el peso la altura del niño para que el asiento sea confortable para que evite lesiones al niño y para colocar la silla en el asiento asegurarnos que los puntos de anclajes estén

correctamente colocados para que al momento de un impacto la carga sea repartida y el niño no sufra lesiones.

5. REFERENCIAS

1. Rosero Añazco, R. A. (2009). *Desarrollo de un reglamento técnico referente a elementos de seguridad para vehículos de categoría MI* (Bachelor's thesis, LATACUNGA/ESPE/2009).
2. Gallegos Cuenca, J. H., & Guzmán Campoverde, M. G. (2015). *Estudio del comportamiento del sistema de retención infantil ubicado en el asiento de transporte escolar durante una colisión mediante simulación* (Bachelor's thesis).
3. Casado, E. Á., Morales, T. G., & Navarro, J. M. (2006). *Automoción: Estructuras del vehículo*. Editorial Paraninfo.
4. Criollo, V., & Darío, R. (2010). *Propuesta para mejoramiento de la seguridad activa y pasiva de los vehículos de la ciudad de Loja* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
5. Vidal, F. J., Más, J. J., & González, M. Á. (2014). *Sistemas eléctricos y de seguridad y confortabilidad*. Editex.
6. Diario oficial de la unión Europea (2016). Reglamento n.o 44 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) —. Obtenido de https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1089580
7. Ibáñez, S. P. (2014). *Mantenimiento de sistemas de seguridad y de apoyo a la conducción. TMVG0209*. IC Editorial.
8. Álvarez, F. J. L. (2009). *ERGONOMÍA Y PSICOSOCIOLOGÍA APLICADA. MANUAL PARA LA FORMACIÓN DEL ESPECIALISTA (12a EDICI)*. Lex Nova.
9. Sancho, J. M. (2007). El niño y la seguridad vial. *Pediatría Atención Primaria*, 9(33), 113-131. Maitre, M. (13 de Mayo de 2008). PDF. Obtenido de <https://www.unece.org/fileadmin//DAM/trans/doc/2008/wp29grsp/CRS-03-04e.pdf>
10. Kresse, W., & Fadaie, K. (2004). *ISO standards for geographic information*. Springer Science & Business Media.
11. Eisenberg, A., Murkoff, H. E., & Hathaway, S. E. (1995). *El Primer Año Del Bebe/What to Expect the First Year*. Editorial Norma.

12. Parera, A. M. (2000). *Sistemas de seguridad y confort en vehículos automóviles*. Marcombo.
13. Pérez, J. A. (2004). *Sistemas de seguridad y confortabilidad*. Editorial Paraninfo.
14. Rodríguez, P. L. (2003). *Investigación de accidentes de tráfico*. Universidad de Oviedo.
15. Soto., A. D. (2016). *¿POR QUÉ LOS NIÑOS VIAJAN INSEGUROS EN TRANSPORTE PÚBLICO*
16. Moreno Galimany, M. (2017). *Estudio de un dispositivo de mejora de la seguridad para las sillas infantiles utilizadas en el automóvil* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)
17. Rodríguez-Boto, G., Rivero-Garvía, M., Gutiérrez-González, R., & Márquez-Rivas, J. (2015). Conceptos básicos sobre la fisiopatología cerebral y la monitorización de la presión intracraneal. *Neurología*, 30(1), 16-22.
18. Mackay, M. (2007). The increasing importance of the biomechanics of impact trauma. *Sadhana*, 32(4), 397-408.

Investigación y diseño de un monociclo eléctrico como movilidad sostenible

Sánchez, Lenin¹; Aguilar, Javier²; Moreno, Rodrigo³

1. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
2. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
3. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: Rodrigo.moreno@epoch.edu.ec

RESUMEN

El presente estudio tiene como objeto investigar y diseñar un monociclo eléctrico como movilidad sostenible en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ya que las personas transitan por los alrededores del campus con el fin de realizar una serie de actividades de su interés como trabajar, estudiar, hacer compras y visitar amigos. Este traslado puede llevarse a cabo ya sea caminando o utilizando vehículos motorizados (autobuses, automóviles, y motos). Dicha circulación refleja en el consumo de espacio, tiempo, energía, y recursos financieros, trayendo así consecuencias negativas como accidentes, contaminación y congestión vehicular, los mismos que son motivo de preocupación, por lo que la industria automotriz ha impulsado el desarrollo de nuevos diseños de prototipos a base de energía limpia como transporte alternativo. Como solución a la problemática de congestión vehicular y contaminación ambiental se plantea el uso del monociclo eléctrico como alternativa de transporte en la politécnica, explorar el campus con la finalidad de recolectar información de tipo cuantitativo, teniendo como resultados, un mejor desplazamiento, tiempos de traslado origen y destino, disminución del índice de accidentabilidad en el tránsito, contando con un servicio de transporte urbano personalizado. El prototipo consiste en una estructura de aluminio con un bajo centro de gravedad para su estabilidad, cuenta con un motor Brushless trifásico sincrónico, con rotor de imanes permanentes, dos plataformas laterales donde se colocan los pies del usuario para poder trasladarse, su asiento ergonómico, su batería y el sistema giroscópico que le permite auto-equilibrarse, lo que significa que se utiliza el movimiento natural del cuerpo para moverse. Esta nueva alternativa de movilización nos ayudará a combatir la contaminación ambiental, la contaminación acústica y en especial a no causar congestión vehicular, reduciendo así el impacto que tiene en la naturaleza, dando un aporte innovador y tecnológico para la sociedad.

RESEARCH AND DESIGN OF AN ELECTRIC UNICYCLE AS A SUSTAINABLE MOBILITY

ABSTRACT

The present research has like objective to investigate and design an electric unicycle, as sustainable mobility at the Superior Polytechnic School of Chimborazo, due to people are moved around the campus in order to do a series of activities of their interest such as working, studying, going shopping and visiting friends. This moving can be done by walking or using a motor vehicle (busses, automobiles, and motorcycles. This move is reflected by

the consumption of space, time, energy and financial resources, bringing in that way, negative consequences such as accidents, pollution, and vehicular traffic, they are the reason of worrying, therefore the automotive industry has motivated the development of new prototype design based on clean energy like alternative transportation. As a solution of this vehicular traffic problem and environmental contamination it is suggested the usage of an electric unicycle like an alternative transportation at the polytechnic school, exploring the campus in order to gather quantitative type information, taking into account a better move, destination-origin time, decreasing the accident rate in the traffic, having a customized service of urban transportation. The prototype consists on an aluminium structure with a low gravity center for its balance, it has a three-phase synchronous Brushless motor with permanent magnet rotor, two lateral platforms where the user's feet are put on to move, its ergonomic seat, its battery and the gyroscopicsystem that permits self-balancing, what means the natural body's movement is used to move. This new alternative mobility will help us to fight the environmental, acoustic contamination and in especial to not cause vehicular traffic congestion, reducing in this way the impact that it has in the nature, giving a novel and technological contribution for the society.

PALABRAS CLAVES: Movilidad, Contaminación Ambiental, Seguridad, Monociclo Eléctrico.

KEY WORDS: Moving, Environmental Contamination, Security, Electric Unicycle.

1. INTRODUCCIÓN

Cada día toma más importancia el desarrollo de la movilidad eléctrica, debido a la necesidad de disponer de un sistema que emplee energías sustentables, permitiéndonos mejorar el desplazamiento en relación a costos de transportación, reducir tiempo de traslado en origen y destino, disminuir el índice de accidentes de tránsito, contar con un servicio de transporte urbano personal adecuado, minimizar el tráfico vehicular y la contaminación ambiental con la reducción del uso del vehículo particular y comercial, brindar una mejor imagen urbanística, tomando en consideración aspectos importantes como el nivel de integridad, seguridad y la accesibilidad a los usuarios viales.

En la actualidad, la necesidad de mejorar los sistemas de movilidad mediante la utilización de nuevos modos de transporte impulsados por energías alternativas, como son los monociclos eléctricos, requiere de un proceso de investigación largo y exhaustivo, ya que la disponibilidad de información sobre el diseño y las características de los sistemas de propulsión eléctrica son muy limitadas. Esta limitante se presenta debido a que su desarrollo es realizado por empresas privadas, a través de métodos de innovación cerrada y es difícil generar un proceso de vigilancia tecnológica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Describe la metodología de la investigación de manera que otros investigadores la puedan replicar o que los lectores puedan conocer los límites de interpretación de los datos; informe la localización espacial del experimento si aplica (coordenadas geográficas, características geográficas).

La utilización incorrecta o inadecuada de los métodos estadísticos es inaceptable. No describa los tratamientos estadísticos corrientes (comparación de medias, análisis de varianza, etc.), incluya la referencia pertinente. Describa los modelos estadísticos y diseño experimental (clases, bloques y/o unidades experimentales). Con el software estadístico mencione las fuentes de variación.

Inductivo: se puede evidenciar en el marco teórico y los objetivos. Se aplicó el método inductivo al tomar las necesidades y problemas de la muestra, y generalizarlos al total de la población.

Analítico: lo podemos notar en planteamiento del problema, objetivos, marco teórico y justificación.

Como técnicas de investigación para el desarrollo del proyecto se utilizaron principalmente la aplicación de encuestas y una observación directa, mismas que fueron cruciales al momento de recolectar la información necesaria para identificar la realidad actual en cuanto a la facilidad que se tiene para movilizarse en transporte alternativo, además de percibir la aceptación que tendría el monociclo eléctrico cumpliendo el papel de una alternativa de transporte como respuesta a la congestión vehicular en los puntos principales de la ESPOCH.

Las 375 encuestas se realizaron en diferentes puntos dentro del campus a personas al azar con la finalidad de obtener una muestra más heterogénea que nos garantice una mayor variabilidad entre los encuestados, para obtener datos que nos suministren información, para de esta manera comprobar nuestra hipótesis.

La aplicación de la observación directa permitió evidenciar la realidad de la movilidad, las necesidades presentes para el desarrollo de la ESPOCH, como son la falta de señalización, una cultura adecuada de movilidad y congestión vehicular.

3. RESULTADOS

Es de suma importancia para el presente trabajo conocer la afluencia de vehículos para cada entrada existente que permite el ingreso vehicular en la ESPOCH con la finalidad de constatar la existencia de flujo masivo y por ende la congestión vehicular.

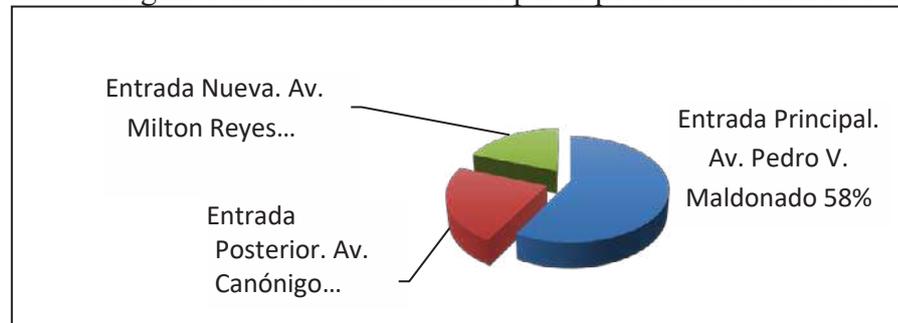
Tabla 1 Flujo vehicular

INGRESO N. 1 SUR		INGRESO N. 2 NORTE		ESTRATOS	
TIPO DE VEHICULO	N.	TIPO DE VEHICULO	N.		N.
TAXIS	1735	TAXIS	1179	Ingreso N.1 SUR	4491
PARTICULARES	2552	PARTICULARES	1825	Ingreso N.2 NORTE	3058
MOTOS	96	MOTOS	49	TOTAL	7549
BUSES	20	BUSES	5		
VOLQUETES, FURGONES	28	VOLQUETES, FURGONES			
TOTAL	4431	TOTAL	3058		

Fuente: Plan de Movilidad Sostenible ESPOCH

Se detallan los tipos de arribo motorizados y su partición modal.

Figura 1 Acceso más utilizado por la población de la ESPOCH



Fuente: Plan de Movilidad Sostenible ESPOCH

Se realizó un sondeo en las entradas principales de la institución por lo que se tomó el tiempo en segundos a vehículos motorizados; para saber su tiempo de desplazamiento en 100m.

Tabla 2: Tiempo de vehículos motorizados

Tiempos(s)	34	75	41	70	79
	42	67	45	40	64
	34	22	59	92	38
	33	36	94	21	58
	96	32	72	23	64
	68	122	71	25	102
	42	90	45	68	63
	57	29	59	41	96
	24	27	39	36	63
	77	89	32	53	85

La presente investigación es de tipo cuantitativo, por lo que se aplica la prueba de normalidad en primera instancia, y así determinar si se requiere métodos paramétricos o no paramétricos para la comparación de los tiempos.

Prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov

H0: Los tiempos siguen una distribución normal

Hi: Los tiempos no siguen una distribución normal

Nivel de significancia = 5% = 0,05

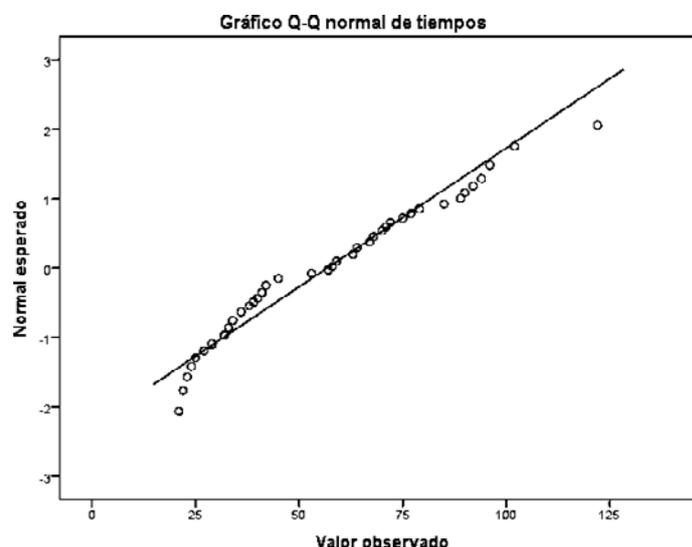
Cálculos estadísticos:

Tabla 3: Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
tiempos	,142	50	,014	,949	50	,031

Corrección de significación de Lilliefors

Figura 2: Promedio de tiempos



Mediante el análisis e interpretación de las encuestas realizadas dentro del campus politécnico sobre el monociclo eléctrico como transporte alternativo de movilidad, además de las mediciones realizadas en campo y la corroboración de la existencia del problema de congestión vehicular en las horas picos en las tres entradas principales de la ESPOCH apoyados en la tesis “Propuesta de un Plan de Movilidad Sostenible para la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo”, con todo esta información se puede llegar a concluir que la hipótesis donde se indica que el monociclo eléctrico ayudará a mitigar la problemática de tráfico vehicular con la ayuda de una ciclovía adecuada para su circulación está respaldada, también se evidencia que tiene una aceptación por parte de la comunidad politécnica y que al implementarse mejorará la movilidad dando un aporte al medio ambiente ya que se utiliza un medio de transporte limpio.

Figura 3.: Motor eléctrico Brushless trifásico sincrónico, con rotor de imanes permanentes



El Motor hace parte integral de la rueda ya que comparten el eje de rotación, por lo que el empuje del motor se aplica directamente a la rueda sin pasar por reductores mecánicos, cadenas o transmisiones; este sistema de tracción presenta una ventaja para la eficiencia, pero crea esfuerzos adicionales en el punto específico de sujeción. Esta simple solución previene la fatiga del material y brinda una seguridad estructural a nuestro monociclo eléctrico.

Luego de definir los requerimientos, se diseñó la estructura de una forma que también fuese estéticamente agradable, se decidió dar al monociclo eléctrico, un estilo futurista

El diseño fue realizado mediante la ayuda del software de dibujo SolidWorks.

Luego de la especificación y selección de los componentes más relevantes para el desarrollo del monociclo eléctrico, se inició el proceso de montaje en el cual incorporan componentes de uso común, necesarios para conservar el principio básico de este medio de transporte. Partiendo de esta premisa se incorporan fibra de vidrio, un asiento simple pero ergonómico con su estructura de aluminio reforzado, agregado también su rueda con motor eléctrico Brushless, manubrio y sus focos de seguridad vial.

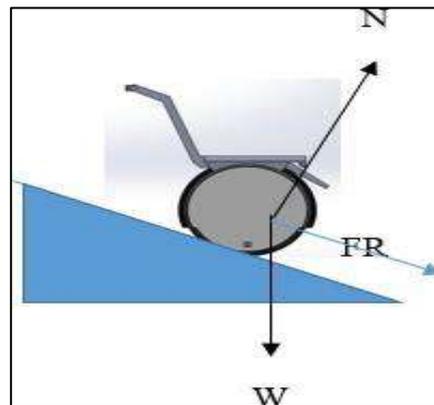
Figura 6: Diseño del monociclo eléctrico



Los sistemas de locomoción obedecen a los principios de la mecánica clásica, siendo fundamental la segunda ley de Newton en cuestiones como la aceleración y el desplazamiento del vehículo. Se realizó un cálculo sobre un diagrama de cuerpo libre para seleccionar un motor acorde con las necesidades

Según las gráficas del fabricante el motor "Brushless" de 500 W con el controlador del sistema que tiene los sensores giroscopios posee un torque máximo de 13,38 N/m, sin embargo, para el caso de escalar una pendiente, la velocidad es típicamente de entre 15 y 20 km/h y el torque de salida del motor para este punto de operación es de entre 3 y 4,5 N/m, destacándose que en este punto de operación se presenta la mayor eficiencia energética; alrededor del 82 % (Golden Motor Technology Co. Ltd., 2012).

Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del monociclo eléctrico



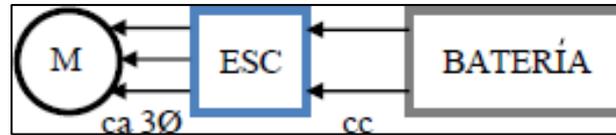
Para los datos anteriores, promediando un peso combinado de vehículo y pasajero de 90kg, un radio de rueda equivale a 38cm y una fuerza de fricción aproximada al 10% de la fuerza de impulso producida por el motor, el monociclo puede afrontar pendientes hasta 7,5% sin necesidad de fuerza alguna.

Este valor pendiente se escogió debido a que en la ciudad de Riobamba se presentan pendientes de entre el 6 y el 9%, siendo 7,5% un valor razonable. Además siempre se debe considerar que a diferencia de un automóvil eléctrico o una motoneta eléctrica; el monociclo eléctrico es un conjunto hombre-máquina.

El motor empleado es del tipo "Brushless" trifásico sincrónico, con rotor de imanes permanentes, núcleo en hierro al silicio y carcasa de aluminio. El empleo de este tipo de motores es típico para las aplicaciones de movilidad eléctrica, pues presentan una buena curva de torque y potencia con un peso reducido; pero su principal ventaja es que no presentan componentes en fricción, por lo cual son muy confiables y prácticamente no necesitan mantenimiento. Como paréntesis se agrega que sólo para el caso de los vehículos eléctricos con motores de tamaños considerables sería necesario el cambio del refrigerante cada 5 años y el de aceite de motor cada 100.000 km, la alta duración del aceite se da debido a que en el motor eléctrico, el aceite no pierde viscosidad por el efecto del cizallamiento ni tampoco se contamina con residuos de combustión. El factor limitante es el envejecimiento por cambios térmicos y la oxidación.

Debido a que la fuente de alimentación es de corriente continua, se requiere el uso de un control electrónico de velocidad (ESC por sus siglas en inglés) para el funcionamiento del motor. Ver Fig. 4. El ESC se encarga de detectar la posición relativa del rotor con respecto al estator mediante sensores giroscopios y emula ondas similares a senoidales mediante pulsos en su descomposición de la serie de Fourier.

Figura 8. Diagrama de bloques básico para el sistema de motorización



Las baterías hacen parte fundamental de un sistema de movilidad eléctrica independiente. Siendo el factor limitante la capacidad de energía acumulada por unidad de masa y de volumen, traduciéndose esto en una limitación a la autonomía propia del vehículo.

Se analizaron una a una las diferentes tecnologías en baterías y se llegó a la conclusión que la mejor opción era equipar el sistema con baterías de litio debido a la superior capacidad en densidad específica de energía vs masa y volumen. Dentro de las tecnologías de Litio se escogió la tecnología Litio-Fosfato que a pesar de poseer densidades energéticas inferiores a las tecnologías Litio-Cobalto y Litio-Magnesio e incluso un precio más elevado, evidencian una superioridad absoluta en el tema de la seguridad, lo cual es un aspecto fundamental para el diseño de cualquier medio de transporte, (A123 Systems Inc., 2011), (Sandia National Laboratories, 2006).

Adicionalmente la tecnología Litio-Fosfato presenta una vida útil hasta 10 veces superior respecto a la tecnología Plomo ácido (Buchmann, 2013), logrando incluso una expectativa de vida muy superior a la de los demás elementos que conforma el monociclo eléctrico.

Luego de seleccionada la tecnología y saber que se encontraba disponible comercialmente, se importaron 13 celdas de tecnología LIFEP04 por sus siglas en inglés de Litio Hierro Fosfato Polímero, de la marca A123, con una capacidad nominal de 20 Ah, tensión nominal de 3,3 V por celda y una densidad energética de 131 Wh/kg (A123 Systems Inc, 2011).

Dentro del diseño se concibió un cerramiento en fibra de vidrio de 7 mm de espesor con el objetivo de proporcionar a las baterías una protección mecánica y un confinamiento en el caso de un accidente; es importante enfatizar que durante la manipulación de baterías siempre se debe tener en cuenta que se trata con energía acumulada, lo cual es potencialmente peligroso.

La batería escogida es la de tecnología Litio Hierro Nano Fosfato patentada por la marca A123 System cumple el estándar EUCAR 3 (A123 Systems Inc., 2011) para pruebas de penetración, sobre-carga, sobre descarga, cortocircuito externo y aplastamiento, esto quiere decir que la batería puede presentar goteo o filtraciones de electrolito, pero no entrara en ignición ni tampoco explotará, únicamente luego de superar el límite térmico la batería entra en carrera térmica y presentaría emisiones de humo, mas no presenta flameo, ni mucho menos explosión, por lo cual cumple con el estándar EUCAR 4 (A123 Systems Inc., 2011) para la prueba de estabilidad térmica. Esto nos confirma la principal ventaja de este tipo de baterías en el enfoque a la seguridad.

Como resultado tenemos la aprobación de la Hipótesis Investigativa Hi que plantea que el uso del monociclo eléctrico como transporte alternativo si disminuye la congestión vehicular en las entradas principales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Al ocupar el monociclo eléctrico para el desarrollo de sus actividades cotidianas disminuirá la

circulación de transportes a base de combustibles fósiles, como consecuencia lógica, al ser una nueva alternativa de movilidad amigable con el medio ambiente, novedosa y el hecho de no producir residuos contaminantes, hacen que sea factible su aplicación en relación al medio ambiente.

4. CONCLUSIONES

El monociclo eléctrico es una alternativa de transporte personal, basado en la tecnología de los sistemas de control de auto-balanceo. Con esta se intenta dar solución a los problemas de transporte en distancias cortas a medianas que existen en diferentes partes de alrededor del campus y de la ciudad de Riobamba, como ya se ha visto, el automóvil está dejando de ser una buena forma de transportarse a través de la metrópoli en distancias relativamente cortas gracias a la sobrepoblación de este tipo de vehículos, causando que la gente empiece a utilizar formas alternas de transporte como la motocicleta, la bicicleta, el transporte público, etc.

Al concientizar a la ciudadanía de las ventajas del uso de transportes alternativos, estos tendrán mayor oportunidad de ventas, además la mayoría de casa comerciales están apostando por emplear energías limpias en sus productos, como es el caso de Kia Motors con su Modelo Soul EV, también se han lanzado al mercado muchas otras alternativas de transporte como bicicletas y monociclos eléctricos.

Luego del proceso de investigación, desarrollo y pruebas en el sistema de movilidad eléctrica, queda claro la amplia superioridad en eficiencia, respecto a los medios de transporte convencionales.

5. REFERENCIAS

Agenjo, C. B., & Mateu, S. T. (2008). *El transporte: aspectos y tipología*. Madrid: Delta Publicaciones.

Alonso, M., Buyolo, F., Castella, S., Freixa, A., Fuses, V., Garcia, E., Santamaria, X. (2011). *El Vehículo Eléctrico, desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocios*. Barcelona: Nova Era Barcelona.

Central European Time. (20 de Abril de 2016). *europapress.es*. Obtenido de Murcia recibe un Premio europeo de movilidad urbana sostenible: <http://www.europapress.es/murcia/noticia-murcia-recibe-premio-europeo-movilidad-urbana-sostenible-20160420193918.html>

El telégrafo. (24 de Abril de 2017). *El telégrafo. Redacción Ciudadana*. Obtenido de Loja es pionera en el transporte eléctrico: <https://www.itelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/loja-es-pionera-en-el-transporte-electrico>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. (2015). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. Obtenido a través de antecedentes ESPOCH:

<https://www.esPOCH.edu.ec/index.php/antecedentes.html> Excm. Diputación Provincial de Albacete. (s.f.). *Desarrollo Sostenible de la Provincia de Albacete*. Obtenido de Transporte y Movilidad. Desarrollo Sostenible: <http://www.absostenible.es/index.php?id=82>

Maldonado, P. (16 de Enero de 2018). Los vehículos eléctricos ruedan por el país y desean acelerar. *Líderes*. Obtenido de www.revistalideres.ec/lideres/vehiculos-electricos-ruedan-pais-empresas.html#

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (1996). *Marco Conceptual del Desarrollo Sostenible de la Agricultura y el Medio Rural en el IICA*. Venezuela: IICA Biblioteca Venezuela.

Miranda, J., & Iglesias, N. (2015). Las infraestructuras de recarga y el despegue del vehículo eléctrico. *Observatorio Medioambiental*, 57-85. doi:10.5209/rev_OBMD.2015.v18.51285

Ministerio de Transportes y Obras Públicas. (31 de Agosto de 2012). *Ministerio de Transportes y Obras Públicas. Especial Seguridad Vial*. Obtenido de Ciclovías. Una nueva alternativa de Transporte no Motorizado. : https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/08/31-08-2012_Especial_Ciclovias.pdf

Ninebot INC & KPSPORT Group INC. (2016). *Ninebot*. Obtenido de Ninebot One S2: <https://www.ninebot.com/es/ninebot-one-s2/>

Rojas Tixe, L. A. (2016). *Análisis de movilidad para la zona céntrica de la ciudad de Riobamba perteneciente a la provincia de Chimborazo. (Tesis de Ingeniería)*. Riobamba.

Rosero CH., M. (05 de Septiembre de 2014). *El Comercio. Actualidad*. Obtenido de Los uniformes son patrimonio de la ciudad: <http://www.elcomercio.com/actualidad/uniformes-patrimonio-ciudad-estudiantes.html>

Sánchez, L., Quintana, P., Arguello, E., & Acurio, H. (2018). *International Journal of Engineering Trends and Technology*.

Solow, R. M. (1956). *Teoría Económica del Desarrollo*. Barcelona : Gredos.

T3México. (19 de Febrero de 2016). *T3México*. Obtenido de E conduce: La nueva alternativa de movilidad en la CDMX: <http://t3mexico.mx/econduce-la-nueva-alternativa-de-movilidad-en-la-cdmx/>

Análisis del comportamiento de los imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídicos sobre metal desnudo y su resistencia a factores externos

(Analysis of the behavior of anticorrosive primers with an alkydic vehicle on nude metal and its resistance to external factors)

G. Reyes⁽¹⁾, S. Chasi⁽²⁾, A. Castillo⁽³⁾, J.A. Del Pozo⁽⁴⁾, C. Fuertes⁽⁵⁾.

(1) Coordinador Investigación, Facultad de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador.

(2) Coordinador Vinculación, Universidad Internacional del Ecuador

(3) Decano Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Internacional del Ecuador.

(4) Facultad de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador

(5) Facultad de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador

RESUMEN

Introducción: A nivel nacional existen varios distribuidores de pinturas que ofrecen una gran variedad de productos, cuando se habla sobre las pinturas anticorrosivas los clientes desconocen el nivel protección, resistencia, calidad y tiempo de vida que poseen. Las pinturas anticorrosivas que se analizaron fueron seleccionadas mediante un proceso de investigación a nivel de talleres de reparación y pintura, siendo estas pinturas las de mayor uso, selección y comercialización al momento de realizar los trabajos profesionales. **Metodología:** Las pruebas realizadas sobre las pinturas se llevaron a cabo bajo una guía normalizada que parte del reglamento RTE INEN 061 "Pinturas", abarcando todas sus pruebas en la normativa NTE INEN 1043 "Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico. **Resultados:** Ciertas películas anticorrosivas muestran altos niveles de protección frente a la corrosión evitando que se presenten fallas y defectos de pintura, mientras que 2 de las 3 muestras utilizadas no mostraron una alta capacidad de cobertura frente a ambientes acelerados afectando en gran cantidad la superficie. **Conclusión:** Frente a todas la pruebas realizadas de nivel de adherencia, tiempo de secado y resistencia a la corrosión se constató que ciertas pinturas cumplen con los requisitos especificados por las normativas INEN, pero solo una de los imprimantes anticorrosivos respondió de buena manera a todas las pruebas realizadas.

PALABRAS CLAVES: Anticorrosivo, Imprimantes, Pintura, Reglamento, Vehículo.

ABSTRACT

Introduction: At the national level, there are several paint distributors that offer a wide variety of products. When talking about anticorrosive primers, customers do not know the protection, resistance, quality and life time they have. The anticorrosive paints that were analyzed were selected through a research process at the level of repair and painting workshops, it was discovered that these paints are the most used at the time of professional work. **Methodology:** The tests carried out on these paintings were carried out under a standard guide that part of the RTE INEN 061 "Paints" regulation, covering all its tests in the NTE INEN 1043 standard "Paintings. Anticorrosive primers with alkyd vehicle. **Results:** Certain anticorrosive films show high levels of protection against corrosion, preventing faults and paint defects, while 2 of the 3 anti-corrosive paints used did not show a high covering capacity in front of accelerated environments, affecting the surface in large quantity. **Conclusion:** In front of all the tests carried out on level of adherence, drying time and resistance to corrosion, it was found that certain paints comply the requirements specified by the INEN regulations, but only one of the anticorrosive primers responded in a good way to all the tests performed.

KEYWORDS: Anticorrosive, Paint, Primers, Regulation, Vehicle.

1. INTRODUCCIÓN

Las pinturas anticorrosivas juegan un papel muy importante dentro de los temas de reparación y pintura ya que es la primera capa que se debe aplicar al momento de realizar cualquier trabajo de pintado de las chapas de acero ya sea el caso que dicha chapa o pieza sea nueva o reparada.

El objetivo principal de los imprimantes anticorrosivos es brindar una protección total de la superficie de la chapa metálica evitando de esta manera que fenómenos como el óxido y la corrosión se presenten afectando la estructura interna del material metálico, llegando a causar un deterioro en la seguridad que ofrece la carrocería del vehículo hacia los ocupantes en el momento de suscitarse un siniestro automovilístico.

Al momento de hablar sobre la calidad que brindan las pinturas anticorrosivas siempre ha existido un tema de discusión por parte de los trabajadores profesionales que se especializan en el campo de latonería y pintura, pero de igual manera el cliente muestra un interés en obtener un trabajo de reparación de alta calidad con un producto que cumpla con sus expectativas, y muestre una buena respuesta frente a los estándares de protección y presente una buena respuesta frente a las condiciones climatológicas a las cuales se encuentra expuesta a diario dicha capa de pintura.

La presente investigación tiene como fin comprobar si las pinturas anticorrosivas que son de mayor uso a nivel nacional producidas en el país e importadas en el campo automotriz, específicamente en el área de latonería y pintura, cumplen con las normativas y requisitos establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) para garantizar una adecuada protección frente a las condiciones meteorológicas a las cuales están expuestas, buscando otorgar un conocimiento que sea de utilidad para técnicos y profesionales expertos en el tema asegurando que el producto escogido y recomendado al cliente sea de calidad y cumpla con los requisitos necesarios para un aprovechamiento del 100% de las capacidades funcionales.

Entre los factores condicionantes de la vida de los recubrimientos de pintura en exposiciones atmosféricas destacan: a) la agresividad de la atmósfera, en sus componentes climáticos (temperatura, ϕ , humedad relativa, HR, radiación solar, etc.) y contaminación; b) el estado de la superficie metálica (posible presencia de productos de corrosión, especies agresivas, etc.) y c) características del sistema protector (tipo, espesor, etc.). [1]

Los procesos de preparación de las placas metálicas presentan un papel fundamental ya que en el diseño protector por pinturas anticorrosivas, más que hablar de un sistema de pintura, se debería de hablar de un sistema de pintado, donde intervendrían no solamente el tipo y el espesor de las diferentes pinturas utilizadas (sistema de pintura), sino también la preparación previa de la superficie metálica y el modo y condiciones de aplicación del recubrimiento, factores todos ellos de importancia decisiva para la vida del revestimiento protector. [2]

Las pinturas anticorrosivas tienen como función fundamental controlar el fenómeno de corrosión para prolongar la vida útil del sustrato. Una propiedad esencial es la adhesión al metal, la cual es función del material formador de película; su naturaleza depende de la pintura intermedia o de terminación seleccionada según las exigencias del medio ambiente. Las principales características de las pinturas anticorrosivas son el bajo brillo para facilitar la adhesión de la capa posterior; la reducida permeabilidad para controlar el proceso de corrosión y evitar simultáneamente la formación de ampollas; óptima adhesión al sustrato de base. [3]

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. CORROSIÓN

Por corrosión se entiende la degradación del metal o de una parte del mismo, debida a la tendencia natural para combinarse con el oxígeno. [4]

Para interpretar de una mejor manera los conceptos de oxidación y corrosión se los define a continuación:

- Oxidación. Proceso químico de oxidación- reducción en el que se produce la combinación química del metal con el oxígeno, cuyo producto es otro material diferente.
- Corrosión. Efecto físico resultante de la transformación producida al combinar el metal con el oxígeno del que resulta otro producto con unas características mecánicas muy precarias.

Dado que el vehículo en su composición posee elementos como el acero, la posibilidad y factibilidad de que sufra corrosión en algún punto de su carrocería es muy elevada.

Esta corrosión del metal aparece bajo dos aspectos diferentes, los cuales se distinguen en el avance del proceso de la corrosión, uno de ellos aparece en gran parte o área visible del material y otro que se forma a lo largo del tiempo. A continuación se expone los dos tipos de corrosión que existen en la carrocería

2.1.1. CORROSIÓN COSMÉTICA

Este tipo de corrosión es visible en la superficie de la carrocería, la cual afecta la apariencia del vehículo en general, se debe tener en cuenta que este tipo de corrosión no afecta a la seguridad de los componentes de su estructura, pero no siempre es así, existen varios casos en los que este tipo de corrosión ataca desde el interior de la pieza o chapa extendiéndose desde su interior y es en este punto cuando pasa a ser una corrosión de tipo perforante. La aparición de la corrosión cosmética o bien denominada corrosión externa, se da por algún golpe, rayado, abolladura la cual afecta directamente las capas de pintura que estaban destinada a proteger esta pieza o chapa y como se menciono antes por efecto del oxígeno en presencia de humedad se produce este fenómeno.



Figura 2.1 Corrosión cosmética

Fuente: Pintado de automóviles CESVIMAP, 2013

2.1.2. CORROSIÓN PERFORANTE

La corrosión perforante, interna o de igual manera llamada corrosión destructiva es aquella que se va dando con el transcurso del tiempo, a diferencia del primer tipo de corrosión, esta no es visible a simple vista, no hay que dejar de lado que este tipo de corrosión afecta de igual manera a la apariencia general del vehículo. Se puede identificar este tipo de corrosión de la siguiente manera, mientras se observa alguna chapa o pieza hay ciertos agujeros irregulares, ciertos desbastes del material en sí, se produce por que no ha existido un control adecuado de la pieza o chapa, es decir ha estado expuesta a cambios de temperatura y a condiciones climatológicas muy cambiantes que lo han afectado. El avance de este tipo de corrosión es de dentro hacia fuera, la misma cuando alcance la chapa exterior afectará e ira destruyendo las capas de pintura haciéndose de esta manera visible.

Figura 3.2 Corrosión perforante



Fuente: Pintado de automóviles CESVIMAP, 2013

2.2. PROCESO DE PINTADO EN REPARACIÓN

Dentro del proceso de pintado en reparación se tiene en cuenta varios aspectos que son de vital importancia para realizar el mismo; dentro de esta línea de pintado existen varios tipos de procesos de reparación, es decir, para las piezas totalmente nuevas, para las nuevas con algunos raspones, para las totalmente reparadas, para otras con pintado superficial y otros varios tipos de piezas según sea su material. Dentro de los procesos de reparación de pintura como se conoce el objetivo principal es recuperar y restaurar la protección que brindan estas capas ante la corrosión que puede suscitarse en la carrocería del vehículo y de igual manera brindarle el aspecto estético deseado por el fabricante. De una forma genérica los trabajadores y expertos en el tema siguen una serie de pasos en un orden, siendo estos los pasos básicos que todo reparador y pintor está obligado a seguir. [4]

- Limpieza y desengrasado.
- Enmasillado.
- Imprimado.
- Aparejado.
- Aplicación del acabado.

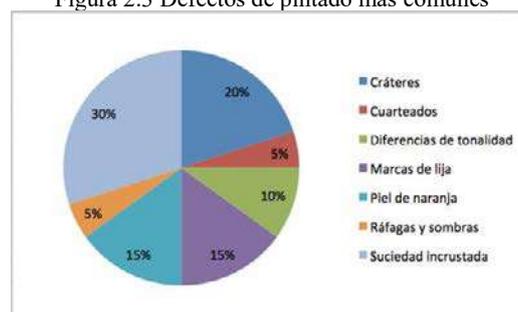
2.3. DEFECTOS DE PINTURA

En primer lugar se debe conocer lo que son los defectos de la pintura, los cuales, se producen en el momento de realizar las operaciones de pintado, los operarios o trabajadores deben poseer la destreza necesaria para evitar que se produzcan y de igual manera tener los conocimientos y la experiencia suficiente para repararlos al momento de que aparezcan. [4]. Los defectos de pintado se los pueden clasificar dentro de cinco grandes grupos en función de cómo se originan; defectuosa mezcla, inapropiada preparación de superficies, mal uso de la pistola aerográfica, incorrecto mantenimiento de los equipos, falta de inspección.

2.3.1. DEFECTOS DEL PINTADO

Los defectos de la pintura se producen específicamente en el momento de la aplicación de los productos, existen gran variedad de defectos pero se debe tener cuenta que varios defectos de pintado se pueden producir por una misma causa y a su vez, un solo defecto puede ser producido por varias causas. [4]

Figura 2.3 Defectos de pintado más comunes



Fuente: Autores

2.4. DAÑOS DE PINTURA

En este caso se describirán los daños de la pintura, los cuales, se producen solamente por factores totalmente externos a los procesos de pintado [4], estos factores se los clasifica en cuatro clases las cuales son:

Tabla 2.1 Daños de pintura, factores, origen y daños.

	Origen o Causa	Daño o Deterioro
Factores Mecánicos	Marcas o golpes de grava. Golpes que se dan contra los equipos o herramientas del lugar de trabajo. Arañazos o raspones con otros vehículos.	Incrustaciones de grava. Arañazos, despostillados. Rayones o marcas superficiales por el lavado. Marcas de pintura de otro vehículo.
Factores Climáticos	Alto índice de humedad en el ambiente. Rayos UV o Luz ultravioleta. Lluvia, granizo, etc. Excesivas variaciones en la temperatura de calor y frío.	Perdida de brillo por rayos UV y variaciones de temperatura. Roturas o grietas en la pintura. Daños por humedad (producidos en la zona costera de la región). Oxidación y corrosión.
Factores de Origen Industrial	Compuestos de cemento como la arena, ripio, etc. Proyectiles o trozos de bloque, ladrillo, etc. Lluvia ácida.	Rayones y despostillados producidos por los impactos del cemento y sus compuestos, así como de bloques, ladrillos, etc. Quemazón de la capa de barniz y pérdida de brillo por parte de la lluvia ácida.
Factores Biológicos	Insectos. Excremento de aves. Suciedades que caen de los árboles	Desgaste de la capa de acabado con el pasar del tiempo. Manchas superficiales.

Fuente: Pintado de automóviles CESVIMAP, 2013

2.5. PROCESO DE REPARACIÓN

El proceso de reparación y pintado de una pieza o chapa metálica posee una gran serie de estándares de calidad que deben ser cumplidos para entregar el trabajo receptado, dentro de este proceso es de vital importancia contar con los equipos necesarios que complementan todo el taller de reparación que van desde puestos de trabajo especificados para cada operación, cuentan con hornos de pintura, extractores de humo, pistolas de pintura, compresores de alto rendimiento, productos específicos para la limpieza y el desengrasado, masillas, anticorrosivos, fondos o aparejos, pinturas de varios pigmentos propios de la marca, barniz, etc. Así como de igual manera abrasivos que van desde los granos más agresivos hasta los más finos, sin dejar de lado los equipos de protección personal “EPP” de cada trabajador, y de gran importancia contar los técnicos y pintores capacitados que sean capaces de solucionar cualquier problema que llegue a su taller y así de igual manera contar con los conocimientos y la experiencia necesaria para entregar una pintura de acabado acorde a las necesidades solicitadas por el fabricante cumpliendo con el poder cubrición y la protección contra la corrosión. A continuación se detallan los pasos que componen este proceso de una forma más amplia y comprensible.

- Aplicación de removedor.
- Limpieza y desengrasado.
- Remoción del golpe.
- Lijado sobre la chapa metálica.
- Limpieza y desengrasado.
- Enmascarado.
- Aplicación de Base Primer.
- Lijado de la Base Primer.
- Limpieza y desengrasado.
- Enmasillado.
- Lijado de la masilla.
- Control de Calidad.
- Limpieza y desengrasado.
- Preparación de superficie.
- Lijado del fondo.
- Control de Calidad.
- Limpieza y desengrasado.
- Aplicación pintura de acabado.
- Control de calidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología

Los tipos de métodos o alcances que se utilizaron dentro de esta investigación fueron descriptivo, correlacional y explicativo o causal, ya que los mismos nos dan los resultados que se esperan obtener gracias a su fundamentación teórica y función que cada uno que ofrece. El estudio se realizó en base a la observación y análisis visual de los fenómenos que se suscitaron en las diferentes probetas o sustratos con sus procesos de preparación. la investigación se dividió en las diferentes pruebas estipuladas por la normativa INEN 1043, es decir, en pruebas de adherencia, de tiempo de secado y resistencia a la corrosión, otorgando a cada prueba un cierto número de probetas donde unas servirán para realizar las pruebas y otras se destinarán específicamente a comparación frente a los sustratos o probetas afectadas por las pruebas de análisis.

Dentro de la prueba de adherencia se destinaron 9 probetas metálicas en total, distribuidas en 3 sustratos para cada uno de los diferentes proveedores analizando el nivel de adherencia por medio de la utilización de la cinta de ensayo que permite dar a conocer el porcentaje de adherencia que muestra esta película anticorrosiva.

En la prueba de tiempo de secado se destinaron 9 probetas de material de vidrio las cuales favorecen a la observación gracias a la nitidez de su material y están especificadas en su uso por la normativa que predomina esta prueba de análisis NTE INEN 1011. Se destinaron 3 probetas para cada tipo de anticorrosivo y dentro de estas 3 probetas 1 para cada tipo de prueba que posee la normativa.

Por último en la prueba de resistencia a la corrosión se destinaron un total de 18 sustratos o probetas metálicas donde cada tipo de imprimante posee 6 probetas y dentro de estas se distribuyen 2 para cada tipo de proceso de preparación. Al momento de realizar la comparación se poseen un total de 9 probetas con su diferente tipo de anticorrosivo y proceso de preparación.

Todos los sustratos se encuentran membretados y normalizados bajo sus normativas de ensayo en cuanto a tamaño y material de los mismos.

3.2. Materiales

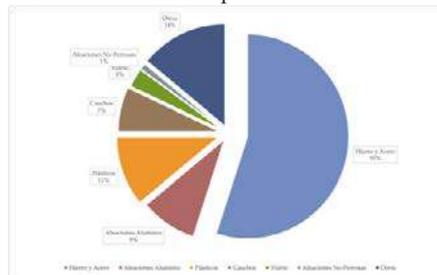
Para realizar las pruebas y métodos de ensayo se necesitaron de varios materiales donde se aplicaron las películas anticorrosivas de los distintos proveedores y herramientas que sirvieron de apoyo para preparar y pintar la superficie de los sustratos.

3.2.1. Elementos

Placas metálicas

Se destinaron este tipo de sustratos para los ensayos de adherencia y resistencia a la corrosión, ya que las normativas correspondientes a estos ensayos así lo especifican y recomiendan. Se utilizó planchas de tol negro de 1.5 milímetro de espesor, el cual cumple con la norma NTE INEN 115, y a su vez toma referencia la norma ASTM A568-13. Se seleccionó este material debido a la similitud de propiedades que posee con el acero utilizado para la elaboración de paneles para la industria automotriz.

Figura 3.1 Tipos de materiales utilizados para la manufactura de partes automotrices



Fuente: Modern material por automotive industry, 2017 [9]

Placas de vidrio

Se destinaron este tipo de sustratos para el ensayo de tiempo de secado, ya que la normativa que lo engloba así lo recomienda y especifica.

El material de vidrio proporciona una mayor apreciación visual al momento de realizar los ensayos gracias a la nitidez y claridad que ofrece este material.

3.2.2. *Imprimantes anticorrosivos*

Se utilizaron para las diferentes pruebas, tres anticorrosivos de diferentes proveedores los cuales poseen diferentes características de preparación. El proveedor número uno es una empresa internacional, la cual produce el anticorrosivo nacionalmente, es un producto con amplia comercialización en el país. El proveedor número dos es una empresa internacional, la cual exporta el producto finalizado al país, y es uno de los productos más utilizados en talleres de alta gama. El proveedor número tres es una empresa nacional la cual desarrolla y produce el anticorrosivo nacionalmente, es el producto más accesible de los tres utilizados en las pruebas.

Tabla 3.5 Porcentajes de mezclas para cada proveedor

PROVE EDOR	BASE	DILUYE NTE	ACTIVADOR (en % total de la mezcla)
1	4 partes	1 parte	-
2	2 partes	1 parte	10
3	4 partes	1 parte	-

Fuente: Autores

3.2.3. *Normativas*

Dentro del desarrollo de la investigación se llevo a cabo un proceso de selección de la normativa en la cuál se basará dicho estudio. La normativa fue seleccionada de un gran numero de las mismas que se encuentran detalladas en el reglamento RTE INEN 061 “Pinturas”

Tabla 3.2 Requisitos de pinturas

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1045	Pintura anticorrosiva. Esmalte alquídico brillante. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1544	Pinturas arquitectónicas. Pinturas al agua tipo emulsión (lútex) Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1042	Pinturas para señalamiento de tráfico. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2285	Pinturas: Barnices alquídicos de secamiento al aire. Requisitos.
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2094	Pinturas: Esmaltes alquídicos sintéticos para uso doméstico. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2095	Pinturas: Esmaltes alquídicos sintéticos para vehículos. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2286	Pinturas: Fondos nitro celulósicos para repintado en la industria Automotriz. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1043	Pinturas: Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1046	Pinturas: Imprimantes anticorrosivos con vehículo epóxico. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2281	Pinturas: Lacas acrílicas para repintado de vehículos. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2284	Pinturas: Lacas catalizadas al ácido, transparentes brillantes o mates para acabados sobre madera. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2283	Pinturas: Lacas nitro celulósicas para acabados sobre madera. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2280	Pinturas: Lacas nitro celulósicas para repintado de vehículos. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2287	Pinturas: Masillas nitro celulósicas y de poliéster. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1044	Pinturas: Recubrimientos anticorrosivos para altas temperaturas. Requisitos
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2282	Pinturas: Sellador nitro celulósico lijable para madera. Requisitos

Fuente: RTE INEN 061 (2012)

Se observan las diferentes normativas que rigen sobre las pinturas, para el desarrollo de la presente investigación se toma en cuenta el uso de dos normativas que poseen relación con el tema a desarrollar, estas son: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1043 Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico y Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1046 Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo epóxico. Existe una diferencia entre estas dos normativas la cual es que; la NTE INEN 1043 trabaja con un vehículo alquídico el cual hace referencia al imprimante anticorrosivo alquídico que se aplica sobre sustratos metálicos, mientras que la NTE 1046 trabaja con la aplicación de un vehículo epóxico el cual hace referencia al producto que se aplica sobre superficies plásticas.

Por esta razón y por el objetivo de la investigación se usa la normativa NTE INEN 1043 enfocada a la aplicación del imprimante anticorrosivo sobre un sustrato metálico

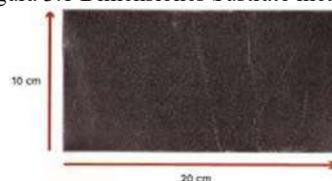
3.2.4. Nte inen 1043

Esta norma se aplica a los imprimantes anticorrosivos, elaborados con resina alquídica como vehículo y pigmentos inhibidores de corrosión, solos o combinados entre sí, los cuales se emplean como primera capa para el recubrimiento de superficies metálicas, a las que posteriormente debe aplicarse una capa de acabado con una base afín y que debe ser acondicionada previamente y expuesta a los ambientes No 3 y No 4. [5]

3.2.5. Probetas

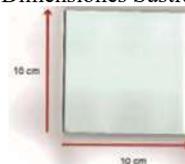
Se entiende como probetas o sustratos al material que se usó para la aplicación de las distintas películas anticorrosivas de los diferentes proveedores. Se utilizaron sustratos metálicos y de vidrio ya que son los especificados para realizar las pruebas y métodos de ensayo seleccionados.

Figura 3.1 Dimensiones Sustrato metálico



Fuente: Autores

Figura 3.2 Dimensiones Sustrato de vidrio



Fuente: Autores

3.2.6. Herramientas de pintado

Las herramientas de pintado que se usaron para llevar a cabo el pintado de los sustratos metálicos y de vidrio bajo sus diferentes procesos de preparación se describen a continuación:

Pintura anticorrosiva de proveedor N°1, N°2 y N°3.

Pistola aerográfica de gravedad

- Abrasivos.
- Desengrasante.
- Paño de microfibra.
- Lámpara de secado.

3.3. Procesos de preparación

Los sustratos metálicos donde se va a aplicar el anticorrosivo poseen diferentes métodos de preparación de las superficies, los procesos de preparación de los sustratos se llevaron a cabo en un ambiente controlado bajo las condiciones de trabajo ideales y altas normas de seguridad, fueron realizados por personal capacitado de los talleres de reparación y pintura. Dentro de esta preparación se denominan tres procesos que son los siguientes:

Proceso n°1

Se seleccionó este proceso ya que cumple con todos los pasos requeridos y sugeridos para realizar un pintado normal de chapa metálica, cumple con el control de calidad requerido asegurando que la capa de anticorrosivo aplicada brinde todas sus funciones de protección contra la corrosión. Este proceso debe ser el ideal y sugerido en todo proceso de repintado para garantizar una alta calidad y confiabilidad.

- Limpieza y desengrasado de alta calidad.
- Lijado con máquina excéntrica rotativa y abrasivos de N°180 y 320.
- Limpieza y desengrasado de alta calidad.
- Aplicación del anticorrosivo.
- Secado con lámpara infrarroja.

Proceso n°2

El segundo proceso a tomar en cuenta para ser desarrollado y aplicado en los sustratos metálicos posee solo dos pasos a realizar, es decir se omite el lijado sobre el metálico con abrasivo N°180 y 320 el cual como sabemos brinda una mejor adherencia y obviamente se omite la limpieza y desengrasado después de haber realizado el lijado del sustrato. Dicho proceso se lo tomó en cuenta para analizar y observar la calidad de prestaciones que brinda el anticorrosivo cuando no se lo aplica sobre una superficie lijada adecuadamente pero posee una limpieza y desengrasado de todo el sustrato de alta calidad, eliminando todas las impurezas de la superficie ya sea polvo, grasas, etc. De igual manera se examina la importancia que posee el lijado al momento de preparar el sustrato metálico para su posterior aplicación de anticorrosivo.

- Limpieza y desengrasado de alta calidad.
- Aplicación del anticorrosivo.
- Secado con lámpara infrarroja.

Proceso n°3

El último proceso a tomar en cuenta posee una preparación del sustrato de muy baja calidad, no posee ningún paso de limpieza y desengrasado, no se lleva a cabo un lijado del sustrato con el abrasivo respectivo, en este caso lo único que se realiza es una limpieza altamente deficiente mediante el uso de un guaípe, no se eliminan a profundidad residuos de polvo o grasas en la superficie del sustrato. Se realiza este proceso para analizar la respuesta que posee el anticorrosivo al momento de su aplicación sobre el sustrato y de igual manera, los efectos y fenómenos que se producen cuando se llevan a cabo a las pruebas de corrosión y adherencia, midiendo su resistencia frente a la corrosión y analizando los posibles resultados para poder compararlos con los resultados de los demás procesos de preparación

- Limpieza deficiente sin desengrasar.
- Aplicación del anticorrosivo.
- Secado con lámpara infrarroja.

Proceso n°4

Los sustratos que son destinados para las pruebas de tiempo de secado son de material de vidrio, este material brinda la capacidad de observar de mejor manera los resultados que se van a obtener, ofrece una alta capacidad de análisis mediante la observación.

El proceso no presenta alta complejidad pero a la vez la importancia de su realización trasciende en gran cantidad y relación al momento de la obtención de resultados.

- Limpieza y desengrasado.
- Aplicación del anticorrosivo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación se formularon varios procesos de preparación los cuales, están destinados hacia los sustratos metálicos y de vidrio que se usaron para llevar a cabo los distintos métodos de ensayo con sus respectivas pruebas, para cada método se destinaron un cierto número de sustratos con su nomenclatura correspondiente. Los procesos de preparación se estipulan y catalogan como N°1, N°2, N°3 y N°4.

Dentro del ensayo de corrosión se analizaron los 3 procesos de preparación de superficies metálicas que son los N°1, N°2 y N°3, comparándolos con los sustratos base que no han ingresado a la cámara salina, analizando de esta manera el nivel de resistencia a la corrosión. Por otro lado en el ensayo de adherencia se analizaron los 3 primeros procesos de preparación obteniendo el porcentaje de adherencia. De esta manera se estipula que los procesos de preparación de superficies metálicas son los N°1, N°2 y N°3.

Por último se especifica el proceso de preparación que está destinado exclusivamente para los sustratos de vidrio, estos sustratos fueron sometidos a las pruebas de tiempo de secado, y lleva como designación proceso de preparación N°4.

El presente estudio se basa en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1043 (2001) Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico.. El objeto de la norma menciona: Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico, que se utilizan como recubrimientos. [5]

En la normativa NTE INEN 1043 existen una serie de requisitos que deben cumplir dichos imprimantes los cuales son:

Tabla 4.1 Requisitos de los imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico.

REQUISITOS	UNIDAD	Tipo 1		Tipo 2		MÉTODO DE ENSAYO
		MIN	MAX	MIN	MAX	
Finura de dispersión	U. Hegman	3	-	3	-	NTE INEN 1007
Viscosidad a 25° C	U. Krebs	70	-	70	-	NTE INEN 1013
Sólidos por masa	% (m/m)					NTE INEN 1024
- Brillante		35	-	35	-	
- Mate		40	-	40	-	
Tiempo de secado	Horas					NTE INEN 1011
- Al tacto		-	4	-	4	
- Al manejo		-	8	-	8	
- Para repintar		-	24	-	24	
Sólidos por volumen	% (v/v)					NTE INEN 2092
- Brillante		25	-	25	-	
- Mate		30	-	30	-	
Adherencia, a 48 h de aplicación	%	90	-	90	-	NTE INEN 1006
Grados de sedimentación	-	8	-	8	-	NTE INEN 1609
Temperatura de servicio en seco	°C	-	60	-	60	ASTM D 2485
Flexibilidad (mandril cónico) a 25,4 - 38,1 um	%	26	-	26	-	NTE INEN 1002
Rendimiento a 25,4 um de espesor de película seca	m ² /l					** A
- Brillante		10	-	10	-	
- Mate		12	-	12	-	

* Los sólidos por volumen deben ser determinado a la viscosidad de presentación del producto
 ** Rendimiento = $\frac{\text{porcentaje sólido volumen} \times 10}{\text{Espesor seco en } \mu\text{m}}$

Fuente: NTE INEN 1043 (2001)

Los requisitos seleccionados para ser estudiados son el tiempo de secado, el porcentaje de adherencia y la resistencia frente a corrosión en un ambiente acelerado.

Estos requisitos son los que presentan más relevancia e importancia al momento de conocer el nivel de la capacidad de las funciones de las pinturas anticorrosivas. Dichas variables se las seleccionaron por recomendación de expertos en el tema, los cuales manifestaron que los ensayos que se realizan en base a estos requisitos son los más usados dentro del campo de investigación del rendimiento de las pinturas, anticorrosivos, barnices, lacas, etc.

4.1. PRUEBA DE ADHERENCIA NTE INEN 1006

Basada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1006 “Pinturas y productos afines. Determinación de adherencia mediante prueba de cinta” Mide el porcentaje de adherencia que posee la película aplicada de anticorrosivo sobre la superficie del sustrato metálico. [6] Dentro de este método de ensayo se van a destinar 3 muestras metálicas correspondientes a cada proceso de preparación descrito anteriormente con su respectivo tipo de anticorrosivo de cada proveedor, es decir que en este análisis se obtendrán resultados en un total 9 muestras o sustratos metálicos, el nivel de adherencia se medirá y calificará según el proceso de preparación de los sustratos, a continuación se muestran dichos sustratos membretados y organizados en base a su proceso de preparación.

Tabla 3.2 Sustratos y procesos de preparación para la prueba de adherencia

Proceso de Preparación N°1	Proceso de Preparación N°2	Proceso de Preparación N°3
Sustrato N°A1	Sustrato N°A2	Sustrato N°A3
Sustrato N°A4	Sustrato N°A5	Sustrato N°A6
Sustrato N°A7	Sustrato N°A8	Sustrato N°A9

Fuente: Autores

4.1.1. PRUEBA DE TIEMPO DE SECADO NTE INEN 1011

Basada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1011 “Pinturas y productos Afines. Determinación de los tiempos de Secamiento” La prueba de ensayo que corresponde al tiempo de secado posee varias sub-pruebas descritas dentro de normativa que se llevan a cabo para así conseguir los resultados deseados en relación a los tiempos de secamiento. [7] Las pruebas que se seleccionan poseen gran relación con las condiciones a las cuales esta expuesta normalmente la capa de pintura o de anticorrosivo. Los métodos de ensayo seleccionados son:

- Determinación del secamiento libre al tacto.
- Determinación del libre al polvo, método de la fibra de algodón.
- Determinación del tiempo libre de pegajosidad, método de papel.

Para cada método de ensayo se designa el sustrato correspondiente para poder realizar los análisis debidos, dichos sustratos por métodos de ensayo correspondientes obteniendo una mayor comprensión y facilidad de análisis.

Tabla 3.3 Sustratos y procesos de preparación para la prueba de tiempo de secado

Determinación del secamiento libre al tacto	Determinación del libre al polvo, método de la fibra de algodón	Determinación del tiempo libre de pegajosidad, método de papel
Sustrato N°T1	Sustrato N°T2	Sustrato N°T3
Sustrato N°T4	Sustrato N°T5	Sustrato N°T6
Sustrato N°T7	Sustrato N°T8	Sustrato N°T9

Fuente: Autores

4.1.2. PROCESO DE ENSAYO DE ATMÓSFERAS HÚMEDAS ASTM B117

Basado en ensayo ASTM B117 resistencia a la corrosión e intemperie acelerada. El presente ensayo es de carácter internacional el cuál brinda información muy valiosa y certificada; dentro del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) existe la normativa NTE INEN 1032 (1984). Pinturas anticorrosivas. Ensayo de la resistencia al intemperismo acelerado. La apreciación de la resistencia a la corrosión de los materiales se realiza con base en ensayos de laboratorio. Se valora cualquier característica del material, relacionada con la destrucción química desarrollada durante la acción del medio agresivo sobre la probeta.

La importancia de los datos sobre la resistencia a la corrosión para efectos prácticos en la industria se hace apremiante, debido a los altos costos asociados al fenómeno. Se recurre entonces a los ensayos acelerados de corrosión, los cuales suministran valiosa información para crear programas preventivos y de mantenimiento.

Los ensayos de laboratorio, llamados también ensayos rápidos se efectúan tratando de exagerar las condiciones de exposición que se presentan en servicio.

Entre los ensayos de laboratorio se encuentran los siguientes:

- Inmersión total o parcial.
- Ensayos de Simulación Atmosférica.
- Exposición a Vapores Nítricos.
- Atmosferas Húmedas.

El ensayo de laboratorio que se va a usar es el de Atmosferas húmedas, ya que el mismo tiene relación con el uso de la cámara salina el cuál es el equipo que posee la Escuela Politécnica Nacional en sus instalaciones.

Dicha prueba expresa lo siguiente: Este tipo de ensayos son especiales para simular condiciones en regiones tropicales por medio de condensación de agua, debido a cambios ostensibles de temperatura, y así estudiar efectos de agentes corrosivos que secos son inofensivos al metal. Entre los de este tipo se encuentran los ensayos de niebla salina (ASTM B117, 2018).

Dentro de la presente investigación los sustratos estarán expuestos a 250 horas, realizando los siguientes intervalos de tiempo para las revisiones respectivas, a las 50 primeras horas, después a las 150 horas y por último a las 250 horas.

Se designaron los sustratos correspondientes para cada objetivo planteado, se posee 3 sustratos por cada proceso de preparación con su respectivo proveedor, es decir, que para cada proveedor se designarán 9 sustratos metálicos con sus diferentes procesos de preparación respectivamente, llegando a obtener un total de 18 sustratos destinado para este método de ensayo.

Tabla 3.4 Sustratos y procesos de preparación para la prueba de resistencia a la corrosión

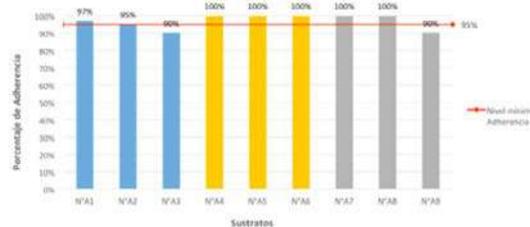
Proceso de Preparación / Objetivo	Proveedores		
	Nº1	Nº2	Nº3
Nº1 / Para comparación	Sustrato NºC1	Sustrato NºC4	Sustrato NºC7
Nº1 / Para ingresar	Sustrato NºC1.1	Sustrato NºC4.1	Sustrato NºC7.1
Nº1 / Para ingresar con marca X	Sustrato NºC1.2	Sustrato NºC4.2	Sustrato NºC7.2
Nº2 / Para comparación	Sustrato NºC2	Sustrato NºC5	Sustrato NºC8
Nº2 / Para ingresar	Sustrato NºC2.1	Sustrato NºC5.1	Sustrato NºC8.1
Nº2 / Para ingresar con marca X	Sustrato NºC2.2	Sustrato NºC5.2	Sustrato NºC8.2
Nº3 / Para comparación	Sustrato NºC3	Sustrato NºC6	Sustrato NºC9
Nº3 / Para ingresar	Sustrato NºC3.1	Sustrato NºC6.1	Sustrato NºC9.1
Nº3 / Para ingresar con marca X	Sustrato NºC3.2	Sustrato NºC6.2	Sustrato NºC9.2

Fuente: Autores

4.2. PORCENTAJE DE ADHERENCIA

El nivel mínimo de adherencia que debe presentar una película de anticorrosivo es del 95%, este nivel se lo tomó por recomendación de expertos en el tema que trabajan con dicho nivel para el desarrollo y utilización de sus pinturas anticorrosivas en las diferentes ampliaciones y usos que estos poseen, de igual manera dentro de la NTE INEN 1006 (1998) “Pintura y productos afines. Determinación de adherencia mediante prueba de la cinta”, se establece un nivel de confiabilidad del 95%.

Figura 4.1 Resultados porcentaje de adherencia



Fuente: Autores

Todos los resultados obtenidos dentro de este método de ensayo se calificaron y revisaron bajo los niveles estipulados dentro de la normativa.

Tabla 4.1 Resultados de porcentaje de adherencia

SUSTRATO	PROCESO DE PREPARACIÓN	COLOR	ADHERENCIA %	CALIFICACIÓN
N°A1	N°1	■	97%	✓
N°A2	N°1	■	95%	✓
N°A3	N°1	■	90%	✗
N°A4	N°2	■	100%	✓
N°A5	N°2	■	100%	✓
N°A6	N°2	■	100%	✓
N°A7	N°3	■	100%	✓
N°A8	N°3	■	100%	✓
N°A9	N°3	■	90%	✗

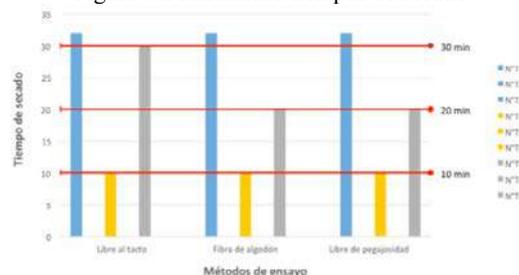
* Dentro de la columna de Calificación existen dos tipos:
 ** ✓ La marca "check" indica un porcentaje aceptable de adherencia sobre el sustrato.
 *** ✗ La marca "X" indica que no cumple con el nivel de adherencia requerido sobre el sustrato

Fuente: Autores

4.3. TIEMPOS DE SECADO

El método de ensayo de la determinación de los tiempos de secado se encuentra constituido por tres tipos de pruebas que se realizaron sobre la superficie de los sustratos de vidrio. Cada prueba se realizó en intervalos de tiempo de 10 minutos, dichos intervalos se los seleccionaron como límites para observar y comparar los resultados obtenidos.

Figura 4.2 Resultados tiempos de secado



Fuente: Autores

Cada método de ensayo se clasificó y calificó en base a sus intervalos de tiempo, y por proveedores con su color respectivo

Tabla 4.2 Resultados de tiempos de secamiento

SUSTRATO	COLOR	TIEMPO DE SECADO		
		1° INTERVALO	2° INTERVALO	3° INTERVALO
N°T1	■			> 30 min
N°T2				> 30 min
N°T3				> 30 min
N°T4	■	= 10 min		
N°T5		= 10 min		
N°T6		= 10 min		
N°T7	■			= 30 min
N°T8			= 20 min	
N°T9			= 20 min	

Fuente: Autores

4.4. PERDIDA DE MATERIAL

Al momento de realizar las mediciones de los pesos de cada sustrato se esperaba constatar una pérdida de peso, pero se obtuvieron resultados completamente diferentes. Los sustratos mostraron un aumento de peso ya que la solución salina (NaCl) que se acumuló en forma de burbujas y ampollas en la superficie de los sustratos con el paso del tiempo al interior del equipo de ensayo, pasaron de un estado líquido a un estado sólido de la materia y de esta manera el peso inicial de los sustratos aumentó. No todos los sustratos tuvieron una ganancia de peso, ciertos de los mismos manifestaron una pérdida de materia en relación a la película de anticorrosivo aplicada.

Tabla 4.3 Resultados de pesos finales de los sustratos

SUSTRATO	PROCESO DE PREPARACIÓN	PROVEEDOR	PESO INICIAL	PESO FINAL	IDENTIFICACIÓN	
					ADQUIRIDO	PERDIDO
N°C1.1	N°1	N°1	141,57g	142,45g	■	
N°C1.2	N°1			142,60g		
N°C2.1	N°2		142,55g	140,47g		■
N°C2.2	N°2			142,34g		■
N°C3.1	N°3		138,64g	140,29g	■	
N°C3.2	N°3			142,51g		
N°C4.1	N°1	N°2	139,78g	141,36g	■	
N°C4.2	N°1			140,08g		
N°C5.1	N°2		138,72g	137,91g		■
N°C5.2	N°2			137,07g		■
N°C6.1	N°3		136,34g	136,88g	■	
N°C6.2	N°3			141,04g		
N°C7.1	N°1	N°3	140,86g	142,94g	■	
N°C7.2	N°1			141,62g		
N°C8.1	N°2		141,40g	139,29g		■
N°C8.2	N°2			138,21g		■
N°C9.1	N°3		140,87	141,85g	■	
N°C9.2	N°3			138,29g		■

Fuente: Autores

4.5. TONALIDAD DEL ANTICORROSIVO

La variable de tonalidad hace referencia al método de ensayo de resistencia a la corrosión, en dicho ensayo se obtuvieron resultados para cada proveedor con sus diferentes tipos de preparación de superficie.

El proveedor N°1 al cabo de las 250 horas de ensayo muestra un deterioro considerable no tan agresivo, ya que la formación de todas sus imperfecciones han colaborado con la transformación del color original negro mate en un tono muy opaco con ciertas tonalidades azuladas pálidas y verdosas. La formación de óxido en la superficie se ha ido tornando de ciertos colores entre anaranjados claros muy intensos hasta marrón oscuro con apariencia de quemado en ciertas zonas. Dichas afectaciones van aumentando mientras el proceso de preparación no es tan complejo.

El proveedor N°2 revela resultados más favorables en cuanto a la resistencia a la corrosión este presenta. Las superficies de los sustratos muestran una alta resistencia a la corrosión ya que el color original del anticorrosivo no se perdió, se obtuvo una tonalidad opaca de otras tonalidades que perjudiquen la tonalidad original.

El proveedor N°3 en relación a la tonalidad no muestra una alta resistencia a la corrosión ya que el color original negro mate se perdió por completo mostrando tonalidades azuladas opacas y

pálidas con falta de vitalidad. La formación de óxido sobre la superficie aumenta mientras el proceso de preparación es menos complejo, de esta manera se obtuvieron tonos muy agresivos de oxido que van desde colores anaranjados claros e intensos hasta tonos marrones oscuros con destellos de verde consiguiendo una apariencia muy acabada y algo podrida. Sobre la superficie de estos sustratos se observan destellos de tono brillante asemejando una apariencia de cristalización en la película de anticorrosivo aplicada.

Tabla 4.4 Conservación del color original del anticorrosivo en el ensayo de resistencia a la corrosión.

SUSTRATO	PROVEEDOR	CONSERVACIÓN DEL COLOR					
		50 HORAS		150 HORAS		250 HORAS	
		SI	NO	SI	NO	SI	NO
N°C1.1	N°1		X		X		X
N°C1.2			X		X		X
N°C2.1			X		X		X
N°C2.2			X		X		X
N°C3.1			X		X		X
N°C3.2			X		X		X
N°C4.1			✓		✓		X
N°C4.2			✓		X		X
N°C5.1		N°2		X		X	
N°C5.2			X		X		X
N°C6.1			X		X		X
N°C6.2			X		X		X
N°C7.1			✓		X		X
N°C7.2			X		X		X
N°C8.1	N°3		X		X		X
N°C8.2			X		X		X
N°C9.1			X		X		X
N°C9.2			X		X		X

* Dentro de la columna de Conservación del color existen dos tipos de calificaciones:
 ** ✓ La marca "check" o "marca de verificación" indica que el sustrato conserva su color original.
 *** X La marca "X" indica que el sustrato no conserva su color original.

Fuente: Autores

4.6. TEXTURA DE LA PELÍCULA DE ANTICORROSIVO

El proveedor N°1 al cabo de las 250 horas se observar un comportamiento agresivo ya que muestra imperfectos como la creación de burbujas, ampollas y desprendimiento de pintura en ciertas zonas de la superficie brindado una textura completamente irregular, se observa que las nubes de óxido poseen una textura agresiva muy sensible al tacto perdiendo por completo la textura lisa y fina que poseía. El proveedor N°2 muestra una respuesta positiva al momento de controlar el ataque de la solución salina La textura muestra la formación únicamente de diminutas burbujas a lo largo de las superficies brindando una textura arenosa en un nivel medio de sensibilidad al tacto. En los diferentes procesos de preparación a lo largo de los sustratos no existe la formación de burbujas ni ampollas de gran tamaño ni mucho menos desprendimientos. Los resultados obtenidos por el proveedor N°3 muestran una afectación altamente agresiva a la textura de la superficie de los sustratos, obteniendo una respuesta negativa frente a la resistencia de la corrosión. Las superficies muestran la formación de burbujas y ampollas de gran tamaño completamente secas y otras reventadas con apariencia de. Con el paso del tiempo la película de anticorrosivo muestra un desprendimiento de la capa de pintura en ciertas zonas.

Tabla 4.5 Daños en la textura de los sustratos metálicos del ensayo de resistencia a la corrosión.

SUSTRATO	PROVEEDOR	DEFECTOS / ANOMALIAS					
		BURBUJAS		AMPOLLAS	REVENTADOS	DESPRENDIMIENTO	CUARTEAMIENTO
		DIMINUTAS	GRANDES				
N°C1.1	N°1	X	✓	X	X	X	X
N°C1.2		X	✓	X	X	X	X
N°C2.1		✓	✓	X	✓	X	X
N°C2.2		✓	✓	✓	X	X	X
N°C3.1		X	✓	✓	X	X	X
N°C3.2		✓	✓	✓	X	X	X
N°C4.1		✓	X	X	X	X	X
N°C4.2		✓	✓	X	X	X	X
N°C5.1		N°2	✓	✓	X	X	X
N°C5.2	✓		✓	X	X	X	X
N°C6.1	✓		✓	X	X	X	X
N°C6.2	✓		✓	X	X	X	X
N°C7.1	X		✓	✓	X	X	X
N°C7.2	✓		✓	✓	✓	✓	X
N°C8.1	N°3	✓	✓	✓	✓	✓	X
N°C8.2		✓	✓	✓	✓	✓	X
N°C9.1		X	✓	✓	✓	✓	X
N°C9.2		X	✓	✓	✓	✓	✓

* Dentro de la columna de Defectos / Anomalías existen una serie de variables que se marcarán con los siguientes símbolos en caso de presentar o no dichos daños y defectos
 ** ✓ La marca "check" o "marca de verificación" indica que se presentó un defecto o anomalía.
 *** X La marca "X" indica que se presentaron este tipo de defectos o anomalías.

Fuente: Autores

Los resultados de textura difieren del proceso de preparación de los sustratos, es decir, que con un proceso menos complejo la afectación es mayor y el cambio de textura es más notable.

4.7. TIEMPO DE SECADO EN LOS ENSAYOS REALIZADOS DE FORMA VISUAL

El proveedor N°1 muestra una respuesta de tiempo de secado mayor a 30 minutos, revelando en las pruebas los siguientes resultados. Dentro de la prueba de tiempo libre al tacto dejó 3 huellas de dedo en la superficie, de igual manera en la prueba de la fibra de algodón, las fibras que se depositaron en los intervalos de 10 minutos todas quedaron adheridas después de haber soplado, y por último el uso del cilindro de acero mostró un alto nivel pegajosidad en el papel de ensayo al momento de ser retirado dejando marcas de la forma del cilindro indicando que la pintura no se encontraba completamente seca después de un tiempo de espera mayor a 30 minutos.

El proveedor N°2 reveló resultados favorables y aceptables dentro de los parámetros establecidos. La película de anticorrosivo se secó por completo al concluir los primeros 10 minutos, no se obtuvo ninguna huella de la punta del dedo, ninguna fibra de algodón adherida a la superficie del sustrato y mucho menos marcas del cilindro de acero en el papel de ensayo usado en esta prueba.

El proveedor N°3 presentó un tiempo estimado de secado entre los 20 y 30 minutos de espera. La primera prueba mostró huellas de la punta del dedo en la superficie estableciendo de esta manera un tiempo de secado de 30 minutos para esta prueba, mientras que para las siguientes pruebas de fibra de algodón y nivel de pegajosidad mostró un tiempo de secado de 20 minutos. La película de anticorrosivo brindada por el proveedor N°3 posee un tiempo de secado entre 20 y 30 minutos.

Tabla 4.6 Resultados de los tiempos de secado observación visual.

SUSTRATO	PROVEEDOR	INTERVALOS DE TIEMPO DE SECADO			CALIFICACIÓN		
		1*	2*	3*	BUENO	REGULAR	MALO
N°T1	N°1			> 30 min			✓
N°T2				> 30 min			✓
N°T3				> 30 min			✓
N°T4	N°2	= 10 min			✓		
N°T5		= 10 min			✓		
N°T6		= 10 min			✓		
N°T7	N°3			= 30 min			✓
N°T8			= 20 min			✓	
N°T9			= 20 min			✓	

* Dentro de la columna de Calificación existen tres tipos los cuales se seleccionarán con la siguiente
 ** ✓ La marca "check" o "marca de verificación" indica la calificación del comportamiento del sustrato y su proveedor

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- Las pinturas anticorrosivas seleccionadas para realizar los distintos tipos de análisis mostraron respuestas tanto positivas como negativas al término de la ejecución de los métodos de ensayo, constatando de esta manera que ciertos productores y distribuidores de pinturas anticorrosivas a nivel nacional, muestran fallas frente a dichas pruebas seleccionadas de la normativa INEN 1043. El comportamiento de dos de los tres proveedores seleccionados, N°1 y N°3 específicamente evidenciaron un número mayor de respuestas negativas frente a los ensayos realizados mientras que por otro lado el proveedor N°2 mostró una amplia cantidad de respuesta positivas frente a dichos ensayos. Comprobando así que no todos los imprimantes anticorrosivos distribuidos a nivel nacional cumplen con una cierta parte de las especificaciones estipuladas por el INEN evidenciando una mayor cantidad de fallas que aciertos en las diferentes pruebas.
- La exposición constante a un entorno corrosivo intenso, en este caso la deposición de solución salina causó un deterioro altamente agresivo en un total de 12 sustratos destinados de los proveedores N°1 y N°3 ya que las capas de anticorrosivo evidencian un daño mayor constituido por la formación de burbujas, ampollas, reventados, desprendimientos y

cuarteamientos de pintura; que los 6 sustratos restantes del proveedor N°2, los cuales revelan una textura levemente afectada con únicamente la formación de diminutas burbujas a lo largo de su superficie sin presencia de las demás anomalías que alteren la textura. En estos sustratos correspondientes al proveedor N°2 se observa una conservación del color original del anticorrosivo con ciertos tonos opacos frente a los otros dos proveedores que muestran una pérdida total del color original negro mate obteniendo un color azulado claro con destellos que van desde anaranjado claro intenso hasta tonos marrón oscuro, por la formación de óxido, con una pigmentación verdosa brindando una apariencia descompuesta y altamente afectada, obteniendo así una respuesta negativa en relación a la resistencia a la corrosión por parte de los 12 sustratos de los proveedores N°1 y N°3.

- Los productos en los cuales existía más componentes en la preparación del mismo, tuvieron un tiempo de secado más corto, es decir un 66,66% menos que el tiempo en que tardaron en secarse los productos que no poseían más de componentes en su mezcla como lo son el proveedor N°1 y N°3. Esto se debió a que en presencia de un activador, como en el caso del segundo proveedor, se acelera la reacción, mientras que en los otros proveedores había una diferenciación en cuanto a partes de base y diluyente, donde la que tuvo mejor resultado fue la que tenía mayor parte de diluyente, ya que este se evapora más rápido, secando así la mezcla.

6. REFERENCIAS

[1] SIMANCAS, J.; MORCILLO, M. Factores condicionantes de la durabilidad de los sistemas de pinturas anticorrosivas sobre acero en exposiciones atmosféricas. Revista de Metalurgia, [S.l.], v. 34, n. Extra, p. 132-136, may 1998. ISSN 1988-4222.

[2] KEANE, J.D. AISCEng.J., Enero, 1971, 6.

[3] Tecnología de pinturas y recubrimientos : componentes, formulación, manufactura y calidad / Carlos A. Giudice y Andrea M. Pereyra. 1a ed. - Buenos Aires : Edutecne, 2009.

[4] CESVIMAP. 2013. Pintado de automóviles. Ávila. España: Cevvimap.

[5] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1043:2001 Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico. Requisitos (INEN) (Aprobación 2001-03-28). Registro Oficial No. 381 de 2001-08-01.

[6] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1006:98 Pinturas y productos afines. Determinación de adherencia mediante prueba de la cinta (INEN) Aprobación 1995-06-01). Registro Oficial No- 325 de 1998-05-26

[7] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1011:1984 Pinturas y productos afines. Determinación de los tiempos de secamiento (INEN) (Aprobación 1982-03-03). Registro Oficial No. 660 de 1984-01-12.

[8] ASTM B117. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus (ASTM Internacional) 201

[9] Hovorun, T. P., Berladir, K. V., Pererva, V. I., Rudenko, S. G. y Mrtyno, A. I. 2017. Modern materials for automotive industry. Sumy State University, Sumy, Ucrania.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bosch, R. 2005. Manual de la técnica del automóvil. Alemania.
- Gómez, M. T., García, J. J., Casado, A. E., Navarro, J. M., y Gracia, J. G. 2013. Protección de superficies. Madrid. España: Ediciones Paraninfo, SA.
- Gómez, M. T., García, J. J., Casado, A. E., Navarro, J. M., y Gracia, J. G. 2013. Igualación y Protección de superficies. Madrid. España: Ediciones Paraninfo, SA.
- Gómez, M. T., García, J. J., Casado, A. E., Navarro, J. M., y Gracia, J. G. 2013. Pintado de vehículos. Madrid. España: Ediciones Paraninfo, SA.
- Castro, M. 1999. Reparación de Carrocerías. Barcelona. España: Ediciones Ceac.
- Gil, H. 2001. Biblioteca de Carrocería y Pintura Carrocería: Verificación y reparación. Barcelona. España: Ediciones Ceac.
- Gil, H. 2001. Biblioteca de Carrocería y Pintura y guarnecidos interiores. Barcelona. España: Ediciones Ceac.
- CESVIMAP. 2013. Pintado de automóviles. Ávila. España: Cesvimap.
- CESVIMAP. 2010. Preparación de superficies. Ávila. España: Cesvimap.
- Gómez, M. T., García, J. J., Casado, A. E., Navarro, J. M., y Gracia, J. G. 2005. Carrocería Elementos fijos. Madrid. España: Thomson Paraninfo.
- Gómez, M. T., García, J. J., Casado, A. E., Navarro, J. M., y Gracia, J. G. 1998. Elementos fijos. Madrid. España: Editorial Paraninfo.
- Parks, D, W., 2009. Manual de reparación de Carrocerías y Pintura automotriz. D.F. México: LIMUSA.
- Domínguez, A. B. (2001). La revolución industrial : Algunos logros de la ingeniería. Recuperado de: <https://www.mdconsult.internacional.edu.ec:2095>
- Fernández, D. R. M., Sánchez, T. R., & Lucas, G. B. (2018). Corrosión. Recuperado de: <https://www.mdconsult.internacional.edu.ec:2095>
- Calvo, C. J. (2014). Pinturas y barnices : Tecnología básica. Recuperado de: <https://www.mdconsult.internacional.edu.ec:2095>
- Hovorun, T. P., Berladir, K. V., Pererva, V. I., Rudenko, S. G. y Mrtyno, A. I. 2017. Modern materials for automotive industry. Sumy State University, Sumy, Ucrania.
- Singh, M. K. 2016. Application on Steel in automotive industry. UETA. ISSN 2250 – 2459, ISO 9001:2008 Certified Journal.
- Steel Market Development Institute. 2011. America Iron and Steel Institute – SDMI Light Vehicle Steel Content. Ducker WorldWide. PH: 248-644-0086.
- ASTM B117. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus (ASTM Internacional) 2018.
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 061:2012 “Pinturas” (INEN).
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1043:2001 Pinturas. Imprimantes anticorrosivos con vehículo alquídico. Requisitos (INEN) (Aprobación 2001-03-28). Registro Oficial No. 381 de 2001-08-01.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 0997:1983 Pinturas y productos afines. Definiciones (INEN) (Aprobación 1981-07-08). Registro Oficial No. 650 de 1983-12-29.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1011:1984 Pinturas y productos afines. Determinación de los tiempos de secamiento (INEN) (Aprobación 1982-03-03). Registro Oficial No. 660 de 1984-01-12.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1006:98 Pinturas y productos afines. Determinación de adherencia mediante prueba de la cinta (INEN) Aprobación 1995-06-01). Registro Oficial No- 325 de 1998-05-26.

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS GASOLINAS SÚPER Y ECOPAÍS MEDIANTE UN CICLO TÍPICO DE CONDUCCIÓN PARA TAXIS DE LA CIUDAD DE CUENCA

Torres, Francisco¹; Coello, Mateo²; Rockwood, Robert³; Vidal, Edison⁴; Inga, Víctor⁵

^{1,2,3} Ergon-Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador.

^{4,5} Egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador

Autor de correspondencia: ftorres@uazuay.edu.ec, mcoello@uazuay.edu.ec, rockwood@uazuay.edu.ec.

RESUMEN

La persistencia de los combustibles fósiles como fuente energética en el sector transporte constituye un trascendental problema para el Ecuador, con consecuencias energéticas, ambientales y económicas. Por ello, algunas políticas nacionales contemplan la mezcla de biocombustibles en una de las gasolinas más empleadas. En concordancia, resulta importante evaluar el rendimiento de las gasolinas comercializadas bajo condiciones locales de operación. Así, empleando las dos gasolinas comercializadas para uso automotriz: ecopaís (con mezcla de bioetanol) y súper (sin mezcla de bioetanol), un vehículo con un motor de combustión interna de encendido por chispa, 1,5 l SOHC, relación de compresión de 9,5:1, potencia máxima de 83 hp @ 5600 RPM y torque máximo de 128 Nm @ 3000 RPM, y un ciclo de conducción que refleja el comportamiento de los vehículos con mayor recorrido: ciclo de taxis para la ciudad de Cuenca; es evaluado el rendimiento de ambas gasolinas a través de un flujómetro y de un banco dinamométrico. Los resultados son específicos para el motor empleado y no pueden generalizarse para todos los motores de combustión interna de encendido por chispa. En consecuencia, se precisa un rendimiento y un costo/recorrido mayores para la gasolina súper respecto a la gasolina ecopaís, en márgenes de un 11% y un 28,08% respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Etanol, ciclo de conducción, gasolina, rendimiento de combustible, flujómetro.

EVALUATION OF EFFICIENCY ON ECOPAIS AND SUPER FUELS USING A LOCAL TAXI DRIVING CYCLE

ABSTRACT

Persistent use of fossil fuels in Ecuador's transport area is an important problem with energy, environmental and economical consequences. For this reason, national policies contemplate biofuel blends to be used in one of the most used gasoline. Consequently, is very important evaluate fuel efficiency using local operating conditions. In this case, were evaluated two gasoline types used by automotive area: ecopais (with ethanol blend) and super (without ethanol blend); also, was used a local driving cycle that shows operation of the most travelled vehicles: local taxis and a vehicle with below engine characteristics: spark-ignition engine, 1,5 l SOHC, compression ratio: 9,5:1, maximum power: 83 @ 5600 RPM and maximum torque: 128 Nm @ 3000 RPM. Materials for this experiment were a flow meter and a chassis dynamometer. Results cannot be similar to other spark-ignition engines and correspond only to analysis engine. Consequently, results show better efficiency and price/travel for super fuel. It means 11% and 28.08 respectively.

KEY WORDS: Ethanol, driving cycle, gasoline, fuel performance, flow meter.

1. INTRODUCCIÓN

El sector transporte a nivel global genera una demanda energética mayor al 50% de la cual el transporte terrestre contempla el mayor porcentaje (INER, 2014). El Ecuador no es la excepción, puesto que un 44,2% de la demanda energética se debe a este sector, con una constante dependencia de combustibles fósiles (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015). A nivel nacional, la demanda de gasolinas y diésel premium presentó una proyección mayor para el 2017 respecto al 2016, a pesar de que otros derivados proyectaban ligeras reducciones. Ese incremento en la demanda tanto de gasolinas como diésel premium significó alrededor de 1 200 millones de dólares de inversión según el informe estadístico enero-diciembre 2017 de Petroecuador (2018).

Como es notorio, el uso de combustibles fósiles constituye algunos de los trascendentales problemas que debe afrontar la humanidad en nuestra era; por ejemplo, el consumo de energía, incluido el transporte, es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes acidificantes (Edenhofer et al., 2011).

Son numerosos los estudios cuyos objetivos se centran en encontrar alternativas para sustituir al petróleo y disminuir sus efectos negativos sobre el medio ambiente; sumándose la adopción de políticas gubernamentales enfocadas en la necesidad de generar biocombustibles como una fuente de energía alternativa, de tal forma que puedan ir sustituyendo el empleo de los hidrocarburos y más que nada, ser replicadas alrededor del mundo.

Es así que, Awad y et al. (2018) verificaron las implicaciones en la potencia de freno y en el consumo específico de combustible al freno, cuando se varía el contenido de humedad en la mezcla con combustible fósil. Odziemkowska y et al. (2016) determinaron que el bioetanol mezclado en porcentajes entre un 5 y un 30%; deterioró las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los combustibles, por lo que investigaron algunos aditivos para mejorar ciertas propiedades. Roayaei y Taheri (2009) concluyeron que, al agregar etanol en un 10% a la gasolina, el rendimiento general del motor se incrementa entre un 5 a 10%, provocado básicamente por el aumento en el índice de octano de la mezcla (encendido). Shifter y et al. (2018) dan a conocer, dentro de su caso, que el motor puede encenderse estable con mezclas E10, E20 y E45, aunque para el E85, el ralenti presenta inestabilidad debido a una mezcla aire-combustible demasiado pobre; todo ello con base al ciclo de conducción FTP- 75.

En tanto, citando los casos de algunos países; en Brasil, Suecia y Estados Unidos, en el año 2011 circulaban seis millones de vehículos con sistemas que toleraban mezclas de biocombustibles (etanol/gasolina) de hasta 85% (Serna et al., 2011). Para el caso ecuatoriano, las políticas gubernamentales establecen el uso de biocombustibles (etanol) mezclados con gasolinas, inicialmente en un 5%, con un aumento progresivo de hasta un 10%.

En consecuencia, del creciente parque automotor determinado en 2'056 213 de unidades vehiculares, 968 900 unidades corresponden a automóviles cuya demanda energética es principalmente gasolinas (AEADE, 2018). Dicho consumo para el año 2014, significó un consumo energético de 17.228 KBEP (kilo barriles equivalentes de petróleo) o su equivalente a 812 millones de galones, es decir, un 40.5 % de la demanda total energética del sector transporte (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015).

Así, los procesos de estimación de consumo energético y análisis de emisiones contaminantes se basan en ciclos de conducción, es decir; en patrones que describen la manera típica en la que un vehículo es conducido en un lugar específico. Estas representaciones están basadas en gráficas de la velocidad en función del tiempo y responden a estimaciones con parámetros ambientales, de tráfico y otras propias al lugar de estudio. En el Ecuador, las entidades que aplican ciclos de conducción para la homologación vehicular son entidades públicas como la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) o el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). Sus procedimientos engloban ciclos de conducción internacionales, procesos que no se consideran los más óptimos para representar las condiciones locales (Dávalos, 2017).

Por ende, con el propósito de analizar de una manera más representativa la eficiencia en el consumo de combustible y otros parámetros de rendimiento, entre un carburante mezclado con etanol vs. un carburante sin mezcla; resulta necesario aplicar condiciones locales para definir el análisis. Consecuentemente, el presente estudio emplea un ciclo de conducción local: “Ciclo de conducción para los vehículos de la unión de taxistas del Azuay”; considerando que los taxis son los vehículos que tienen mayor recorrido dentro de las ciudades y que, el ciclo planteado reúne factores propios de la ciudad de Cuenca como la distribución de tránsito y la variación topográfica (Dávalos, 2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los materiales empleados en la presente investigación fueron: 1) flujómetro, 2) dinamómetro de chasis, 3) computadora, 4) vehículo, 5) combustible, 6) módulo GPS, 7) balanza digital. Véase Figura 1.

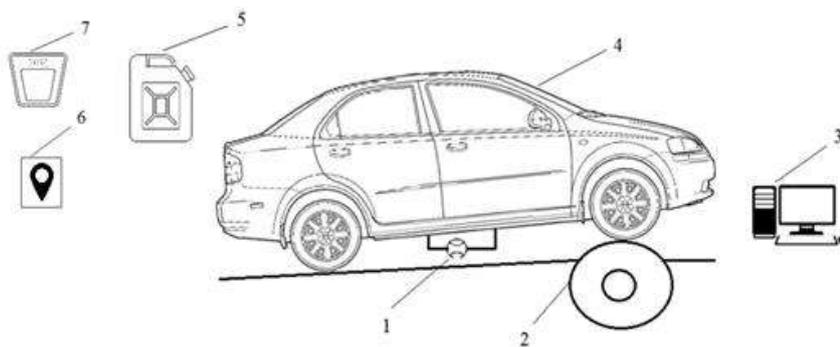


Figura 1. Equipo usado para el estudio

El flujómetro (1) permite medir el caudal instantáneo de combustible directamente de la línea de alimentación, corresponde a la marca MAX, modelo P213 MS11NA-A11C-0, con una presión máxima tolerable de 3000 psi. Está instalado luego del depósito de combustible y antes del riel de inyección. El dinamómetro de chasis (2) permite simular el ciclo de conducción específico para el estudio, con tolerancias de más de 1 200 caballos de fuerza a velocidades de hasta 225 mi/h (362 km/h); corresponde a la marca Superflow, modelo AutoDyn30. Este equipo cuenta con su respectivo software que permite ingresar las variables deseadas y revisar los resultados de las pruebas mediante una interfaz amigable con el usuario (4). El sistema de

adquisición de datos puede coordinar la entrada de la señal de hasta 76 sensores, incluidas temperaturas y presiones; mediante datos analógicos o digitales. La lectura de datos de entrada se genera a 1,2 kHz. y el registro de datos se da a 100 Hz. Las principales pruebas que se pueden realizar son de aceleración y deceleración controlada, estado estacionario y carga de carretera.

El vehículo (4) corresponde a un sedán con capacidad para cinco pasajeros, marca Chevrolet, modelo Aveo Family, motor de 1,5 litros, año 2012, con una relación de compresión de 9.5:1, torque máximo de 128 Nm @ 3 000 rpm, potencia máxima de 86 Hp @ 5 600 rpm, neumáticos 185/60 R14, masa de 1 365 kg.y una capacidad del depósito de combustible de 45 l.

El combustible (5) corresponde a los dos tipos de gasolinas comercializadas en el medio para uso automotriz. El primer combustible es la gasolina ecopaís, con un nivel de octanaje de 85 RON y un contenido de 5% en volumen de etanol. En tanto, la segunda gasolina se trata de la denominación súper, con un nivel de octanaje 90 RON y sin contenido de etanol. Las propiedades de ambos combustibles están regidas por la norma ecuatoriana INEN: NTE 935-GASOLINAS, y no fueron sometidas a un análisis de octanaje por método alguno; pudiendo variar por diversos factores, entre ello, según la altitud en la que el estudio fuese realizado. El combustible es almacenado de dos maneras: mediante el depósito del vehículo y a través de un depósito externo.

El módulo GPS (6) empleado es de marca VBOX, modelo Sport. Cuenta con batería autónoma, puede ser usado como un registrador independiente para medir el rendimiento del vehículo o los tiempos por vuelta, pudiendo ser conectado a un dispositivo iOS a través de Bluetooth para ver resultados en tiempo real. Registra datos con una frecuencia de 20Hz, registro de tarjeta SD, con seis horas de autonomía y una resolución de 0,01 km/h.

La balanza digital (7) permite pesar el depósito externo de combustible antes y después de las pruebas. El propósito es estimar el consumo de combustible mediante un método físico y así verificar la información proporcionada por el flujómetro

2.2 Métodos

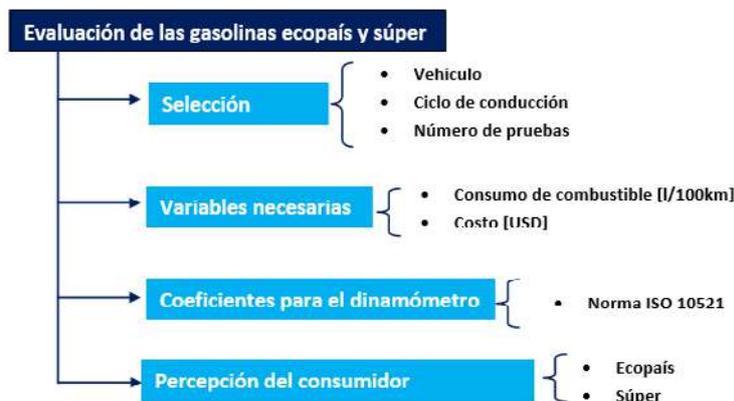


Figura 2. Secuencia metodológica para la realización del estudio

Tal como lo indica la Figura 2, la fase inicial consiste en la selección de: el vehículo, el ciclo de conducción, los combustibles y el número de pruebas a realizar. Una vez definidos esos parámetros, se procede a identificar las variables necesarias para comparar el consumo de combustible entre las gasolinas establecidas; tomando como emisores de variables los materiales mencionados previamente. Seguidamente, el dinamómetro requiere ser ajustado bajo las condiciones reales de funcionamiento; por ello, es necesaria la obtención de ciertos coeficientes que intervienen en las fuerzas opositoras al movimiento del vehículo. Finalmente, es posible realizar las siguientes fases del estudio: recopilación de datos, el análisis de datos, la percepción del consumidor, y la generación de resultados.

2.2.1 Selección del vehículo.

La categoría vehicular que mayor número de unidades vendidas registra es la de “automóviles”, puesto que entre sus características estos vehículos pueden usarse en condiciones urbanas y de carretera, y por su amplitud son una clase de vehículo familiar. Para centrar aún más el análisis a las condiciones locales; el vehículo seleccionado corresponde al modelo Aveo Family, marca Chevrolet; puesto que es el más vendido con 333 unidades en el 2015 dentro de su categoría en la provincia del Azuay (AEADE, 2015). El vehículo posee un motor de combustión interna de encendido por chispa, 1,5 l SOHC, inyección electrónica multipunto, encendido por chispa perdida, relación de compresión de 9,5:1, potencia máxima de 83 hp @ 5600 RPM y torque máximo de 128 Nm @ 3000 RPM; por lo que los resultados obtenidos se relacionan únicamente con las características del motor objeto de estudio.

2.2.2 Selección del ciclo de conducción

El ciclo de conducción utilizado corresponde a uno específico para la ciudad de Cuenca, el cual reúne características específicas de tráfico, topográficas y de conducción. Dicho ciclo es obtenido de la investigación “Obtención de un ciclo típico de conducción para los vehículos de la unión de taxistas del Azuay” (Dávalos, 2017), cuyo autor determina que ese ciclo fue creado para los taxis de la ciudad de Cuenca, puesto que son los vehículos que tienen mayor recorrido dentro de las ciudades y los datos recabados pueden contribuir a la realización de análisis sobre el consumo energético en rutas urbanas de Cuenca. De dicho estudio se desprende que los taxis recorren un promedio de 200 km. diarios, con períodos de manejo de 18 horas diarias, con desplazamientos urbanos, extra-urbanos y rutas variables. De ese modo, son determinados tres ciclos de conducción según la distancia de las carreras: cortas, medias y largas. Las distancias corresponden a 1,78 km., 3,53 km. y 6,60 km. respectivamente.

Si se considera que el Plan de Movilidad de la Ciudad de Cuenca (2015) menciona que la parte céntrica de la ciudad presenta una caída poblacional, en tanto que sectores correspondientes a las parroquias periféricas muestran incrementos poblacionales entre un 70% y 50 %; es posible precisar que el 77% de los viajes que se realizan principalmente desde las parroquias rurales de la ciudad hacia la parte urbana, se hacen en vehículo privado, dejando un 23% al transporte público. Como es notorio en la Figura 3, la unidad sectorial que concentra la mayor cantidad de viajes de destino es el Centro Histórico con un 26% o más de 120.000 viajes; seguida de El Ejido con un 14%. Las zonas que también registran un alto número de viajes, aunque en menor

escala son las zonas circundantes al Centro Histórico, dejando una menor proporción a las parroquias periféricas de la ciudad.

Así, las distancias recorridas se enfocan hacia el centro urbano de la ciudad desde las parroquias adyacentes, por lo que conforme el promedio de distancia recorrido en ciudades intermedias que es de 3,9 km (CGLU, 2014), es posible seleccionar el ciclo de conducción de “carreras medias” propuesto por Dávalos (2017).

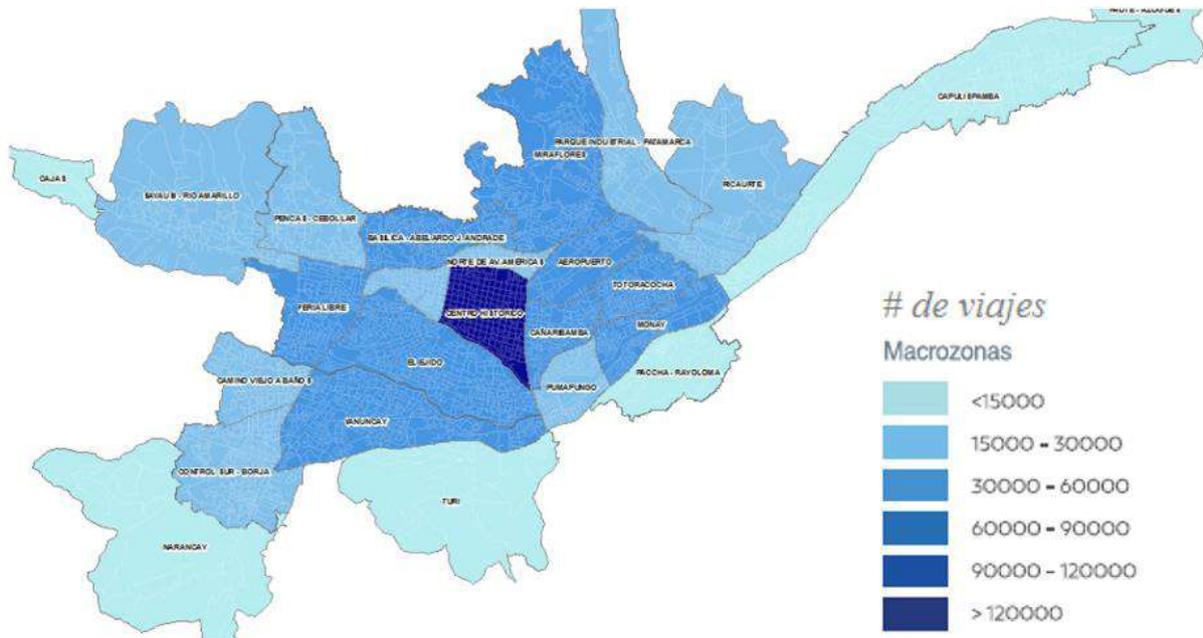


Figura 3. Viajes destino en la ciudad de Cuenca
Fuente: (Plan de Movilidad de Cuenca, 2015)

Dentro de las principales características del ciclo de conducción seleccionado para carreras medias, destacan: una distancia de 3,53 km, una velocidad promedio de 26,04 km/h y un tiempo total de recorrido de 489 segundos o su equivalente a 8,15 minutos. Véase Tabla 1.

2.2.3 Selección del número de pruebas.

Para garantizar el resultado de las mediciones y verificar que el número de las pruebas realizadas es el suficiente, es considerada una distribución de probabilidades “normal”, con un intervalo de confianza del 95%. Con fundamento en el proceso detallado por Maurat y Galarza (2017), se parte de un número de pruebas realizadas para cada combustible (10 en este caso) y aplicando la fórmula (1) se determina el número de pruebas representativo, que debe coincidir dentro del rango planteado (10 pruebas):

$$n = \frac{(Z^2 * S^2)}{(E^2)} \tag{1}$$

Dónde:

n: número de muestras.

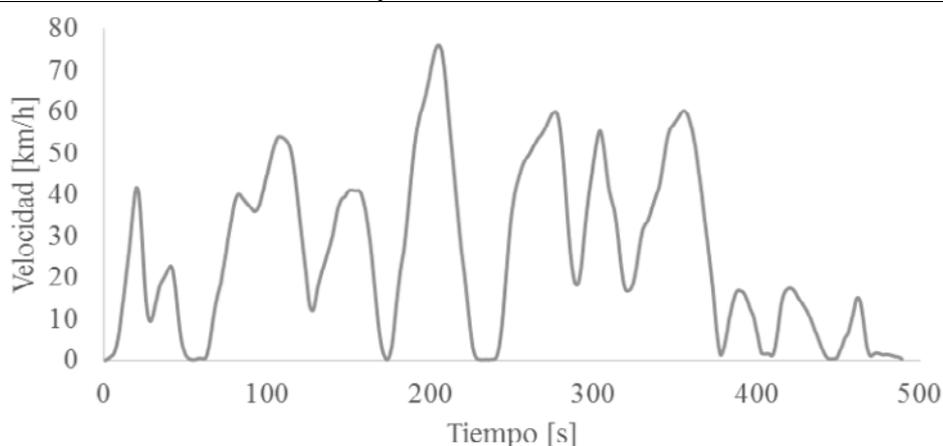
Z: nivel de confianza del estudio para un 95% ($Z=1,96$).

S: desviación estándar de la población.

E: error de la estimación

El número de pruebas determinado por el modelo matemático dio una (1) para ecopaís y cuatro (4) para súper; por lo que las diez pruebas realizadas por cada tipo de combustible garantizan el número de pruebas representativo

Tabla 1. Ciclo de Conducción de Taxis para Cuenca: carreras medias



Parámetro	Especificación
Velocidad promedio	26,04 km/h
Velocidad máxima	76,14 km/h
Tiempo total de recorrido	489 seg.
Distancia de recorrido	3,53 km
Aceleración máxima (+)	1,38 m/s ²

Fuente: (Dávalos, 2017)

2.2.3 Variables necesarias

Las variables necesarias para evaluar las gasolinas están basadas en los siguientes parámetros: consumo de combustible, posicionamiento y masa. La Tabla 2 detalla las variables proporcionadas por cada equipo.

Tabla 2. Variables requeridas en el estudio

Parámetro	Equipo	Variable proporcionada	Variable calculada
Consumo de combustible	Flujómetro	Tiempo de prueba: [min], Consumo: [l/100km], [l] Potencia: [kW].	Costo por prueba: [USD] [-]
Potencia	Dinamómetro	Velocidad [km/h], Tiempo de prueba: [min].	Coefficientes fuerzas opositoras al movimiento At', Ad', As': [-]
Posicionamiento	GPS	Velocidad: [km/h] Tiempo [hh:mm:ss]	Coefficientes fuerzas opositoras al movimiento At, Ad, As: [-]
Masa	Balanza digital	Masa: [g]	Volumen: [l]

2.2.4 Determinación de los coeficientes para el dinamómetro

Un vehículo que circula en carretera debe vencer cuatro fuerzas: Arrastre (F_d), Rodadura (R_x), Pendiente (R_g) y la Inercia (R_i). Para la medición del consumo de combustible mediante el dinamómetro de chasis, se deben configurar los coeficientes conocidos como “A, B, C”, mismos que representan las fuerzas mencionadas anteriormente. En consecuencia, los coeficientes Ad' , Bd' y Cd' (Tabla 3) son los requeridos para realizar las pruebas en el dinamómetro simulando el ciclo de conducción de taxis para la ciudad de Cuenca. La obtención de los coeficientes estuvo basada en la norma ISO 10521, apartados 1 y 2; procedimiento que especifica la secuencia para la determinación de los coeficientes en mención.

Tabla 3. Coeficientes según norma ISO 10521

Tipo de prueba	Coefficiente obtenido	Valor
ISO 10521-1 Carretera	At	389,031
	Bt	2,051
	Ct	0,039
ISO 10521-2 Dinamómetro	Ad	194,515
	Bd	0,410
	Cd	0,039
	As	316,10
	Bs	5,30
	Cs	-0,01
	Ad'	267,441
Bd'	-2,839	
Cd'	0,089	

2.2.5 Encuestas a los consumidores

Fueron elaboradas encuestas hacia los consumidores para conocer la utilización y la percepción de éstos sobre el rendimiento, las ventajas y las desventajas de los dos combustibles: ecopaís y súper. Fue considerada una muestra de 130 encuestas, con un tamaño de la población de 90 000 vehículos (número de vehículos a gasolina en Cuenca), con un error muestral del 5%.

3. RESULTADOS

3.1 Percepción del consumidor

La percepción del consumidor fue realizada mediante encuestas a través de dos métodos: encuestas personales en los exteriores de las gasolineras y formularios digitales disponibles en internet. El mayor porcentaje de entrevistados poseía la categoría “automóviles” con un 55%, seguido de “todoterrenos” con un 31%, “taxis” con un 10% y “camionetas” con un 8%. El 78% de los encuestados emplea gasolina ecopaís y un 22% gasolina súper.

Las principales razones para emplear gasolina ecopaís corresponden a: costo (85,5%), cuidado del medio ambiente (5,76%), cuidado del motor (3,84%), rendimiento (3,84%) y otros (0,96%). Por otra parte, los conductores deciden usar gasolina súper por los siguientes motivos: cuidado del motor (50%), rendimiento (40%), costo (6,6%) y otros motivos no especificados (3,3%). Ninguno de los encuestados relacionó el combustible súper con un beneficio para el medio ambiente.

Los consumidores creen que la gasolina súper tiene un mayor rendimiento según la proporción [l/Km], esto corresponde a un 84,32%. En cambio, un 8,2% cree que la gasolina ecopaís tiene un mayor rendimiento, en tanto que un 7,4% piensa que no existe variación alguna.

Del mismo modo, un 43,28% de los entrevistados opina que la mezcla de etanol con gasolina de origen fósil es una acción negativa o perjudicial para el rendimiento del motor o para el cuidado del mismo, mientras que un 40,29% cree que la adición de etanol no ha generado variación significativa alguna, y un 16,41% de consumidores cree que la adición del biocombustible genera aspectos positivos.

En torno al criterio de daños en el motor del vehículo, más de la mitad afirma que la gasolina ecopaís genera algún tipo de daño en su motor (56,71%), mientras que un 26,86% opina que no es generado daño alguno y un 16,41% manifiesta no saber las repercusiones o una respuesta.

A pesar de que la mayoría de entrevistados emplea gasolina ecopaís, recomienda gasolina súper (78,35%), mientras que un poco menos de la cuarta parte recomienda gasolina ecopaís (21,65%). Las principales razones por las que los conductores recomiendan la gasolina súper, son: cuidado del motor (45,71%), rendimiento (43,80%), cuidado del medioambiente (6,66%) y costo (3,80%). En tanto, aquellos que recomiendan ecopaís lo hacen por el costo (79,31%), beneficios para el medioambiente (17,24%) y para apoyar la producción nacional de etanol (3,44%).

3.2 Consumo de combustible

La Figura 4 indica que los incrementos máximos de velocidad durante el recorrido generan los mayores picos en el consumo de combustible ecopaís; específicamente, al alcanzar velocidades entre los 75 km/h y los 60 km/h (200 y 250 seg.). Para ambos casos, los picos no se alcanzan en el punto de velocidad máxima, sino en el incremento de velocidad para alcanzar las mencionadas velocidades. El pico más alto corresponde a los 200 seg. con un consumo de 2 ml/seg. El promedio de consumo de combustible para ecopaís fue de $0,191 \pm 0,01$ l ó 5,405 $\pm 0,01$ l/100km.

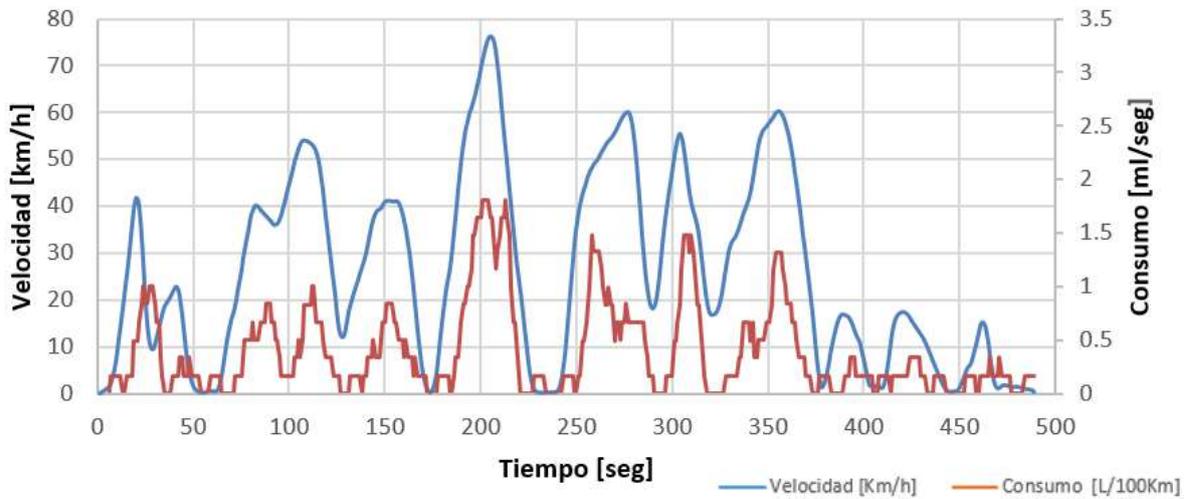


Figura 4. Gráfica Velocidad-Tiempo-Consumo: ecopaís

En tanto, para la gasolina súper, la Figura 5 indica que los picos en el consumo de combustible presentan una mínima dispersión si son relacionados con los incrementos de velocidad; lo que determina una homogeneidad en el consumo de combustible. En tanto, se puede notar que los picos en el consumo se generan durante las fases de incremento de velocidad, aunque se registran valores poco dispersos de consumo a altas velocidades, tal como es notorio a los 200 y 250 segundos. En consecuencia, los valores máximos de consumo de combustible son de 1, 25 ml/seg. El promedio de consumo de combustible es $0,17 \pm 0,048$ l o $4,805 \pm 0,049$ l/100km.

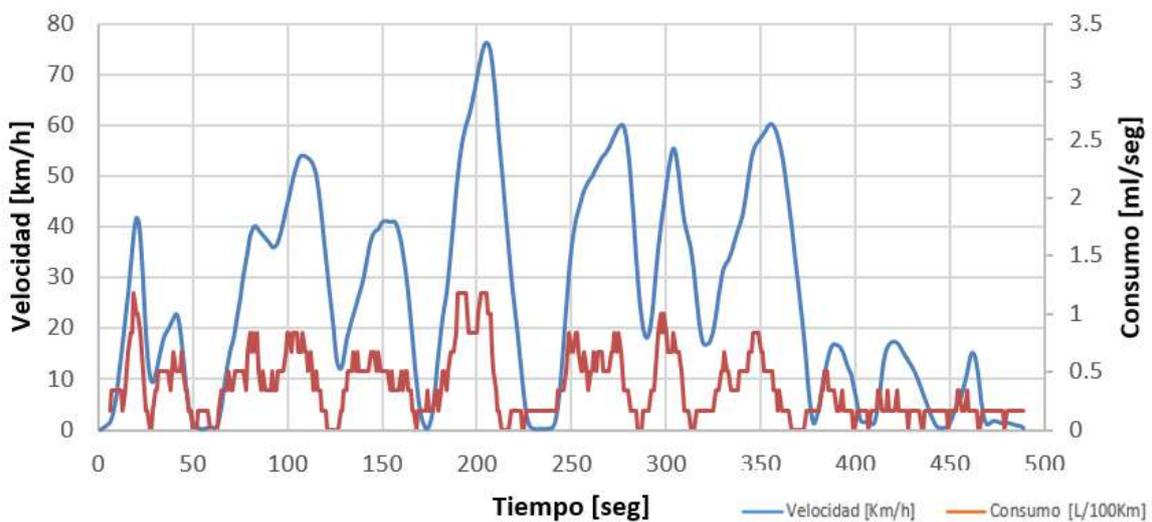


Figura 5. Gráfica Velocidad-Tiempo-Consumo: súper

3.3 Costos

Si son considerados los precios anteriores para ambas gasolinas (1,48 USD para ecopaís y 2,30 USD para súper), es posible afirmar que empleando ecopaís el costo/ciclo sería de 0,07 USD y con súper el costo/ciclo sería de 0,10 USD, es decir, una variación del 28%.

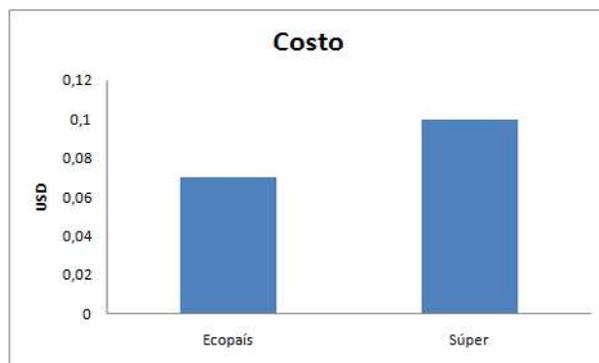


Figura 6. Variación de costos precios anteriores

Por otro lado, si son considerados los precios actuales para ambas gasolinas (1,85 USD para ecopaís y 2,98 USD para súper); con ecopaís el costo/ciclo es de 0,09 USD y con súper el costo/ciclo es de 0,13 USD, es decir una variación del 30,76%.

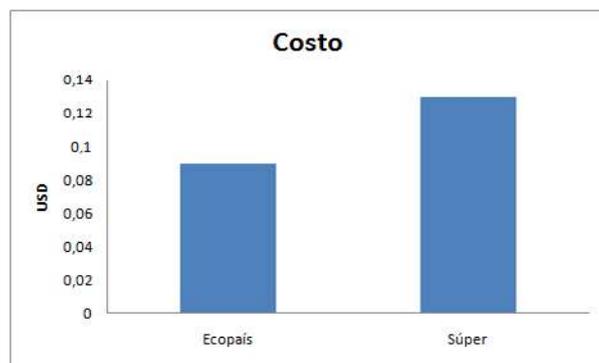


Figura 7. Variación de costos precios actuales

La Tabla 4 compara los costos: diarios, mensuales y anuales, generados por el uso de las gasolinas ecopaís y súper, considerando tanto los precios al momento de la realización de las pruebas como los precios actuales (enero 2019). Para dicho análisis es considerado un recorrido diario de 36,6 km para un vehículo particular y un recorrido de 200 km para un vehículo tipo taxi (Urgilés y Erreyes, 2018).

Tabla 4. Estimación de costos en dólares americanos para cada gasolina

Costo (realización pruebas)									
Caso	Distancia recorrida/día	Costo/día		Costo/semana		Costo/mes		Costo/año	
		<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>
Particular	36,6	0,77	1,04	5,37	7,26	23,02	31,10	280,05	378,44
Taxi	200	4,19	5,67	29,35	39,66	125,78	169,97	1530,31	2067,99
Costo (enero 2019)									
Caso	Distancia recorrida/día	Costo/día		Costo/semana		Costo/mes		Costo/año	
		<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>	<i>Ecopaís</i>	<i>Súper</i>
Particular	36,6	0,93	1,35	6,53	9,44	27,99	40,44	340,60	491,97
Taxi	200	5,10	7,37	35,69	51,56	152,97	220,96	1861,19	2688,39

Finalmente, es posible afirmar para cualquiera de los casos que la variación en el consumo de combustible es un 11,1% favorable para súper. Para la categoría “automóviles”, el consumo anual con ecopaís es de 723,238 l y con súper de 642,952 l. Para “taxis”, el consumo anual con ecopaís es de 3945,650 l y con súper de 3507,65 l.

4. CONCLUSIONES

Los coeficientes requeridos para la realización de las pruebas en el banco dinamométrico fueron obtenidos satisfactoriamente a través de las especificaciones detalladas en la norma ISO 10521-2006: Carga para vehículos: 1. Determinación bajo condiciones atmosféricas, 2. Realización en dinamómetros de chasis.

El proceso de medición de consumo de combustible estuvo basado en el ciclo de conducción de taxis para la ciudad de Cuenca, llevado a cabo en un dinamómetro de chasis. Para la determinación del consumo de combustible, fueron realizadas 10 pruebas para la gasolina ecopaís y 10 para la gasolina súper; satisfaciéndose la determinación de muestras a tomar mediante el modelo matemático correspondiente. El consumo de combustible/ciclo fue determinado mediante un flujómetro de combustible instalado en la línea de alimentación de gasolina, luego del filtro de combustible y antes del riel de inyectores.

Fue evaluado el rendimiento de combustible en Litros [l] y Litros cada 100 kilómetros [l/100 km] de un vehículo Chevrolet Aveo Family 1,5 l, siguiendo un ciclo de conducción de taxis para la ciudad de Cuenca (3,53 km) y utilizando como fuente de combustible las dos gasolinas de uso comercial: súper y ecopaís. El consumo de combustible promedio para la gasolina ecopaís fue de $0,19 \pm 0,01$ l ó $5,4 \pm 0,01$ l/100km; en tanto que, para la gasolina súper, el consumo de combustible promedio fue de $0,17 \pm 0,048$ l ó $4,805 \pm 0,049$ l/100km; lo que supone una variación del 11,1% con un mayor rendimiento para la gasolina súper.

Para la gasolina ecopaís, los mayores picos en el consumo de combustible son generados durante los incrementos máximos de velocidad del recorrido, es decir, durante la fase de aceleración para alcanzar la velocidad máxima y no durante la permanencia de dicha velocidad. Para la gasolina súper, aunque los valores máximos de consumo también se registran durante la fase de aceleración para alcanzar las velocidades máximas del ciclo, existe una menor dispersión entre el valor máximo de consumo versus el valor promedio; lo que significa que los picos en el consumo de combustible se generan a una menor escala de volumen.

El costo promedio por ciclo de conducción (3,53 km) fue determinado en 0,07 USD para la gasolina ecopaís y en 0,10 USD para la gasolina súper, considerando los precios/galón vigentes durante la realización de las pruebas: 1,48 USD para ecopaís y 2,30 USD para súper. Es decir, existe una variación del 28,08% con un costo mayor para la gasolina súper. Si son considerados los nuevos precios de las gasolinas: 1,85 USD para ecopaís y 2,98 USD para súper, se generan los siguientes precios por ciclo de conducción: 0,09 USD para ecopaís y 0,13 USD para súper, o una variación del 30,76%.

Si se considera un recorrido diario de 36,6 km para un vehículo tipo particular y de 200 km para un vehículo tipo taxi; el consumo anual de combustible sería de 723,23 l (191,33 gal) con ecopaís ó 642,95 l (170,09 gal) con súper para un vehículo particular, en tanto que para un

vehículo tipo taxi el consumo sería de 3945,65 l (1043,82 gal) con ecopaís y 3507,65 l (927,94 gal) con súper.

Bajo la misma consideración de recorrido/día, y si son considerados los precios de los combustibles al momento de la realización del presente estudio (precios anteriores); se puede determinar: a) el costo de desplazamiento/año de un vehículo particular, estimado en 280,05 USD con gasolina ecopaís y en 378,44 USD con gasolina súper, es decir una variación de 98,39 USD, b) el costo de desplazamiento/año de un vehículo tipo taxi, estimado en 1530,31 USD con gasolina ecopaís y en 2067,99 con gasolina súper, es decir, una variación de 537,68 USD. Para este caso, únicamente fueron analizados los costos generados por consumo de combustible, discriminándose costos de mantenimiento, impuestos, entre otros.

Para los precios vigentes de las gasolinas (enero 2019), los costos serían: a) el costo de desplazamiento/año de un vehículo particular, estimado en 340,60 USD con gasolina ecopaís y en 491,97 USD con gasolina súper, es decir una variación de 151,37 USD, b) el costo de desplazamiento/año de un vehículo tipo taxi, estimado en 1861,59 USD con gasolina ecopaís y en 2688,39 con gasolina súper, es decir, una variación de 827,20 USD.

Las propiedades de los combustibles muestreados no fueron comprobadas, suponiendo que cumplen con las especificaciones determinadas en la norma INEN 935: Gasolinas.

Los consumidores optan en su mayoría por la gasolina ecopaís (77,62%) debido al factor costo (85,5%), considerando escasamente otros motivos. En tanto, dentro de los demandantes de gasolina súper (22,38%), priman dos criterios: cuidado del motor (40%) y rendimiento (50%), dejando casi nulo el criterio de costo. Para ambos casos de preferencia de combustible, los conductores consideran en muy pequeña cantidad los beneficios medioambientales que una determinada gasolina puede generar, más bien catalogan que la adición de etanol en la gasolina extra genera una disminución de calidad (43,28%) o ninguna variación (40,29%), por lo que atribuyen mayores prestaciones en cuanto a rendimiento a la gasolina súper (84,32%) y catalogan que la gasolina ecopaís sí genera daños en el motor (56,71%). A pesar de que la mayoría emplea ecopaís, a la vez recomienda súper.

Aunque la percepción de los consumidores se enfoca a un rendimiento mucho mayor de la gasolina súper respecto a la gasolina ecopaís, el presente estudio muestra una variación del 11% favorable para la gasolina súper; ventaja volumétrica que supone un costo mayor del 28,08% de manera comprobada con los precios anteriores de la gasolina súper, aunque el costo sería un 30,76% mayor para los precios actuales. Por ello, resulta necesaria la utilización del combustible adecuado conforme la relación de compresión del motor, además de la calibración acorde a la altitud a la cual se va a circular, teniendo presente que estudios indican un comportamiento similar de la gasolina ecopaís respecto a la extra en cuanto a parámetros de torque, potencia y consumo específico de combustible.

5. REFERENCIAS

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. AEADE. (2015). *Sector Automotor en Cifras*. Diciembre 2015. Ecuador. (Documento digital).
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. AEADE. (2018). *Sector Automotor en Cifras*. Julio 2018. No. 22. Ecuador. (Documento digital).
- Awad, O., Ali, O., Hammid, Ali., Mamat, R. (2018). Impact of fuel oil moisture reduction on the fuel properties and combustion characteristics of SI engine fuels with gasoline-fusel oil blends. *Renewable energy*.(Documento digital).
- Dávalos, D. (2017). *Obtención de un Ciclo Típico de Conducción para los vehículos de la Unión de Taxistas del Azuay*. Tesis de Maestría. Universidad del Azuay. Cuenca Ecuador. (Documento digital).
- Edenhofer, O, Pichs, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., et al. (2011). Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *IPCC*. (Documento digital).
- Instituto Ecuatoriano de Eficiencia Energética y Energías Renovables. INER. (2014). *Eficiencia energética en el transporte*. Quito, Ecuador. (Documento digital).
- International Organization for Standardization. ISO. (2006) Norma 10521-2006: Road vehicles: 1. Determination under reference atmospheric conditions, 2. Reproduction on chassis dynamometer. (Documento digital).
- Maurat, W., Galarza, C. (2017). *Evaluación del consumo específico de combustible y de emisiones de gases de escape, con el uso del combustible Eco-país en un motor de combustión interna alternativo*. Tesis de Pregrado. Universidad del Azuay. Ecuador. (Documento digital).
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2015). *Balance Energético Nacional*. Ecuador. (Documento digital)
- Odziemkowska, M., Matuszewska, A., Czarnoka, J. (2016). Diesel oil with bioethanol as a fuel for compression-ignition engines. *Applied Energy*. Disponible en Science Direct.com. (Documento digital)
- Petroecuador. (2018). *Informe estadístico enero diciembre 2017*. Jefatura Corporativa de Planificación. Información Provisional. Ecuador. (Documento digital).
- Plan de Movilidad y Espacios Públicos. (2015) Municipalidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. (Documento Digital).
- Roayaei, E., Taheri, K. (2009). Test ruin evaluation of a blend of fuel-grade ethanol and regular commercial gasoline: its effect on engine efficiency and exhaust gas composition. *Clean Tech Environ Policy*. No.11 pp 385-389. (Documento digital)
- Schifter, I., González, U., Díaz, L., Rodríguez, R., Mejía-Centeno, I., González-Macías, C. (2018). From actual ethanol contents in gasolina to mid-blends and E85 in conventional

- technology vehicles. Emission control issues and consequences. *Fuel*. 219. pp 239-247. Disponible en Science Direct. com. (Documento digital)
- Serdar, H., Cesu, Y., Tolga, T., Cinar, C., Okur, M. (2006). Effect of ethanol–gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Applied Thermal Engineering*. 26. pp 2272-2278.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. INEN. (2016). *Productos derivados del petróleo. Gasolina. Requisitos*. NTE INEN 935 9na. Revisión. 2016 -02. Norma Técnica Ecuatoriana. Ecuador. (Documento digital)
- Urgilés, L., Erreyes, J. (2018). *Análisis del combustible ecopaís en emisiones contaminantes y prestaciones de un vehículo Chevrolet Grand Vitara como prototipo en la ciudad de Cuenca*. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador

Desarrollo y aplicación de metodología para ejecutar ensayo dinámico de volcadura de autobús interprovincial autoportante, utilizando HyperWorks®

(Development and application of a methodology for performing Rollover test of a long-distance bus coach, using Altair HyperWorks®)

Cepeda, Jorge¹

1. Laboratorio Acreditado de Ensayos Estructurales de Carrocerías, Corporación Ingeniería Avanzada COINAV del Ecuador S.A., Ambato, Ecuador, EC180108

Correspondencia: +593 98 763 6463, jorge.cepeda@coinav.com

RESUMEN

En el Ecuador, el volcamiento de autobuses de transporte público es uno de los peores tipos de accidentes que pueden ocurrir. Debido a la cantidad de pasajeros que utilizan este servicio, los daños provocados por el volcamiento de un autobús son usualmente graves y severos. La conformidad con las normas de seguridad respecto de volcamiento de autobuses de corta y larga distancia es mandatoria por ley en el Ecuador. Dichas normas de seguridad se basan en normativas europeas y norteamericanas que se basan en principios científicos poco conocidos en países como el Ecuador. En la actualidad, organismos de regulación ecuatorianos como la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) entre otros, comprueban que los autobuses que salen de las fábricas productoras cumplan dichas normas a través de empresas especializadas en simulación de ingeniería como lo es COINAV S.A. El presente trabajo constituye un acercamiento científico que demuestra técnicamente la ejecución de simulaciones de pruebas de vuelco en el país, en autobuses autoportantes, los cuales constituyen el tipo de autobuses de diseño e ingeniería más avanzados que se construyen en el Ecuador, y permite fundamentar la técnicamente la reducción de pruebas físicas de componentes y la realización de pruebas de autobuses completos mediante modelos de elementos finitos validados.

PALABRAS CLAVES Volcadura; bus autoportante; Análisis por elementos finitos; simulación no lineal

ABSTRACT

In Ecuador, bus rollover is one of the worst vehicle accidents that can occur among public transportation. Due to the large numbers of passengers, the damages caused by bus rollover are often serious and severe. The compliance with rollover safety standards for buses and coaches is mandated by law. Safety standards are often based on North American and European principles that rely on specialized scientific principles rarely known in countries like Ecuador. Nowadays, Ecuadorian organisms in charge of law regulation such as Agencia Nacional de Tránsito (ANT) among others, supervise the compliance of standards in bus structures out of manufacturer plants. ANT requires technically approved and fully-experienced companies to perform simulations in a reliable manner, such as COINAV S.A.

The present paper represents a scientific approach which technically demonstrates the capability of Ecuadorian companies and engineering centers to perform rollover simulation tests with realistic results, applied in Boogie buses, which are the most important current of bus design around the world and allows to base the technical reduction of physical tests of components and the realization of tests of complete buses by validated finite element models. This study is protected by Ecuadorian copyright laws.

KEY WORDS Rollover; boogie buses; Finite element analysis; nonlinear simulation

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de autobuses de pasajeros como medio de transporte masivo constituye una de las formas de movilización más utilizadas e importantes en nuestro país. Las estadísticas demuestran que más de un tercio de la población ecuatoriana utilizan este medio de transporte a diario, tanto para movilizaciones cortas, como de media y larga distancia [4]. Diversos estudios y autores resaltan las bondades de la utilización de un sistema de transporte donde una gran cantidad de personas recorren rutas similares, utilizan una cantidad de recursos energéticos finitos y hacen que dichos recursos energéticos se canalicen de mejor manera que si se utilizara un vehículo a motor por cada pasajero [5].

Sin embargo, un tema de importancia capital respecto a la transportación terrestre es el de la seguridad de los ocupantes de las unidades de transporte. En los últimos tiempos, varios accidentes de tránsito han enlutado las carreteras ecuatorianas, lo cual ha reabierto el debate respecto de la seguridad de las unidades que circulan en las mismas. Las normas existentes, creadas por comités técnicos especializados, exigen la aplicación de pruebas originarias en normas europeas [6]. Dicha aplicación requiere de la puesta en práctica de principios científicos y técnicos poco aplicados en el país, dado que la rama de la ciencia involucrada, el Análisis Dinámico No-lineal utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés), no ha sido desarrollada a los niveles requeridos por la envergadura de la necesidad en el Ecuador.

Específicamente, y dentro de los principales tipos de colisiones en los que se ven involucrados los vehículos móviles y los autobuses como tema principal de análisis, la volcadura o volcamiento genera preocupación debido al alto índice de personas gravemente heridas que se suscitan cuando ocurre [5]. Es por ello que la Comunidad Europea, dentro de varios programas de investigación [7], ha estudiado el fenómeno y ha determinado que la intrusión de miembros estructurales en el habitáculo del autobús es el mecanismo más peligroso de daño a los usuarios [1, 8]. Con esta información y con la visión de evitar consecuencias fatales en accidentes que involucren volcamiento se generó el reglamento europeo R66, "Resistencia de la superestructura de vehículos de transporte de pasajeros", que ha sido adoptado por la norma ecuatoriana NTE INEN 1323:2009 para su aplicación obligatoria en el país. Dicha norma estipula que se debe hacer volcar efectivamente un autobús, otorgando la posibilidad de que el bus sea una estructura física completa o parcial, o un modelo de elementos finitos, igualmente representando una estructura completa o parcial [9].

Los autobuses autoportantes constituyen la tendencia de diseño reinante en la actualidad, en cuando a la construcción de autobuses de mediana y larga distancia, dado que ofrece ventajas sobre los autobuses de chasis completo:

- Libertad de elección de distancia entre ejes
- Disponibilidad de chasis apropiados para autobús, con suspensiones de diseño avanzado y comodidad superior para los pasajeros
- Mejor manejo de espacio disponible en el diseño del autobús

En contraparte, los retos que presenta el diseño y construcción de autobuses autoportantes son:

- Importancia crítica de diseño estructural, con la necesidad de tener un conocimiento cabal de las zonas que podrían presentar fallas estructurales.
- Aplicación de refuerzos en zonas clave, para evitar fallos estructurales.
- Optimización estructural que permita que el peso de la estructura sea contenido, sin comprometer su comportamiento estructural.

El diseño y construcción de autobuses autoportantes en el Ecuador es novedoso. Hasta hace 5 años, en el Ecuador no se había incursionado en el campo mencionado, ni desde el punto de vista investigativo ni desde la construcción de autobuses.

Se propone el presente estudio del fundamento técnico, científico y metodológico para la simulación dinámica no-lineal del volcamiento de estructuras de autobuses como un aporte para sentar las bases de ingeniería de diseño y simulación que permitan en el futuro el desarrollo de autobuses de mayor envergadura.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. El Método de Elementos Finitos para análisis dinámicos.

El Método de Elementos Finitos (FEM, Finite Element Method, por sus siglas en inglés) es usado como una herramienta efectiva para simular el comportamiento de partes de geometría compleja ante fenómenos de impacto [1, 3], debido a que provee una manera efectiva de medir las distribuciones de esfuerzos y deformaciones unitarias, muy difíciles de obtener de otra manera [4, 5]. En las siguientes líneas se presenta el fundamento matemático del estudio propuesto.

B. Fundamento técnico-científico del Método de Elementos Finitos para análisis dinámicos.

En los análisis dinámicos, una excitación transitoria es una carga altamente dinámica y dependiente del tiempo aplicada sobre un componente, en este caso, un impacto. La ecuación gobernante del sistema es [6]:

$$\mathbf{K}\mathbf{D} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} = \mathbf{F}$$

que se conoce como la *Ecuación de Movimiento de Newton* [7]. La matriz \mathbf{M} corresponde a la matriz global de masa, la matriz \mathbf{K} corresponde a la de rigidez global del sistema, \mathbf{C} es la matriz de coeficientes de amortiguamiento (determinados experimentalmente) y \mathbf{D} es el vector de todos los desplazamientos de todos los nodos del sistema.

1) Método de Integración.

Dada la naturaleza de la ecuación y del fenómeno, se requiere un procedimiento de solución diferente al que se usa en análisis estáticos, que se conoce como método de integración directa [2, 15].

El método de integración directa utiliza el método de diferencias finitas para resolver la ecuación de movimiento de Newton, dividiendo el tiempo de solución en pasos (time stepping, por su terminología en inglés) [14]. A su vez, el método de integración directa se divide en dos corrientes: implícito y explícito.

2) Métodos implícitos y explícitos.

Los métodos implícitos son generalmente más eficientes para fenómenos relativamente lentos. En contraste, los métodos explícitos son muy eficientes para fenómenos relativamente rápidos, como el de impacto. Dentro de los métodos explícitos, el más conocido es el algoritmo de Diferencias Finitas Centradas [13, 14], en el cual se calculan iterativamente las aceleraciones, velocidades y desplazamientos a partir del punto inicial y la condiciones iniciales:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{D}} = \mathbf{F} - (\mathbf{K}\mathbf{D} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{D}}) = \mathbf{F} - \mathbf{F}^{\text{int}} = \mathbf{F}^{\text{residual}} \quad (1)$$

despejando $\ddot{\mathbf{D}}$ se tiene

$$\ddot{\mathbf{D}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}^{\text{residual}} \quad (2)$$

La solución en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones se obtiene sin resolver ninguna ecuación matricial sino repitiendo las ecuaciones anteriores en un proceso iterativo. Por ésta razón, el manejo del tiempo en éste tipo de métodos es extremadamente rápido, el código es relativamente sencillo [7] y es particularmente útil para simular eventos altamente no lineales que involucren grandes deformaciones, contactos y que se desarrollen en un lapso de tiempo muy reducido [10, 11]. Es importante recordar que no se utilizan todos los términos de la Serie expandida de Taylor. En este caso, los tres primeros son usados para la variación del desplazamiento. Esto significa que el desplazamiento es parabólico, la velocidad es lineal y la aceleración es constante en el lapso del intervalo de tiempo (time step, por su terminología en inglés) [8].

C. Simulación de cargas.

El sistema estructural en análisis soporta cargas tanto constantes como variables en el tiempo [1, 2, 12]. Las cargas variables son aquellas cuya magnitud puede cambiar en el transcurso del tiempo del análisis estructural. Principalmente se analizan las cargas generadas por los pasajeros que la unidad transporta, que son conocidas como cargas vivas, y las cargas generadas por las irregularidades del camino.

Las cargas constantes en el tiempo, conocidas como cargas muertas, son aquellas cuya magnitud no varía en el intervalo de tiempo en el que se realiza el análisis. A continuación se explica con detalle las magnitudes de análisis de las mismas para su aplicación en el proceso de simulación.

1) *Cargas constantes.*

Las cargas constantes son aquellas cuya magnitud permanece invariable en el tiempo del cual se realiza el análisis estructural. Son conocidas como cargas muertas [1, 2, 12]. Dentro de este grupo de cargas, se considerará el aporte de todos los elementos que son indispensables para su funcionamiento al peso total.

2) *Cargas debidas a los viajeros.*

Dentro de este grupo de cargas, se considerará el peso de los pasajeros, conductor y un tripulante [1, 2, 12]. Para definir tales cargas, se recurrirá a las referencias indicadas, las cuales recomiendan que para autobuses de turismo que no permiten pasajeros de pie se deben considerar los siguientes valores:

- Peso por pasajero: 71 (kg) (Peso de equipaje de mano: 3 (kg))
- Peso conductor: 75 (kg)
- Peso tripulante: 75 (kg)

3) *Cargas dinámicas y de vuelco.*

Las cargas dinámicas son cargas fluctuantes cuya aplicación es repetitiva y contabilizada en ciclos. Por lo tanto su acción debilitadora depende de la cantidad de ciclos en los cuales actúe la misma, pues, si se presenta en grandes ciclos de acción, la estructura está sometida a fatiga [1, 2, 12].

Las cargas de vuelco son las producidas por el mecanismo de absorción de energía mecánica de la estructura en el momento del impacto, dado que dicha energía más la inercia misma de todo el vehículo se debe distribuir y absorber por la estructura como deformación.

La energía de vuelco depende de la masa del autobús, y de la altura del centro de gravedad real del mismo, y se calcula usando ecuaciones mostradas en [13]

D. *Etapas en la solución de un problema mediante el Método de Elementos Finitos.*

El Método de Elementos Finitos es de gran utilidad para la ingeniería actual, pues permite predecir y simular el comportamiento de sistemas dentro de entornos virtuales controlados, lo cual involucra reducción de costos, pero una gran responsabilidad en el sentido de la aplicación correcta del mismo, implicando el requerimiento de gran experiencia [14]. Se siguen en general las siguientes etapas para la resolución de un problema por el método de elementos finitos [1, 2, 12, 14], véase figura 9:

- Discretización del problema mediante la selección de los elementos interconectados en los puntos nodales.
- Evaluación de las matrices elementales.
- Ensamblaje de la matriz completa del continuo.
- Aplicación de las condiciones de borde o contorno.
- Resolución del sistema de ecuaciones (lineales, no lineales, diferenciales ordinarias).
- Cálculo de otras funciones basadas en las variables nodales.

E. *Verificación de modelos para análisis de elementos finitos.*

Verificación es el proceso que determina que un modelo computacional representa de forma precisa el modelo matemático subyacente y su solución [15, 16]. Es una forma de comparación y corrección de errores en el modelo, sin modificar los parámetros considerados en el mismo [17]. La bibliografía recomienda dividir el proceso de verificación en dos partes:

- Verificación del código. No aplica en el presente caso. Los software comerciales de elementos finitos tienen millones de líneas de código, y se encuentra protegido por leyes de propiedad intelectual, Por lo cual probar un software comercial resulta económicamente no factible [1]. Por ello, se recurre a documentos científicos de bibliotecas especializadas que muestran pruebas efectuadas con software comercial. [1, 17-22].
- Verificación de cálculo. Consiste en estimar el error numérico resultante de los cálculos ejecutados por el software comercial, con un cálculo de error porcentual. La recomendación práctica es que dicha diferencia porcentual sea menor al 5% [1]

F. Normas europeas: reglamento 66.

El reglamento 66 de la Unión Europea se ha tomado como referencia para ejecutar pruebas de vuelco a estructuras de autobuses. Este se ocupa exclusivamente de brindar parámetros de comprobación para la resistencia de la estructura de las unidades de transporte [2, 12].

El reglamento 66 define al espacio de supervivencia como el espacio que se debe mantener en el compartimiento de los pasajeros durante y después de uno de los ensayos a efectuar sobre la estructura y que es representado por el volumen que se obtiene desplazando en línea recta el plano vertical transversal indicado en la figura 2, de manera que el punto “R” pase desde el correspondiente al asiento de la última fila hasta el de la primera, pasando por todos los puntos concebidos en el habitáculo.

Dicho reglamento señala que la superestructura del vehículo (partes de la estructura del vehículo que contribuyen a la resistencia del mismo en caso de accidente de vuelco) tendrá la resistencia suficiente como para asegurar que durante y después de pasar por uno de los métodos de ensayo o cálculo prescritos:

- Ninguna parte desplazada del vehículo invada el espacio de supervivencia especificado.
- Ninguna parte del espacio de supervivencia sobresalga de la estructura deformada.

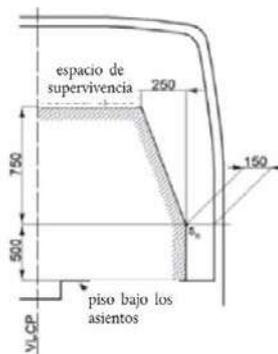


Figura 1. Espacio de supervivencia (residual). Vista frontal, tomado de [13]

1) Métodos de ensayo prescritos.

La norma faculta al fabricante a decidir cuál de los métodos de ensayo es conveniente para la comprobación de su estructura, debiendo escoger de entre varios métodos de ensayo físico o una verificación de la resistencia de la superestructura por medio de una simulación computacional. Dicha verificación puede simular el vuelco de una unidad completa o una sección de la misma. La última opción es la más escogida por empresas a nivel mundial, por la reducción de costos que representa.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

METODOLOGÍA PARA EJECUTAR ANÁLISIS NO LINEAL DE PRUEBAS DE VUELCO DE AUTOBUSES.

En base a lo analizado hasta el momento, la metodología propuesta se compone de las partes fundamentales [2]:

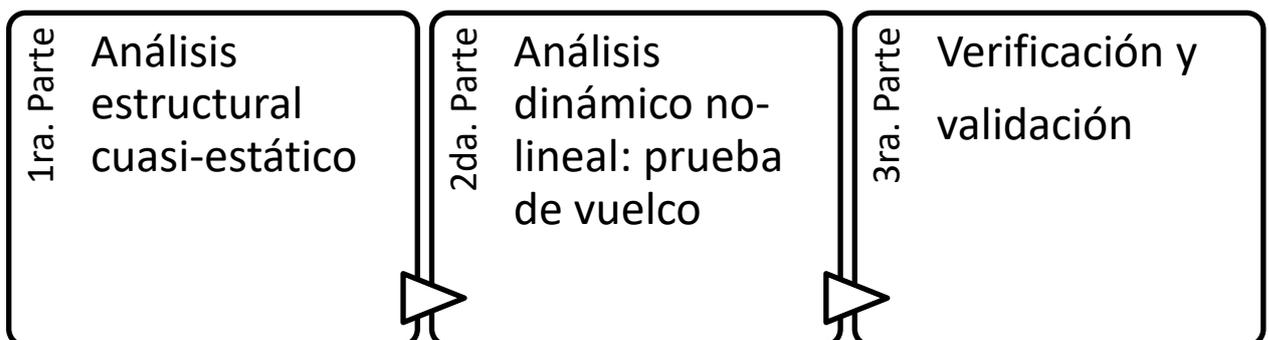


Figura 2. Partes que componen el programa y metodología para simulación de eventos cuasi-estáticos, dinámicos no lineales y de impacto automotrices aplicados. Pruebas de vuelco de autobuses

Específicamente, la metodología inicia con la modelación geométrica de la sección de la estructura de la carrocería en tres dimensiones, utilizando herramientas informáticas de Diseño asistido por computador de alto nivel, debido a la complejidad de la geometría.

Luego se procede a la discretización de dicha estructura, es decir, a la aplicación del método de elementos finitos, utilizando criterios de mallado y recomendaciones prácticas citadas por diversos autores y en base a la experiencia del departamento de Simulación, mostrados en las referencias [1, 10, 14, 23].

Para la solución del evento de impacto, se escogió un código especializado en la simulación de eventos no-lineales, dinámicos y que impliquen grandes deformaciones, como lo es HyperWorks®, lo cual representa una innovación en el campo de la ingeniería en el país, al ser un software poco conocido en nuestro medio, pero el más usado por industrias automotrices y aeronáuticas a nivel mundial para análisis dinámicos no-lineales. Dicho código ha sido probado por un gran número de trabajos de investigación, tesis y proyectos industriales a nivel mundial, y es el recomendado por diversos autores [1, 10, 23-25] por su poder computacional de mallado y aplicación de solvers como Radioss.

Una parte importante del proceso es la verificación de la metodología, para lo cual se analizan los parámetros de malla y pre-procesamiento definidos en [1, 2] y en los procedimientos internos del Laboratorio de Carrocerías de COINAV S.A.

Para clarificar la metodología expuesta, se propone un esquema del proceso (ver figura 10).

Cabe destacar que la metodología propuesta ha servido como punto de partida para simular una estructura de autobús, tanto en sección como estructura completa, en una prueba de vuelco con condiciones reales.

1) Simulación de sección de estructura

Para simular una sección de la estructura del autobús, los elementos utilizados fueron elementos tipo SHELL, cuya formulación, espesor, parámetros de configuración y geometría son los recomendados por la bibliografía especializada en análisis dinámicos de impactos a nivel mundial [1, 10, 23-25].

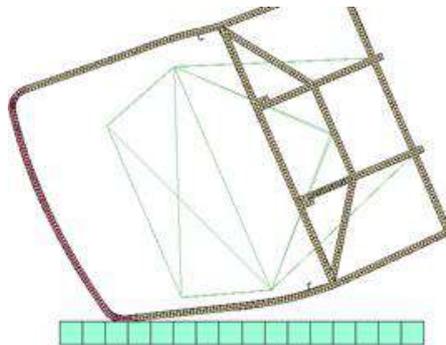


Figura 3. Malla de sección de la estructura con elementos SHELL 2D

La malla mostrada en la figura 3 reúne criterios de simetría y calidad de malla, logrados gracias a las recomendaciones mencionadas en [1]

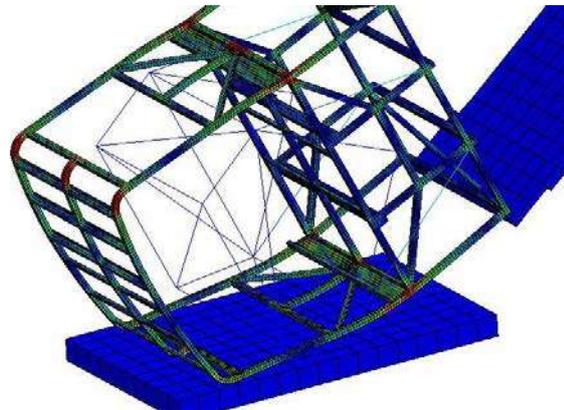


Figura 4. Malla de sección de la estructura con elementos SHELL 2D en movimiento mostrando distribuciones de esfuerzos

La malla mostrada en la figura 4 muestra una distribución de esfuerzos correspondiente a la sección de la estructura, y reúne criterios de simetría y calidad de malla, logrados gracias a las recomendaciones mencionadas en [1]

2) Simulación de estructura completa de autobus autoportante.

El procedimiento seguido para el modelado de la estructura completa es idéntico al descrito para la sección de la estructura del numeral anterior.

La particularidad, sin embargo, es la modelación de la sección del chasis y de los anclajes de la estructura en un solo modelo, corroborando los resultados obtenidos en el análisis de zonas críticas del presente documento.



Figura 5. Modelo matemático correspondiente a la estructura completa usando el procedimiento desarrollado por el autor, mostrando espacio de supervivencia y malla formada por elementos SHELL 2D visto desde el frente

En términos de modelación, la figura 5 representa los detalles geométricos más importantes del diseño estructural, para lograr la mayor concordancia con la realidad posible.

La malla se ha creado usando una combinación manual/automática, asegurando la representación de miembros estructurales en tres dimensiones mediante elementos SHELL 2D, según recomienda la bibliografía [1, 10, 23-25].

En términos de formulación, las recomendaciones se han seguido como en el numeral anterior, asegurando precisión y exactitud en los resultados

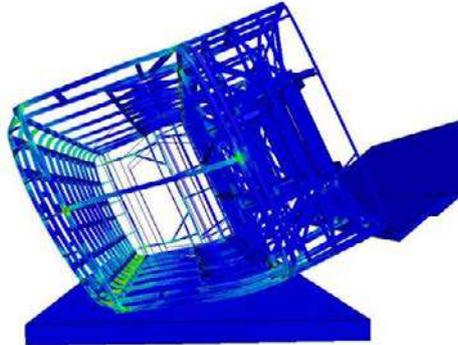


Figura 6. Modelo matemático correspondiente a la estructura completa usando el procedimiento desarrollado por el autor, mostrando espacio de supervivencia y malla formada por elementos SHELL 2D visto desde el frente

En la figura 6, las condiciones de borde han sido calculadas de acuerdo a los requerimientos solicitados por [13], realizándose el análisis desde unos milisegundos antes que se produzca el impacto, con la conservación energética que conlleva el proceso y la velocidad angular resultante de usar la masa completa de la estructura.

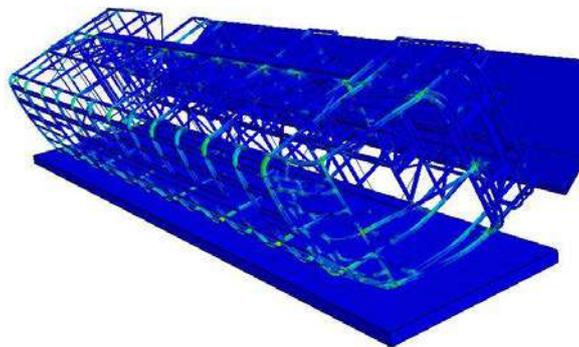


Figura 7. Post-procesamiento de la simulación del modelo matemático correspondiente al movimiento de la estructura completa usando el procedimiento desarrollado por el autor, mostrando espacio de supervivencia en azul y distribuciones de esfuerzos en la estructura

Para obtener los resultados de la figura 7, se ha realizado la validación de los análisis mostrados. El proceso de validación se fundamenta en un modelo validado, que está basado en un modelo inicial, en el cual, los parámetros de dicho modelo han sido revisados. El modelo validado debe ser capaz de predecir el comportamiento dinámico de la estructura, representado por datos experimentales usados en el proceso de validación. También debe ser capaz de predecir, con exactitud, las propiedades dinámicas de la estructura en situaciones diferentes a las evaluadas en los experimentos de validación [23].

La bibliografía [23] recomienda que se realice una validación jerarquizada, es decir, del sistema completo (autobús), tomar componentes para realizar pruebas reales y comparar los resultados con los modelos de elementos finitos.

Para el presente estudio, se seleccionó un componente del piso de la estructura del autobús y se le realizó pruebas de flexión en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH. Dichos resultados fueron comparados con los resultados de los modelos de elementos finitos del mismo componente obtenidos en HyperWorks. Véase figura 8.

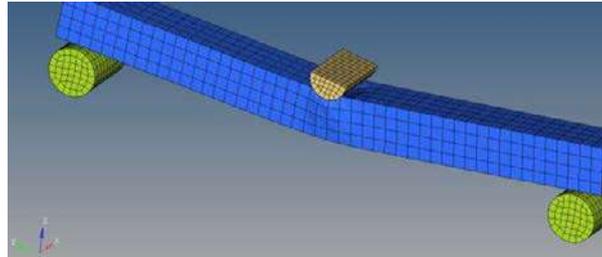


Figura 8. Modelo matemático de componente de autobús simulado en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH

La figura 9 muestra la comparación entre los datos obtenidos por la prueba real y el modelo de elementos finitos, en la cual, la diferencia entre valores de la curva correspondientes a mediciones reales difieren de los valores obtenidos en el modelo de elementos finitos en menos de un 5% en cada punto. Dicho resultado corrobora lo recomendado en la bibliografía [23], donde se recomienda que errores porcentuales menores al 5% representan modelos de elementos finitos validados y aptos para su uso en el estudio de fenómenos físicos.

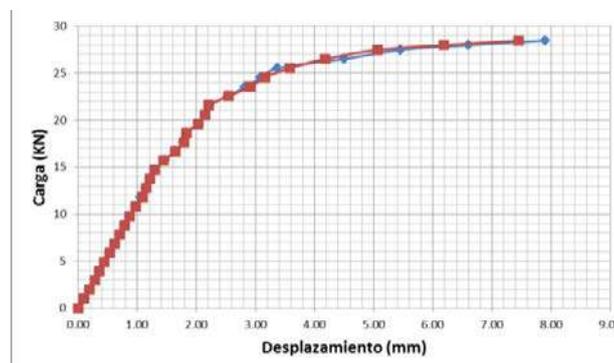


Figura 9. Resultados de comparación realizada entre modelo físico (en azul) de componente de autobús y modelo matemático (en rojo) del mismo componente. Las diferencias en cada punto de medición son menores al 5%

En la figura 10, los resultados muestran que la metodología tiene éxito en la modelación, pre-procesamiento, solución y análisis de un problema tan complejo como el volcamiento de un autobús, utilizando herramientas de alto nivel, como lo es HyperWorks® de Altair.

Con el uso de la metodología propuesta y en función de la validación explicada, se logra reducir la realización de pruebas físicas de componentes y, en función de las recomendaciones bibliográficas [23], realizar pruebas en autobuses completos, las cuales, serían muy difíciles de realizar debido a la falta de instalaciones para las mismas y por el costo de destruir un autobús completo y listo para trabajar.

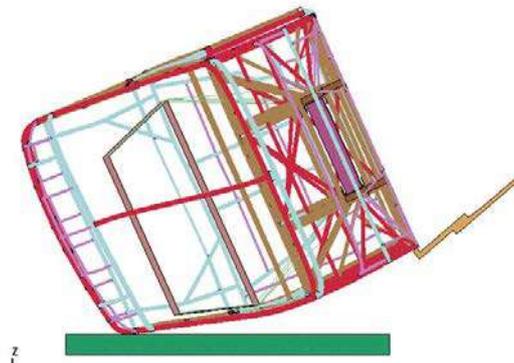


Figura 10. Post-procesamiento de la simulación del modelo matemático correspondiente al movimiento de la estructura completa usando el procedimiento desarrollado por el autor, mostrando espacio de supervivencia visto de frente, donde se observa la no invasión de dicho espacio por ningún elemento estructural

IV. CONCLUSIONES

1. El conocimiento de la dinámica del vehículo y de la teoría de elementos finitos es muy importante para para la generación del criterio ingenieril necesario para ejecutar e interpretar los análisis tales como los explicados en el presente documento.
2. El fundamento teórico y la experiencia han dado como resultado una metodología para desarrollar análisis no lineales, que se basa en bibliografía especializada y conocimiento específico.
3. Las normativas que se han expuesto son de aplicación mundial y corresponden a estudios exhaustivos, y son aplicadas en el ámbito local.
4. La metodología mostrada para simulación de pruebas de vuelco de autobuses ha demostrado ser útil para el efecto, habiendo sido patentada y usada en la industria ecuatoriana, siendo la primera vez que se aplican dichos métodos en el país.
5. Las simulaciones corridas han probado ser cercanas a la realidad de acuerdo a los análisis de validación que se han ejecutado, obteniendo errores porcentuales menores al 5%
6. La importancia del diseño estructural en un autobús autoportante es alta. El conocimiento de las zonas de esfuerzos máximos y deformaciones extremas permite generar refuerzos adecuados en sitios requeridos, permite caracterizar de manera adecuada los materiales usados y optimizar el uso de los materiales, lo cual repercute en un aseguramiento de la durabilidad del autobús autoportante diseñado.
7. Con el uso de la metodología propuesta y modelos de elementos finitos validados, se reduce la necesidad de realizar pruebas físicas de componentes y se abre la posibilidad de ejecutar ensayos en sistemas completos (autobuses), con la garantía de que los modelos serán fieles al comportamiento estructural de los sistemas originales. Dichas pruebas serían muy difíciles de realizar por no contar el Ecuador con infraestructura adecuada y por los altos costos de destruir autobuses completos.

V. RECOMENDACIONES

1. Continuar con las investigaciones en el ámbito de dinámica de vehículos, elementos finitos y manejo de software para realizar simulaciones de este tipo.
2. Estudiar más a fondo las normativas internacionales y diseñar normativas locales de modo que se adapten a la realidad nacional de manera adecuada.
3. Aplicar la metodología diseñada en más casos prácticos.

VI. REFERENCIAS

1. Cepeda, J., *MODELACIÓN, PRUEBAS DE IMPACTO Y DISEÑO ROBUSTO DE REJILLA DE PROTECCIÓN DE BOCINAS AUTOMOTRICES PARA GENERAL MOTORS DE MEXICO*, in *MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, MIR; CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ, CIMA; Director: Dr. José Carlos Miranda* 2011, TECNOLÓGICO DE MONTERREY: TOLUCA, MEXICO.
2. Cepeda, J., *Registro de patente DYSIM: Programa y metodología para simulación de eventos cuasi-estáticos, dinámicos no lineales y de impacto automotrices aplicados. Pruebas de vuelco de autobuses, No. QUI-039142: Corporación de Ingeniería Avanzada COINAV del Ecuador S.A.; Ecuador* 2012: Ecuador.
3. Lessard, W.B., *Modal and Impact Dynamics Analysis of an Aluminum Cylinder*, 2002, Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration: Hampton, Virginia.
4. Behler, H. and J. Gobel, *Verification of cylindrical interference fits under impact loads with LS-Dyna*, in *7th European LS-DYNA Conference* 2009, DYNAmore GmbH: Munich.
5. Vasant, V., *Transverse impact characteristics of adhesively bonded composite single lap joint*, in *College of Engineering* 2000, Wichita State University.
6. Liu, G.R. and S.S. Quek, *The Finite Element Method: A Practical Course* 2003, Burlington MA: Butterworth-Heinemann.
7. Timmela, M., et al., *A finite element model for impact simulation with laminated glass*. International Journal of Impact Engineering, 2007. **34**: p. 1465–1478.
8. Raghu, S., *Concepts of computational finite elements and methods of static and dynamic analyses in MSC.Nastran and LD-DYNA* 2010, Lexington KY: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
9. Wu, S.R. and W. Qiu, *Nonlinear transient dynamic analysis by explicit finite element with iterative consistent mass matrix*. COMMUNICATIONS IN NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING, 2008.
10. DuBois, P., *Crashworthiness Engineering* 2004, Livermore CA: Livermore Software Technology Corporation.
11. Cascajosa, M., *Ingeniería de Vehículos, Sistemas y Cálculos*, ed. E. Tébar. Vol. 3ra. Edición. 2006, Madrid, España.
12. Cepeda, J., *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES.*, in *FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA* 2006, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO: Quito.
13. UNECE, *Reglamento Número 66 "Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de transporte de pasajeros de grandes dimensiones en lo referente a la resistencia mecánica de su superestructura"*, Traducido del inglés, 1986, 1986: Ginebra
14. Kohler, J., *Today's challenges in crash simulation*, in *7th European LS-DYNA Conference* 2009, DYNAmore GmbH: Munich.
15. Bojanowski, C., *Verification, Validation and Optimization of Finite Element Model of Bus Structure for Rollover Test* 2011: Proquest, Umi Dissertation Publishing.
16. FDOT, *FLORIDA STANDARD FOR CRASHWORTHINESS AND SAFETY EVALUATION OF PARATRANSIT BUSES*. NTSHA, 2009. **Paper Number 09-0261**.
17. Chen, G., *FE MODEL VALIDATION FOR STRUCTURAL DYNAMICS*, in *Dynamics Section; Department of Mechanical Engineering* 2001, Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London: London, South Kensington.
18. DuBois, P., *A review of the state-of-the-art in vehicle modeling for crashworthiness analysis using, in LS-DYNA Anwenderforum* 2005: Bamberg.
19. DuBois, P., et al., *A study of mesh sensitivity for crash simulations: comparison of manually and batch meshed models*, in *LS-DYNA Anwenderforum* 2005, DYNAmore GmbH: Bamberg
20. Schweizerhof, K., L. Nilsson, and J. Hallquist, *Crashworthiness analysis in the automotive industry*. International Journal of Computer Applications and Technology, 2000. **5**.
21. Colín, J., *A FINITE ELEMENT SIMULATION OF A BAJA SAE VEHICLE TREE IMPACT INCLUDING A RIGID OCCUPANT*, 2009, INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY: Toluca.
22. Maurath, C.A., *DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A FINITE ELEMENT MODEL OF THE Q3 ANTHROPOMORPHIC TESTING DEVICE*, in *Department of Civil and Environmental Engineering of The School of Engineering and Applied Science* 2007, The George Washington University.
23. MATOLCSY, M., *Technical questions of bus safety bumpers*. Scientific Society of Mech. Eng. Hungary, 2000(05-0161).
24. Choi, S.-S., *Structural design review of LCD-TV module by Impact Analysis*, in *4th European LS-DYNA User Conference* 2006, DYNAmore GmbH: Munich, Alemania.
25. P, M., *Multibody Analysis of M3 Bus Rollover: Structural behaviour and passenger injury risk*. Politecnico di Torino. Dipartimento di Meccanica., 2001. **228**.

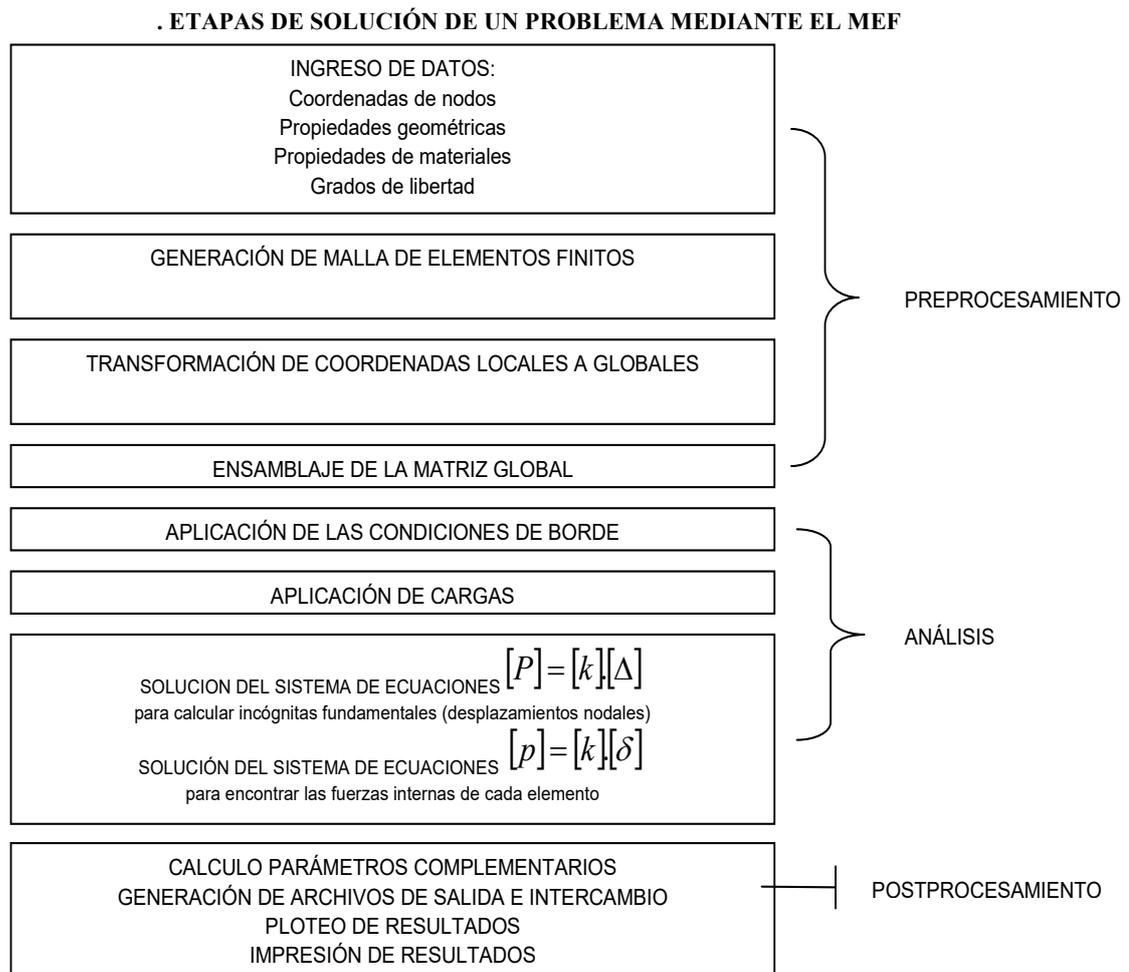


Figura 11. Etapas de solución de un problema mediante el MEF, tomado de [1, 2]

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DINÁMICOS DE VUELCO

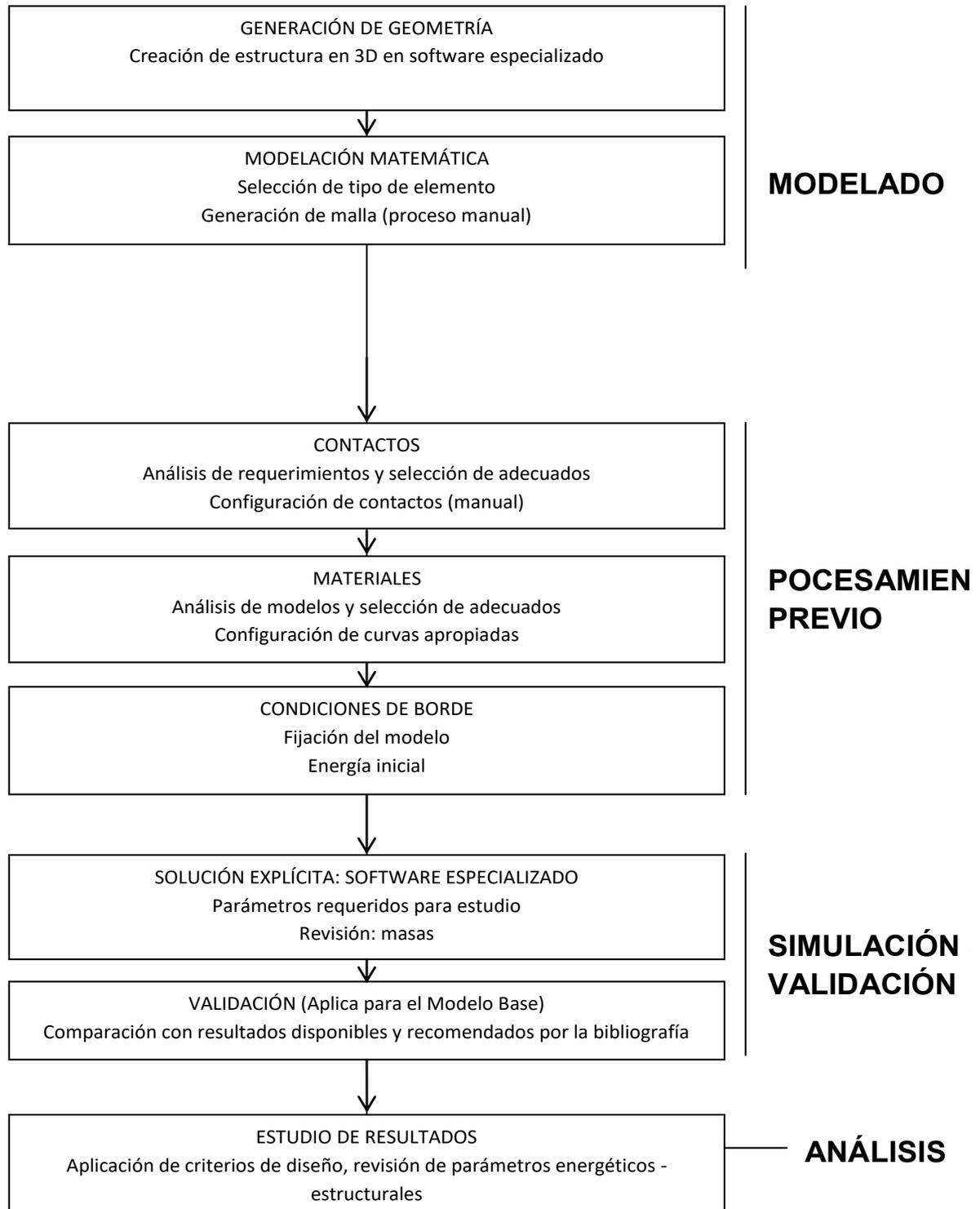


Figura 12. Metodología de simulación de eventos dinámicos de vuelco

Elaboración de bloques de concreto con resinas de plásticos

Development of concrete blocks with plastic resins.

D. Mayorga⁽¹⁾ *, L. Paredes⁽¹⁾, E. Viteri⁽¹⁾, M. Altamirano⁽¹⁾, A. Paredes⁽²⁾

(1) Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador

(2) Facultad de Ciencias Pecuarias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador

*Correspondencia. Tel.: del autor de contacto, Fax: del autor de contacto, E-mail: del autor de contacto (entre paréntesis escribir Inicial/es del nombre, apellido completo autor de contacto)

RESUMEN

El trabajo muestra los resultados de una investigación que se llevó a cabo en el laboratorio de resistencia de materiales de la escuela de Ingeniería Mecánica, en el cual se realizó el ensayo de cuatro bloques elaborados de concreto y diferente porcentaje de resina de plástico. Estos elementos se fabricaron de la misma forma que se fabrica los bloques de concreto puro la diferencia es que en cada bloque se reemplazó un poco de concreto por un cierto porcentaje de resina de plástico reciclado de 20, 30, 40 y 50% de resina de plástico y los resultados obtenidos fueron exitosamente aceptable ya que gracias a estos cambio de fabricación se puede reducir el material a utilizar de concreto siendo este reemplazado por la resina de plástico y lograr la misma resistencia mecánica o incluso mayor que el elaborado de concreto puro. En la producción de elementos constructivos para la vivienda de interés social, poner en manos de auto constructores la elaboración de los componentes constructivos. Se utilizan como materia prima materiales reciclados plásticos, promoviendo el uso racional de recursos disponibles en lugar de enterrarlos, quemarlos o acumularlos en basureros al aire libre; aplicando procedimientos de elaboración que no son contaminantes del medio ambiente, por lo cual es una tecnología sustentable. El proceso de fabricación de estos ladrillos comienza con el triturado de los plásticos para luego mezclarlo con cemento portland como aglomerante para dar cohesión a la mezcla y un aditivo químico que mejora la adherencia de las partículas de plástico. Esta mezcla se coloca en moldes como si fuese una pieza de hormigón prefabricada y se deja fraguar. Viendo que el ladrillo PET no es solo una solución a un problema medio ambiental, sino que también tiene ventajas técnicas significativas, la pregunta es: ¿Cuándo veremos estos nuevos ladrillos PET? En ese punto es justo donde se encuentran ahora, en buscar un desarrollo industrial que permita fabricar estos ladrillos en una cantidad suficiente para poder satisfacer las demandas del sector de la construcción.

Palabras clave: Prefabricar, fraguar, PET, resina, triturado.

ABSTRACT

The work shows the results of an investigation that was carried out in the materials resistance laboratory of the School of Mechanical Engineering, in which the test of four elaborated blocks of concrete and different percentage of plastic resin was carried out. These elements were manufactured in the same way

that the concrete blocks are manufactured, the difference is that in each block a bit of concrete was replaced by a certain percentage of recycled plastic resin of 20, 30, 40 and 50% resin. plastic and the results obtained were successfully acceptable because thanks to these manufacturing changes can be reduced the material to be used in concrete being this replaced by the plastic resin and achieve the same mechanical strength or even greater than the pure concrete. In the production of constructive elements for housing of social interest, put in the hands of self-builders the elaboration of the constructive components. Plastic recycled materials are used as raw material, promoting the rational use of available resources instead of burying them, burning them or accumulating them in outdoor garbage dumps; applying elaboration procedures that are not contaminants of the environment, for which it is a sustainable technology. The manufacturing process of these bricks begins with the crushing of the plastics to then mix it with portland cement as a binder to give cohesion to the mixture and a chemical additive that improves the adherence of the plastic particles. This mixture is placed in molds as if it were a piece of prefabricated concrete and allowed to set. Seeing that PET brick is not only a solution to an environmental problem, but also has significant technical advantages, the question is: When will we see these new PET bricks? At that point it is right where they are now, in search of an industrial development that allows to manufacture these bricks in a sufficient quantity to be able to satisfy the demands of the construction sector.

Key words: Prefabrication, setting, PET, resin, crushed.

INTRODUCCIÓN:

La naturaleza produce residuos, pero tiene la suficiente capacidad de procesarlos, integrándolos de nuevo al ciclo vital. En las cadenas tróficas, animales herbívoros consumen vegetales, animales carnívoros consumen animales herbívoros u otros carnívoros, y finalmente, organismos que viven en el suelo (hongos y bacterias) están encargados de descomponer o degradar a los organismos muertos. De esta sabia manera, la naturaleza busca mantener el delicado equilibrio del sistema ecológico. Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

El ser humano representa una amenaza en este mecanismo, al producir residuos en grandes cantidades por su afán de consumo. Algunos de ellos son posibles de “absorber” nuevamente (por ejemplo, el caso de los residuos de alimentos, que pueden ser reciclados como abono para cultivos) y otros que, por su escasa o nula biodegradabilidad, como en el caso de los plásticos, se acumulan, entierran o incineran en basurales (legales o ilegales) produciendo contaminación, y desaprovechando irracionalmente los recursos. De esta manera, el hombre causa un impacto negativo en el medio ambiente, con una miope visión cortoplacista Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

Las grandes ciudades han encontrado en los predios de enterramiento sanitario una solución higiénica para sus residuos. Esta modalidad de disposición reduce significativamente el

problema de contaminación, pero es costosa para los municipios, y desaprovecha un recurso importante: la basura urbana, que podría en gran parte reciclarse. (Litvinoff, E. 2006).

En el 2007, el gobierno dominicano por medio del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales regula la extracción de agregados de los ríos con la resolución 16-2007; regulación que no se cumple en su totalidad y, aunque hizo que algunas granceras se retiraran de los ríos a canteras, actualmente se sigue

impactando la corteza terrestre por la extracción insostenible y descontrolada de agregados (León R. O., 2013).

Como estado del arte tenemos el uso de otros plásticos como el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y el Polietileno tereftalato (PET) en sustitución de agregado; cuyo estudio comparativo en su uso para bloques realizado por el departamento de Química de la Universidad de Guyana a cargo de Karen Alleyne, arrojó resultados de una mejora en densidad del bloque en el orden PET-HDPE-convencional siendo el PET el menos denso. Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

En este sentido la presente investigación tiene como propósito realizar un análisis e investigación sobre el desarrollo de bloques de plástico y basura inorgánica que se están realizando en algunos países, con el fin de poder aplicarlo a nuestro medio teniendo en cuenta las condiciones climáticas, geológicas, etc. la factibilidad de los bloques de hormigón con agregados de residuos plásticos ABS.

METODOLOGÍA:

La metodología integrada de Investigación – Acción implica la ejecución interdisciplinaria y grupal de tareas de ensayo en campo, que permita aplicar carga mediante el uso de la maquina universal y medir las deformaciones para cada uno de ellos, finalmente generar una gráfica Fuerza vs. Deformación y analizar los respectivos resultados.

En el curso de esta investigación se han obtenido elementos constructivos de las siguientes medidas: bloque: 20 cm. x 20 cm. x 30 cm. (ver Gráfica 1).

Se medirán las variables de resistencia a la compresión, peso y absorción de los bloques, basados en las normativas ASTM C90-09 de especificaciones para elementos de mampostería estructural, ASTM C140-09 de métodos para ensayos y muestreo de elementos de mampostería y en segundo plano la ASTM C1314 de métodos de ensayos para elementos de mampostería prismática. A la vez que se comparara la granulometría de los agregados minerales y plásticos siguiendo las especificaciones ASTM C33-99 y ASTM C331 respectivamente.

El procedimiento de elaboración de los mampuestos es similar al de los bloques de mortero de cemento, reemplazando la arena gruesa por los plásticos triturados.

Los plásticos que se utilizan son: PET (polietileno tereftalato), procedentes de envases descartables de bebidas (residuo postconsumo); PE (polietileno), BOPP (polipropileno biorientado) y PVC (cloruro - 910 - de polivinilo), estos últimos procedentes de envoltorios de alimentos (residuo de fábrica por problemas de espesor o entintado).

El ligante que se utiliza es cemento Portland común. En el agua de mezclado se incorporan aditivos químicos que mejoran las propiedades técnicas. La máquina que se utiliza para la postura de los mampuestos es una bloquera como la que se emplea para bloques de mortero de cemento, con un molde adaptado en el caso de la fabricación de ladrillos. Luego de la postura, se dejan en reposo los mampuestos durante un día y se los moviliza hasta una pileta de curado con agua, en donde permanecen diez días.

Gráfica 1: Bloques de concretos y resina



Fuente: Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

Fabricación de los bloques.

Los bloques se fabrican de la misma forma que los de concreto puro únicamente con la única diferencia de mezclar el concreto por un cierto porcentaje de resina de plástico. (ver Gráfica 2)

Gráfica 2: Elementos constructivos fabricados con plástico reciclado.



Fuente: Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

Gráfica 3: Bloques con diferente porcentaje de resina

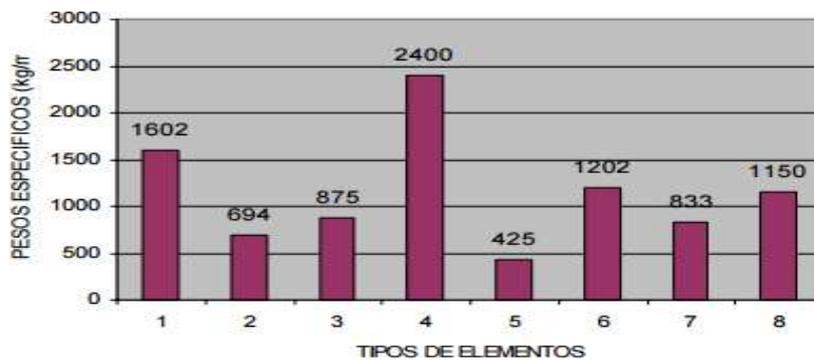


Fuente: Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007).

Propiedades físicas de los bloques

- **Peso específico:** Es menor al de otros componentes constructivos tradicionales que se usan para la misma función, lo cual permite abaratar en traslados y en cimientos (ver Gráfica 4).

Gráfica 4. Pesos específicos de elementos

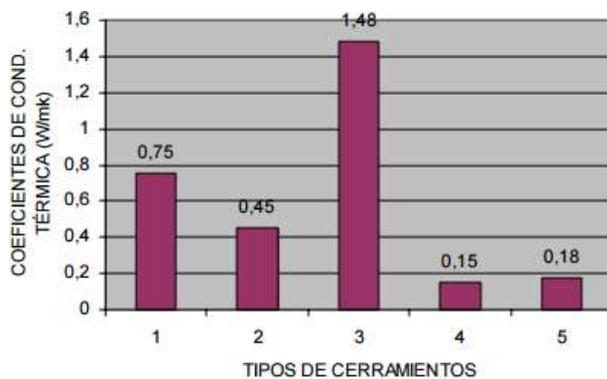


Referencias

- 1: Ladrillos comunes de tierra.
- 2: Bloques cerámicos huecos no portantes.
- 3: Bloques de hormigón no portantes.
- 4: Placa de hormigón común.
- 5: Bloques con PET.
- 6: Placa de ladrillos con PET.
- 7: Ladrillos con plásticos varios.
- 8: Ladrillos con PET.

- **Conductividad térmica:** Proveen una excelente aislación térmica, superior a la de otros componentes constructivos tradicionales (ver Gráfica 5). Se pueden utilizar en cerramientos con un espesor menor, obteniendo el mismo confort térmico. Esto permite abaratar costos. Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).

Gráfica 5: Conductividad térmica de cerramientos.



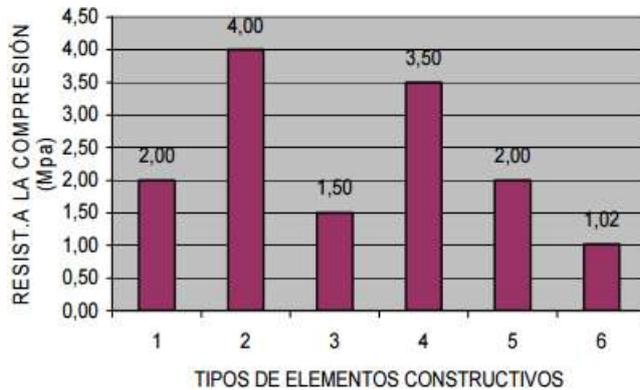
Referencias

- 1: Mampostería de ladrillos comunes de tierra.
- 2: Mampostería de ladrillos cerámicos huecos.
- 3: Mampostería de bloques de hormigón no portantes.
- 4: Mampostería de ladrillos con PET.
- 5: Mampostería de ladrillos con plásticos varios.

Nota: todos los cerramientos están revocados con mortero común ambos paramentos.

- Resistencia mecánica: Es suficiente para que puedan ser utilizados en cerramientos no portantes de viviendas con estructura independiente (ver Gráfica 6), Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).

Gráfica 6: Resistencia a la compresión de elementos constructivos.



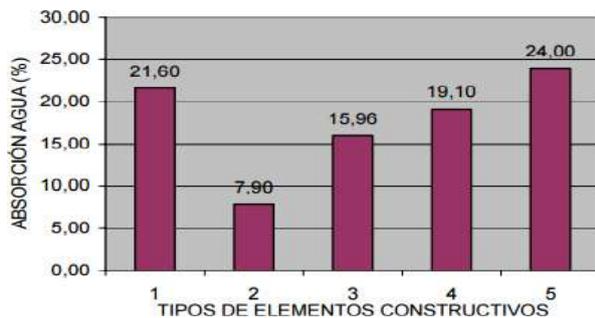
Referencias

- 1: Bloques no portantes de hormigón. 2: Bloques portantes de hormigón.
- 3: Ladrillos y bloques cerámicos no portantes. 4: Ladrillos y bloques cerámicos portantes.
- 5: Ladrillo con PET. 6: Bloque con PET.

Nota: se consideró tensión de rotura, y sección bruta de mampuestos.

- Absorción de agua: Es similar a la de otros cerramientos tradicionales (ver Gráfica 7), Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).

Gráfica 7: Absorción de agua en elementos constructivos.



Referencias

- 1: Ladrillo común de tierra.
- 2: Bloque de hormigón no portante. 3: Bloque con PET.

4: Ladrillo con PET.

5: Ladrillo con papeles plásticos.

- Permeabilidad al vapor de agua: Es similar a la del hormigón con agregado pétreo (entre 1,76 y $3,81 \times 10^{-2} \pm 4\%$ g/mhkPa).
- Resistencia acústica: Es de 41 db, en el caso de un muro de 0,15 m. de espesor construido con ladrillos de PET reciclado revocado de ambos lados, similar a la de un muro del mismo espesor construido con ladrillos cerámicos (42 db).
- Comportamiento a la intemperie: Son resistentes a la acción de los rayos ultravioleta y ciclos alternados de humedad, según ensayo de envejecimiento acelerado utilizando el método del

Q.U.V Panel. Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).

- Aptitud para el clavado y aserrado: Son fáciles de clavar y aserrar, según ensayos preliminares realizados en el CEVE, por lo que tienen aptitud para constituir sistemas constructivos no modulares.
- Adherencia de revoques: Poseen buena aptitud para recibir revoques con morteros convencionales, por su gran rugosidad superficial. Tensión de adherencia: 0,25 MPa.
- Resistencia al fuego: Tienen buena resistencia al fuego, según se comprobó en Ensayo de Propagación de Llama, del cual surge su clasificación como “Clase RE 2: Material combustible de muy baja propagación de llama”. Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).
- Las propiedades técnicas de estos elementos constructivos han sido establecidas en laboratorios especializados de la Universidad Nacional de Córdoba y del INTI en Capital Federal, República Argentina.
- Por cumplir con los requisitos establecidos por la Subsecretaría de Vivienda y Desarrollo Urbano, los ladrillos y bloques con PET se permite la utilización de estos elementos constructivos en planes de vivienda. Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. (2016).

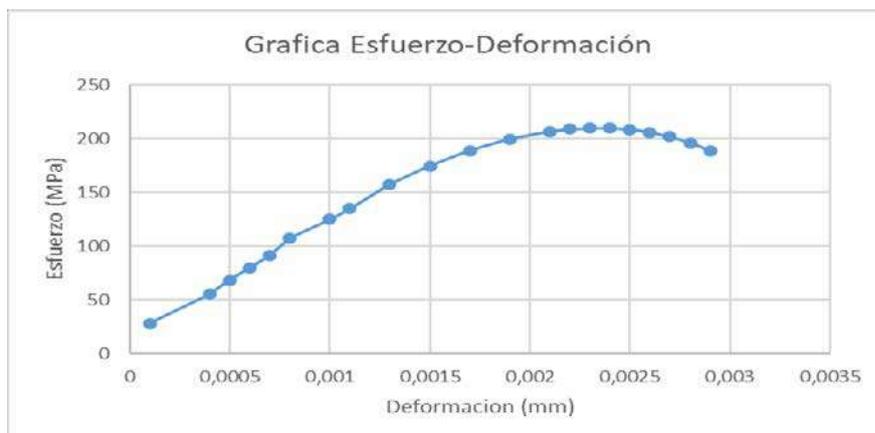
RESULTADOS.

Luego de la toma de datos de cada bloque con diferente porcentaje de resina se realizó una curva que represente la resistencia mecánica de cada bloque y la carga última que esta soporta, además se analizara que porcentaje de resina es el óptimo para la aplicación de los mismos.

Datos adquiridos (Anteriores).

A continuación, se mostrarán los datos adquiridos en los semestres anteriores a diferentes proporciones de PET y concreto.

Gráfica 8: Curva Esfuerzo vs Deformación del bloque convencional



Realizado por: Los autores.

Gráfica 9: Curva Esfuerzo vs Deformación del bloque con resina



Realizado por: Los autores.

Cuadro 1: Prueba de compresión en los ladrillos PET

	(kgf)	(kgf)	(kgf)
Prueba I	9300	8700	4610
Prueba II	9580	8480	2060
Prueba III	9660	8100	5600

Realizado por: Los autores.

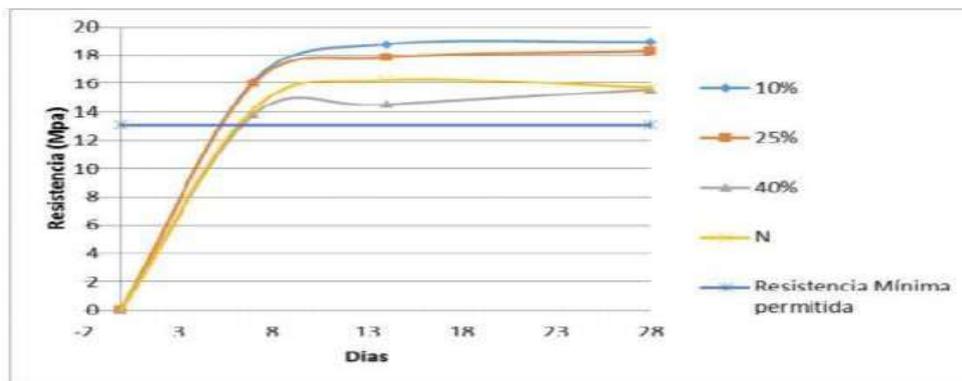
Para realizar la comparación con ladrillos comerciales se realizaron pruebas también de estos últimos, los resultados se presentan a continuación:

Cuadro 2: Prueba de compresión de ladrillos comerciales.

	Bloque hueco(kgf)	Bloque macizo(kgf)
Prueba I	4480	2000
Prueba II	4040	2080
Prueba III	3890	1900

Realizado por: Los autores.

Gráfica 10: Curva Esfuerzo vs Deformación (A 10%,25%,40%y SN de PET)



Realizado por: Los autores.

Los datos anteriores adquiridos se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio en los semestres anteriores.

Datos adquiridos (Actuales).

Bloque 1.- Este material a ensayar contiene aproximadamente un 90% de concreto y los 10% restantes se adiciono resina de plástico triturado y se obtuvo los siguientes resultados.

Cuadro 3: Valores Fuerza-Deformación (Bloque1)

Deformación (mm)	Fuerza (kgf)
0	41,04
0,002	70
0,025	103
0,035	120
0,045	130
0,075	140
0,07	180
0,125	320
0,135	420
0,145	545

Gráfica 11: Grafica Fuerza - Deformación (Bloque 1)



Realizado por: Los autores

Bloque 2.- Este material a ensayar contiene aproximadamente un 75% de concreto y los 25% restantes se adicionó resina de plástico triturado y se obtuvo los siguientes resultados.

Cuadro 4: Valores Fuerza-Deformación (Bloque2)

Deformación (mm)	Fuerza (kgf)
0	41,04
0,01	60
0,05	85
0,06	115
0,07	160
0,085	260
0,105	310
0,135	375
0,16	485

Gráfica 12: Grafica Fuerza - Deformación (Bloque 2)



Realizado por: Los autores

Bloque 3.- Este material a ensayar contiene aproximadamente un 60% de concreto y los 40% restantes se adicionó resina de plástico triturado y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 5: Valores Fuerza-Deformación (Bloque3)

Deformación (mm)	Fuerza (kgf)
0	41,04
0,085	50
0,27	60
0,3	70
0,335	90
0,37	115
0,39	130
0,405	150

Gráfica 13: Grafica Fuerza - Deformación (Bloque 3)



Realizado por: Los autores

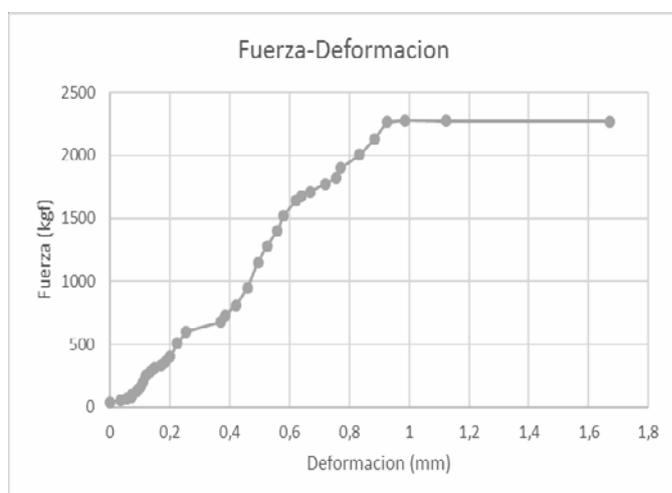
Bloque 4.- Este material a ensayar contiene aproximadamente un 50% de concreto y los 50% restantes adicionó resina de plástico triturado y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuadro 6: Valores Fuerza-Deformación (Bloque4)

Deformación (mm)	Fuerza (kgf)
0	41,04
0,035	50
0,055	70
0,07	82
0,075	100
0,09	130

0,1	160
0,11	200
0,12	250
0,135	280
0,15	310
0,17	330
0,185	360
0,2	400
0,225	505

Gráfica14: Grafica Fuerza - Deformación (Bloque 4)



Realizado por: Los autores

Comparación de datos.

Cuadro 7: Resumen resultados influyen en la factibilidad operativa

	Datos actuales		Datos anteriores	
	δ_{max} (mm)	σ_{max} (kpa)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (kpa)
I (Comercial)	0,49	310,33	0,29	188,7
II(Compuesto)	1,16	370,11	0,29	186,7

Realizado Por: Los autores

Cuadro 8: Resumen resultados influyen en la factibilidad operativa

Variable	Bloques Convencionales	Bloques con plastico ABS	Tendencia
----------	------------------------	--------------------------	-----------

% de plástico ABS	0%	10%	25%	40%	NA
Peso (Lbs)	20	20,99	30,22	18,54	Mejoro
Resistencia a compresion (Kgf)	2000	2247	2259	2266	Mejoro
Rendimiento	94	96	95	92	Similar

Realizado por: Los autores

CONCLUSIONES

- i. Al realizar los ensayos de los bloques es notorio que al aumentar el porcentaje de resina de plástico en el concreto; se puede observar que en las curvas de esfuerzo deformación que para cada bloque aumenta su resistencia a compresión.
- ii. Los ensayos que se realizaron a los bloques son exclusivamente a compresión debido a que por ser concreto son materiales que resiste a compresión y no a tracción.
- iii. Los bloques con mayor porcentaje de resina de plástico podemos observar que resiste más carga que los de poco porcentaje e igualmente se deforma más hasta llegar a la ruptura, esto se debe a la composición del bloque ya que cada uno de estos contiene resina de plástico y como sabemos que el plástico tiene alta deformación elástica.
- iv. Los bloques analizados en el presente semestre estos poseen mayor resistencia (en comparación a los analizados anteriormente) a compresión debido a que fueron secados por mayor tiempo, de igual forma el bloque comercial varia su composición debido al tipo de fabricante.
- v. Se recomienda que los valores en %peso de resina plástica no exceda el 40% debido a que en valores superiores la adherencia causa que el material falle a compresión a cargas altas.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer la facilitación de los laboratorios de Resistencia de Materiales y de Materiales en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Además, los autores desean expresar su gratitud al Ingeniero Jorge Buñay por hacer posible la realización de este estudio por medio de la colaboración brindada en la realización de los respectivos ensayos (Compresión) en la Maquina Universal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para el autoconstrucción. Revista INVI, 23(063), 142.
- Gaggino, R., Arguello, R., & Berretta, H. (2007). Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento. Brasil: Universidad Federal de Mato Grosso do Sul.

- Pozo, A. C. (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Barcelona.
- Litvinoff, E. Bolivianos en Córdoba. Mano de obra clandestina. En Anuario 2006 de La Voz del Interior, pág 76 a 78. Córdoba, Rep. Argentina.
- García, E., Martínez, M., Pérez, A., Mejía, A., Olivo, A., & Morantín, B. et al. (2013). Estudio de factibilidad de bloques de hormigón con agregado de residuo plástico ABS. LACCEI, (11), 4,5,7.
- Aguirre Villacis, D. (2013). El plástico reciclado como elemento constructor de la vivienda (Arquitecto). UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Zavala Arteaga, G. (2015). Diseño y desarrollo experimental de materiales de construcción utilizando plástico reciclado (Arquitecto). Escuela Especializada en Ingeniería ITCA- FEPADE.
- Frias Rojas, M. (2005). Nuevas adiciones al cemento. Instituto Eduardo Torroja(CSIC), Madrid
- Berreta, H.: Vivienda y Promoción para las Mayorías, Humanitas, 1987, pág. 280. Buenos Aires, Rep.Argentina.
- Heredia, D., & Orozco, D. (2009). Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos. Colombia.
- Alexis Z. Meses, Christian M. Muñoz. Analysis For The Implementation Of Recycled Plastic In The Preparation Of Blocks.
- Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013) International Competition of Student Posters and Paper, August 14 - 16, 2013 Cancun, Mexico. Estudio De Factibilidad Bloques De Hormigón Con Agregado De Residuo Plástico ABS.
- Heredia, D., & Orozco, D. (2009). DESARROLLO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO RESIDUOS PLÁSTICOS. Colombia.
- León, R. O. (2006). Problemática ambiental de la extracción de agregados fluviales en la República Dominicana y propuesta de alternativas. Boletín Geológico y Minero, 746-762.
- León, R. O. (26 de febrero de 2013). Situación actual de la problemática de explotación de la corteza terrestre por parte de las granceras en República Dominicana. (A. Olivo, Entrevistador)
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). Sistematización multiplicación del proceso "Basura cero". Santo Domingo: Programa "Gestión y Protección de Recursos Naturales en Cuencas Hidrográficas".
- Pozo, A. C. (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Barcelona.

Parámetros mecánicos y eléctricos de los inyectores inductivos riel común al trabajar con mezcla combustible diésel tensoactivos.

Mechanical and electrical parameters of the inductive injectors common rail when working with diesel fuel mixture tensioners

W. G, Erazo Laverde * ⁽¹⁾, J, Bassante Barberán ⁽²⁾, S, Díaz Vivanco ⁽³⁾, J.L, Quiroz Erazo ⁽⁴⁾

(1) (2) (3) (4) Dpto. de Ciencias de la Energía y Mecánica, Grupo SAEM R&D, Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE . Quijano y Ordoñez y Marqués de Maenza

*Correspondencia. Tel.: del autor de contacto 0995275227, Fax: 03281008 , E-mail: wgerazo@espe.edu.ec (W.G, Erazo Laverde)

RESUMEN

Se desarrolla el análisis de los parámetros mecánicos y eléctricos del inyector inductivo CRDI DENSO 6521 al utilizar una mezcla combustible ecológica diésel - surfactante de agua al 20%, que es una emulsión combustible de dos sustancias tenso activas no iónicas, mejora los parámetros de funcionamiento del motor de combustión interna, aumentando potencia y torque. Se realizaron ensayos durante 200 horas, con valoraciones cada 50 horas. A través del banco de pruebas CRDI se analiza el desempeño mecánico del inyector, en lo referente a variaciones de caudal de entrega y retorno de combustible a diferentes cargas, valores que el desgaste se encontraron fuera de los límites al finalizar las pruebas, con el medidor LCR se examina la inductancia, resistencia y asilamiento de la bobina, valores que no cambiaron, estableciendo que el uso de la mezcla combustible diésel surfactantes agua genera cambios en el rendimiento mecánico del inyector, más no altera sus parámetros eléctricos.

Palabras clave: Emulsión de combustible, crdi, surfactante, caudal, retorno combustible, inyector.

ABSTRACT

The analysis of the mechanical and electrical parameters of the inductive CRDI DENSO 6521 injector is developed by using an ecological fuel mixture diesel - 20% water surfactant, which is a combustible emulsion of two active nonionic active substances, improves the operating parameters of the internal combustion engine, increasing power and torque. Tests were conducted for 200 hours, with titrations every 50 hours. The CRDI test bench analyzes the mechanical performance of the injector, in terms of variations in delivery flow and return of fuel at different loads, values that wear was out of bounds at the end of the tests, with the meter LCR examines the inductance, resistance and insulation of the coil, values that did not change, establishing that the use of diesel fuel mixture water surfactants generates changes in the mechanical performance of the injector, but does not alter its electrical parameters.

Key words: Fuel emulsion, crdi, surfactant, flow, fuel return, injector.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles ha aumentado su uso exponencialmente , dado que son una fuente no renovable, la necesidad es reducir la explotación de los mismos. La quema de combustibles derivados del petróleo conduce a la emisión de gases tóxicos como el óxido de nitrógeno, óxidos de carbono y

otros, que contribuyen de manera importante al cambio climático. Sumado a esto está el problema del aumento de los precios del combustible con reservas bajas y la creciente demanda de la industria [1].

Muchos programas de investigación se han llevado a cabo en todo el mundo para producir y utilizar sustitutos de diesel a partir de productos naturales [2]. Los surfactantes son sustancias químicas que son conocidas por su uso en detergentes, cosméticos y sectores textiles [3]. Los surfactantes reducen la tensión interfacial entre el agua inyectada y el petróleo crudo atrapado en el depósito a un valor ultra bajo. Recientemente, se presta mucha atención al uso de surfactantes biodegradables y amigables con el medio ambiente en aplicaciones de recuperación de aceite [4].

Se están realizando varios esfuerzos para desarrollar productos químicos de bajo costo a partir de recursos naturales para una aplicación exitosa en la recuperación de petróleo mejorada con químicos [5]. Uno de ellos es el aceite de ricino. La mezcla combustible utilizada en la investigación es una emulsión de combustible permite la mezcla de agua en aceite de manera que la mezcla sea lo más homogéneamente posible, para lo cual se utilizan tensoactivos, con el fin de evitar una separación de fases. [6]

Al trabajar con la mezcla combustible es posible reducir la temperatura de funcionamiento del motor, rebajar las emisiones contaminantes y aumentar el rendimiento térmico, elevando el torque y potencia debido a microexplosiones generadas por las partículas de agua en el cilindro. Sin embargo es necesario analizar el rendimiento mecánico y el comportamiento eléctrico del inyector al trabajar con la mezcla combustible. [7] Los valores de BHL de los surfactantes permite clasificarlos de acuerdo a su mayor o menor solubilidad, sea en aceite o en agua. Desde luego, es importante mencionar que los emulsificantes con alto grado de BHL son más solubles en agua y son recomendables para una emulsión aceite/agua y viceversa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Mezcla combustible

La mezcla combustible ecológica elaborada en [8], es la mezcla de diésel Premium, agua destilada y tenso activos que estabilizan las dos sustancias a una concentración del 20%. La Tabla 1 presenta los valores de BHL de los tenso activos, la mezcla de los emulsionantes en las cantidades indicadas permiten obtener una mezcla con un BHL (Balance Hidrofílico Lipofílico) de 4 que permite la combinación entre agua y aceite.

Tabla 1. Balance Hidrofílico Lipofílico (BHL) de tenso activos

Tenso activo	BHL	Cantidad (g)
Ácido oleico	1	66.7
Kolliphor	14	20
Nonil fenol de 6 moles	10.9	33.3

Se combina las cantidades de las sustancias para elaborar un kilogramo de mezcla [9], mezclando los tensoactivos por separado, luego se añadió el agua destilada y finalmente el diésel. La Tabla 2 detalla las cantidades necesarias de cada componente.

Tabla 2. Cantidades necesarias de cada sustancia

Sustancia	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Ácido oleico	66.7	6.67
Kolliphor	33.3	3.33
Nonil fenol de 6 moles	20	2
Agua destilada	200	20
Diésel	680	68

Para preparar la mezcla combustible, se requiere el equipo de agitación para la correcta homogeneización [9]. En la Fig. 1 se muestra el agitador mecánico BOECO el cual permite la mezcla de las sustancias, proceso realizado a 600 rpm.



Fig. 1 Agitador mecánico OSD -20 BOECO

En la Fig. 2 se presenta el agitador magnético BOECO que agita la mezcla para evitar la separación posterior.



Fig. 2 Agitador magnético MSH 420 BOECO

2.2. Banco de pruebas CRDI

En la Fig. 3 está el banco de pruebas de inyección diésel CRDI, en el cual se instala la bomba de alta presión HP3 [9], así como el módulo activador de inyectores.



Fig. 3 Banco de pruebas CRDI

La Tabla 3 presenta los parámetros ajustados para las pruebas en el banco.

Tabla 3 Parámetros de funcionamiento del banco de pruebas CRDI

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de giro de bomba HP3	900	RPM
Presión en el riel	330	Bari
Período de inyección	48	ms
Tiempo de inyección	1.6	ms
Voltaje de activación del inyector	80	V
Amperaje de activación del inyector	15	A

2.3 Módulo activador

Para la activación de inyectores CRDI, se utiliza el módulo de la Fig. 4, dispone de la etapa de control y potencia para ajustar la velocidad, tiempo de activación y retención; a través de un convertidor de 1500 W, que eleva el voltaje a 90 voltios y proporciona hasta 20A de corriente, conmutando los valores necesarios para la investigación



Fig. 4 Módulo de activación de inyectores

2.4. Banco de pruebas de sistema Common

Utilizado para probar inyectores de diferentes marcas como Bosch, Delphi, Denso, Siemens [10], dispone de un software que genera el informe de pruebas realizadas el cual compara resultados con parámetros establecidos por el fabricante de bombas e inyectores ya que este banco cuenta con una base de datos de valores. Es un equipo el cual permite realizar varias pruebas tales como: estanqueidad, plena carga, pre inyección, emisiones y ralentí.



Fig. 5 Banco de pruebas CRDI

2.5. Medidor de LCR

Instrumento electrónico que permite medir inductancia, capacitancia y resistencia. Se utilizó para medir la inductancia de la bobina del inyector en una escala de 2 mH, y se midió la resistencia de la misma en una escala de 200 Ω .

2.6. Comprobación del estado de inyectores utilizando banco de pruebas SPEDMAQ S40s

Tabla 4 Pruebas realizadas en el banco de pruebas CRDI

Prueba	Característica	Frecuencia	Tiempo de inyección	Presión
Estanqueidad	El banco le somete a una presión de 1010 bares al inyector, para comprobar que exila hermeticidad en ese, y que nada del exterior entre ni que nada del interior salga. Esta prueba dura 50 segundos con una alimentación de 0,6 bar y se realiza bajo los siguientes	15 Hz	2000 ms	1100 Bar

	parámetro expuestos en la tabla 29			
Pre inyección	Esta prueba dura 30 segundos con una alimentación de 0,7 bar	66,67 Hz	160 ms	800 Bar
Ralentí	Esta prueba dura 50 segundos con una alimentación de 0,7 bar	6,67 Hz	1000 ms	800 Bar
Plena carga	Esta prueba duro 30 segundos con una alimentación de 0,6 bar	16,7 Hz	1000 ms	1000 bar

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pruebas de comportamiento eléctrico y de funcionamiento mecánico del inyector

Las pruebas de comportamiento del inyector consisten en el análisis eléctrico de la inductancia, resistencia, aislamiento de la bobina, utilizando un medidor LCR. El análisis mecánico del caudal de entrega y caudal de retorno en pruebas de estanqueidad, ralentí, pre inyección y plena carga, fueron realizados en el banco de pruebas CRDI SPEEDMAQ S40.

3.2. Inductancia

En la Tabla 5 se presenta los valores de inductancia obtenidos luego de cada intervalo de funcionamiento.

Tabla 5 Inductancia de inyectores CRDI

Inductancia de la bobina					
Horas	0	50	100	150	200
(mH)	0.437	0.434	0.434	0.433	0.442

En la Fig.6 se puede observar que existe una diferencia de 0.012 mH entre el valor máximo y el valor mínimo, esta diferencia es el resultado del ajuste que se realizó con el torquímetro a la bobina del inyector.

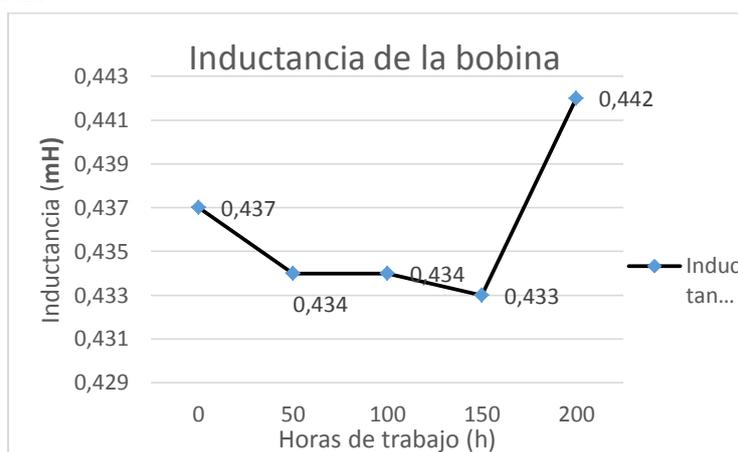


Fig. 6 Inductancia de la bobina

3.3. Resistencia

En la Tabla 6 se especifica los valores de la resistencia de la bobina del inyector en la escalas de ohmios (Ω).

Tabla 6 Resistencia del bobinado del inyector (Ω)

Horas	Resistencia de la bobina				
	0	50	100	150	200
(Ω)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

En la Fig.7 se analiza que no existen diferencias en la medida de resistencia de la bobina con el transcurso de las horas de funcionamiento con la mezcla combustible.

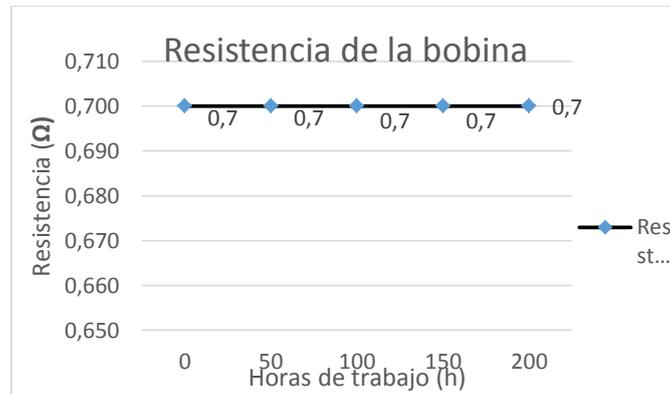


Fig.7 Resistencia de la bobina

3.4. Prueba de estanqueidad

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos en el banco de pruebas en el modo de estanqueidad.

Tabla 8 Estanqueidad (ml)

Horas	Estanqueidad				
	0	50	100	150	200
Caudal (0 ml a 0 ml)	0	0	0	0	0
Retorno (0 ml a 20 ml)	0	0	0	5	9

En la Fig 8 verifica que el caudal inyectado en la prueba de estanqueidad fue de 0 ml y el de retorno es de 9 ml en las 200 horas, valores que están dentro de los rangos indicados por el fabricante, lo que indica que el inyector no tiene fugas de combustible.

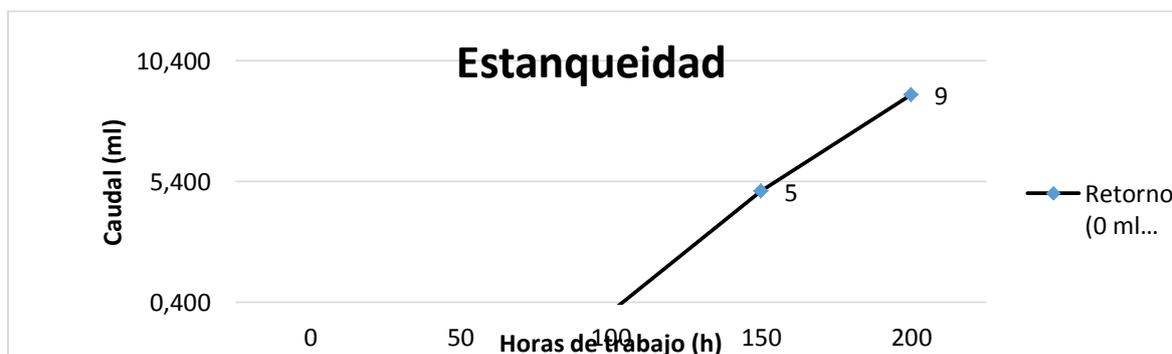


Fig.8 Prueba de estanqueidad

3.5 Prueba de pre – inyección

En la Tabla 9 se detalla los valores obtenidos en la prueba de pre inyección del inyector, al trabajar a una presión de 800 bar.

Tabla 9 Pre – inyección (ml)

Pre – inyección					
Horas	0	50	100	150	200
Caudal (70 ml a 80 ml)	75	72	54	59	80
Retorno (25 ml a 35 ml)	17	24	28	25	47

En la Fig. 10 se visualiza que el caudal de inyección mínimo fue de 54 ml en las 100 horas, valor que esta fuera de rango, aumentando con el pasar de las horas de funcionamiento hasta que se encontró nuevamente dentro del rango establecido por el fabricante a las 200 horas con un caudal máximo de 80 ml. El caudal de retorno mínimo fue de 17 ml a las 0 horas, valor que esta fuera del rango de tolerancia, esta medida va aumentando con las horas de funcionamiento obteniendo un máximo de 47 ml a las 200 horas valor que esta fuera del rango permisible.

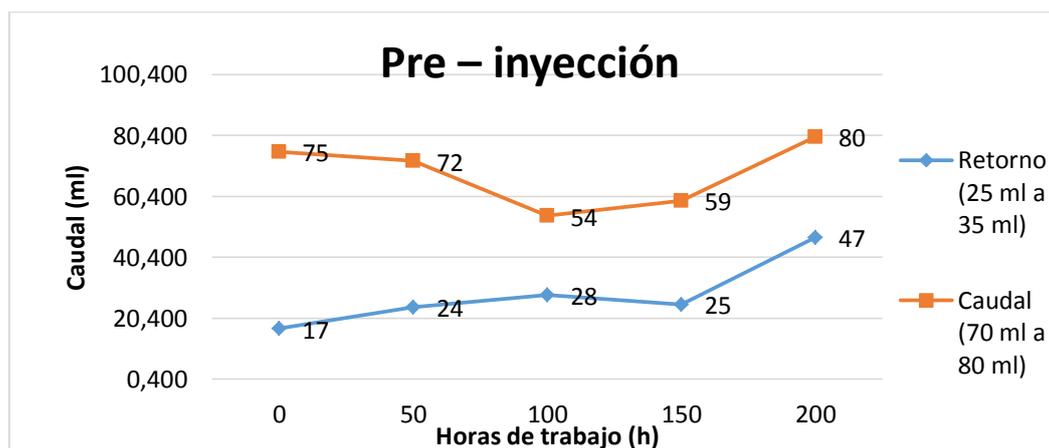


Fig. 10 Prueba de Pre inyección

3.6. Prueba de ralentí

En la Tabla 11 se presentan los valores de los caudales medidos en la prueba, al trabajar a una presión de 800 bar.

Tabla 11 Prueba de ralentí (ml)

Ralentí					
Horas	0	50	100	150	200
Caudal (10 ml a 20 ml)	15	14	11	10	29
Retorno (5 ml a 10 ml)	4	7	6	7	30

En la Fig 11 el caudal de inyección mínimo fue de 10 ml en las 150 horas, valor que está dentro del rango, el valor máximo obtenido fue de 29 ml a las 200 horas, valor que se encuentra fuera del rango permisible. El caudal de retorno mínimo fue de 4 ml a las 0 horas,

valor que esta fuera del rango de tolerancia, esta medida va aumentando con las horas de funcionamiento obteniendo un máximo de 30 ml a las 200 horas valor que esta fuera del rango permisible.

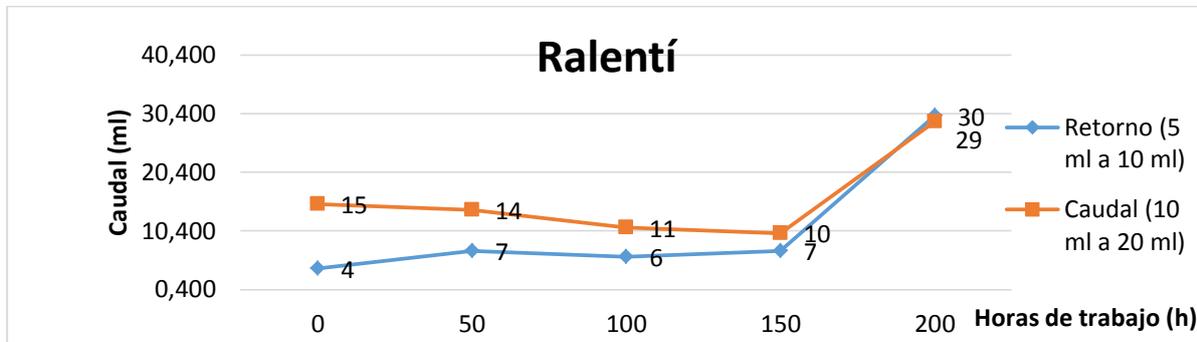


Fig.11 Prueba de ralentí

3.7. Prueba de plena carga

En la Tabla 12 se muestran los valores de los caudales medidos en la prueba, trabajando a una presión de 1010 bar.

Tabla 12 Prueba de plena carga (ml)

Plena carga					
Horas	0	50	100	150	200
Caudal (45 ml a 60 ml)	53	53	54	55	56
Retorno (15 ml a 25 ml)	14	16	20	16	39

En la Fig. 12 el caudal de inyección mínimo fue de 53 ml en las 0 horas, valor que está dentro del rango de tolerancia, aumentando con el pasar de las horas de funcionamiento hasta un valor máximo de 56 ml, medidas que se encuentran dentro del rango permisible. El caudal de retorno mínimo es de 14 ml a las 0 horas, valor que esta fuera del rango de tolerancia, esta medida va aumentando con las horas de funcionamiento obteniendo un máximo de 39 ml a las 200 horas valor que esta fuera del rango permisible.

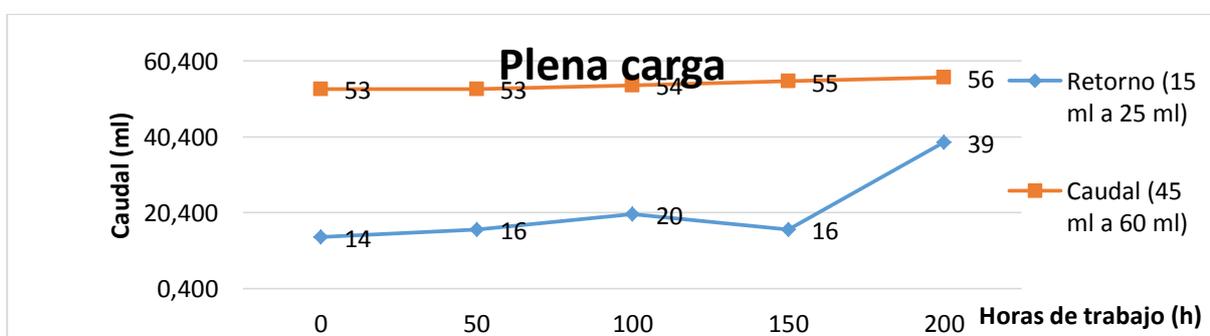


Fig.12 Prueba de plena carga

3.8. Aislamiento de la bobina

En la Tabla 13 se puede observar la medida de aislamiento de la bobina del inyector, esta medida puede ser alterada por el derretimiento de la capa de aislación que posee la bobina internamente por efecto de temperaturas elevadas, en este caso la bobina obtuvo una medida de infinito en cada periodo de funcionamiento, lo cual indica que está en buen estado el aislamiento de la misma con respecto al cuerpo del inyector.

Tabla 13 Aislamiento de la bobina (M Ω)

Aislamiento de la bobina					
Horas	0	50	100	150	200
(Ω)	INFINITO	INFINITO	INFINITO	INFINITO	INFINITO

4. CONCLUSIONES

Las pruebas de comportamiento electrónico del inyector diésel CRDI referido a inductancia, resistencia y aislamiento de la bobina, indican que inyector no presentó ninguna variación en sus medidas en cada período de trabajo, lo que demuestra que la mezcla combustible no afecta el comportamiento electrónico de la bobina.

En los test realizados en el banco de pruebas CRDI al inyector se logró determinar que en la prueba de estanqueidad el inyector cumple los parámetros de funcionamiento indicados por el fabricante, en el test de pre inyección se perdió la medida de retorno de combustible a las 200 horas, en el test de ralentí el inyector sobrepasó los valores de operación indicados por el fabricante a las 200 horas, en el test de plena carga el valor de caudal de retorno se encontró fuera de los valores indicados por el fabricante dentro de las 200 horas.

La mezcla combustible a una concentración del 20% genera beneficios en el rendimiento térmico del motor y también en la reducción de gases contaminantes, sin embargo la presencia de agua y químicos generan pérdidas de tolerancias en los elementos del inyector que se traduce en desgastes que limitan el uso de este tipo de combustible.

AGRADECIMIENTOS (OPCIONAL)

A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Grupo de Investigación SAEM R&D y a la Carrera de Ingeniería Automotriz.

REFERENCIAS

1. Alam, C., Saravanan, C., & Anand, B. (2016). Impact of high fuel injection pressure on the characteristics of CRDI diesel engine powered by mahua methyl ester blen. *Applied Thermal Engineering*, 702-711.
2. Yilmaz, N., Atmanli, A., & Vigil, F. (2018). Quaternary blends of diesel, biodiesel, higher alcohols and vegetable oil in a compression ignition engine. *Fuel*, 212
3. Neha, S., Nilanjan, P., Dey, S., & Ajay, M. (2017). Characterizations of surfactant synthesized from palm oil and its application in enhanced oil recovery. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 1-13.
4. I, J., & M, S. (2001). Surfactants based on fatty acids and other natural hydrophobes. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 178-88.
5. Flaaten, A., Nguyen, Q., Pope, G., & Zhang, J. (2008). Systematic laboratory approach to low-cost, high-performance chemical flooding. *Society of Petroleum Engineers*.
6. Holmberg, K., Jönsson, B. K., & Lindman, B. (2013). Surfactants and polymers in aqueous solution. Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd.

7. Eliezer, A. (s.f.). *Caracterización del comportamiento de un motor mono-cilíndrico de encendido por compresión usando combustible emulsionado (Tesis de maestría)*. La Habana: Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”
8. Sivakumar, S., Raju, B., & Rajulapati, K. (2018). Influence of ZrB₂ hard ceramic reinforcement on mechanical and wear properties of aluminum. *Ceramics International*, 1-54.
9. Pucují, D. (2016). *Investigación del potencial energético de la emulsión diesel -agua al 5-10-15 Y 20 % con el uso de surfactante para determinar su influencia en los parámetros mecánicos y térmicos del motor de combustion interna (Tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
10. Salinas, C., & Villavicencio, R. (2013). "Diseño y construcción mecánica de un banco de comprobación de inyectores diesel: Denso, Delphi, Bosch del sistema CRDI.". *Tesis de pregrado*. Univerddidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
11. Bassante, J., Díaz, S. & Erazo, G. (2019). análisis del desgaste del pulverizador y comportamiento electrónico de inyectores crdi y bomba de alta presión cp al utilizar la mezcla combustible diesel surfactantes de agua". *Tesis de pregrado*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.

INTERFAZ DE UN TABLERO DIGITAL PARA EL CONTROL DE SEÑALES DEL MOTOR EN UN VEHÍCULO FÓRMULA SAE

(INTERFACE OF A DIGITAL BOARD FOR THE CONTROL OF ENGINE SIGNALS IN A SAE FÓRMULA VEHICLE)

C. Padilla-Padilla¹, B. Cuaical-Angulo*², L. Buenaño-Moyano³
E. Guacho-Guado⁴, J. Villagrán - Cáceres⁵

1,2,3,4,5. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: 0996374920, bcaical@esPOCH.edu.ec, B. Cuaical

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal construir un tablero electrónico-digital basado en la normativa de la Fórmula SAE. La ejecución se realizó con la ayuda del software de diseño gráfico para diseñar las dos interfaces, mediante el software Proteus se realizó los diseños de los circuitos de la tarjeta electrónica para receptar las señales de los sensores y de la placa electrónica que convierte el tipo de onda senoidal a cuadrada si así conviene el caso, de la misma manera mediante el software Bascom AVR se realizó la programación para la presentación de la interfaz, la misma que fue grabada en el microcontrolador ATMEGA 328P y que contiene parámetros tales como: temperatura del refrigerante del motor, la velocidad del vehículo tipo fórmula, las revoluciones por minuto del motor de combustión interna, el odómetro y los cambios de marcha, estos son visualizados en la pantalla TFT Nextion que va acoplado en el tablero de instrumentos del habitáculo del vehículo pero también se realizó una visera en fibra de vidrio de tal manera que cubra la pantalla, para obtener una buena visibilidad de los indicadores del tablero electrónico-digital cuando el vehículo este en marcha. Se emplearon pruebas y métodos de medición, cuyos resultados obtenidos evidenciaron el correcto funcionamiento del tablero electrónico-digital el cual muestra los diferentes parámetros al conductor sobre el comportamiento del vehículo de competencia, con la finalidad de salvaguardar la integridad física de los elementos del monoplaza. Se pudo concluir que el tablero electrónico-digital es de gran ayuda durante la competencia, informado al conductor sobre el estado del vehículo.

PALABRAS CLAVES: Fórmula SAE, Tablero de Instrumentos, Sensores, Pantalla LCD.

ABSTRACT

The main objective of this research is to build an electronic-digital board based on the SAE formula. The execution was carried out with the help of the graphic design software for the design of the interfaces, using the Proteus software the design of the circuits of the electronic card was made to receive the signals from the sensors and the electronic board that the type of Bascom AVR voice control system was developed programming for the presentation of the interface, which was recorded in the ATMEGA 328P microcontroller and contains the following comments: temperature of the engine coolant, the speed of the vehicle type formula, the revolutions per minute of the internal combustion engine, odometer and gear changes, these are displayed on the Nextion TFT screen that is attached to the dashboard of the vehicle interior, but also to obtain a good visibility of the dash indicators electronic-digital when the vehicle is running. Testing and measuring methods were used, resulting results evidencing correct functioning of the electronic-digital board quality of the results of the driver's results of the activity of the competition vehicle, with the purpose of safeguarding the physical integrity of the elements of the car. . It can be concluded that the electronic-digital dashboard is of great help during the competition, informing the driver about the state of the vehicle.

KEY WORDS: SAE Formula, Instrument Panel, Sensors, LCD Screen.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad todos los automóviles presentan este tipo de paneles de instrumentos, varios años atrás eran muy pocos los automotores que traían incorporados este panel, de tal manera que solo vehículos de gama alta lo usaban. Ahora es muy importante, en especial para brindar confort y seguridad a los ocupantes se lo puede observar desde vehículos comerciales de gama baja hasta autos de competencia como los Fórmula 1. (Pérez J. M., 2014)

Este tablero electrónico-digital se encargará de mostrar al conductor los diferentes parámetros sobre el comportamiento del vehículo de competencia a diferentes condiciones y así salvaguardar la integridad física de los elementos que lo constituyen ya que si existe un mal funcionamiento dentro del monoplace nos arrojará un mensaje de advertencia, también con la implementación de este tablero de instrumentos electrónico-digital se pretende fomentar la investigación y el desarrollo tecnológico del país en el campo automotriz. Es muy importante incentivar ya que en la actualidad los tableros solo son ensamblados en los vehículos, pero fuese importante diseñar e implementar otro tipo de tecnología. (Pérez J. M., 2014)

La fórmula SAE se ha enfocado en el diseño de ingeniería siendo un concurso de estudiantes que cruzan el pregrado y posgrado, sus siglas hacen referencia a SOCIETY OF AUTOMOTIVE La Fórmula SAE nace en 1982 en Estados Unidos esta competición resultó ser un éxito total por lo que se expandió por varios países resultando una competencia novedosa en la que se aplican todas las herramientas de la ingeniería. El concurso ofrece a los participantes la oportunidad de mejorar sus habilidades de diseño de ingeniería y gestión de proyectos mediante la aplicación de los conocimientos teóricos impartidos en las aulas y puestos en práctica en una competición exigente ya que existe la presencia de universidades con alto renombre internacional, en este desafío no solo se mide la velocidad de los automotores, al contrario se mide el nivel ingenieril de cada grupo incluso se puede llegar a tener el auspicio de marcas reconocidas como Ford, Porsche, BMW, entre otras (SAE, 2016)

Cada grupo de estudiantes sobresale dentro de la competición de tal manera que se enfoca en la investigación, fabricación, diseño, pruebas en el monoplace, desarrollo, administración y finanzas para la escudería. Se busca un diseño exclusivo que cumpla con todas las reglas establecidas por la fórmula SAE, el evento promueve la ingeniosa solución, después de realizar el ensamble del monoplace se somete a una serie de pruebas con el fin de comprobar el funcionamiento y la sujeción a las reglas de la carrera, siendo primordial para el acceso del autódromo. . (SAE, 2017)

Panel de instrumentos digital

En la actualidad los sistemas buscan ser más eléctricos y electrónicos sustituyendo así a los elementos mecánicos que eran usados en la antigüedad, varios de estos elementos han hecho un habitáculo lujoso, facilitando la manipulación de accesorios al conductor y ocupantes como sucede con los elevallas, control de asientos, cierre de puertas, entre otras. Lo que se recalca es el panel de instrumentos ya que es lo primordial en la cabina al momento de conducir, es la comunicación que existe entre el vehículo y el conductor, nos aporta tanta información que puede ayudar a prevenir ciertos daños en el automotor (Ferrer, 2013)

La transmisión de datos es importante ya que necesitamos de una computadora central, estas redes están conectadas brindando la información correcta para que después puedan ejecutar cierta acción con otros elementos eléctricos o electrónicos conocidos como actuadores y cada uno tiene un trabajo en específico, esta computadora es conocida como ECU sus siglas hacen referencia a Engine Control Unit (Doblado, Marín, & Barrero, 2011)

Estas redes eléctricas y electrónicas facilitan la interconexión entre los distintos módulos de control, su fin es que cada modulo posee sus actuadores, cada modulo va seccionada para un sistema en especial, tras la evolución de estos sistemas se ha logrado sustituir la gran cantidad de cables ahora solo la comunicación se realiza por dos cables la información va enviada hacia los módulos y dependiendo de la señal ingresa o no al sistema para que un actuador ejecute una acción. (Ferrer, 2013)

La evolución de estos sistemas han cambiado de manera gigantesca, como se explico anteriormente el panel de instrumentos es el sistema que actúa como un intermediario ya que toda las señales captadas por sensores, resultado algo difícil de interpretar, es transformado a señal fácil de interpretar, y lo hace mediante luces y simbolos ubicadas en el panel de instrumentos, lo que se ha buscado es que esos sistemas sean mas precisos al momento de proyectar la información, existe un campo amplio acerca de diseños y cada fabricante posee uno distinto. (Alexandre, 2012)

Los grupos LED han sobresalido en varios sistemas los últimos años ya que presentan grandes ventajas como su durabilidad, ahorro de espacio, una excelente iluminación, lo que hace de un panel de instrumentos un elemento lujoso y moderno. Y no tan solo se usa en el habitáculo también se usa en la iluminación externa del vehículo, teniendo características diferentes a los faros convencionales. (Doblado, Marín, & Barrero, 2011)

Estos paneles hoy en día muestran un elevado número de información e indicadores, se puede observar en vehículos antiguos que poseen muy pocos indicadores que se podría decir que son los básicos, con la adaptación de sensores y actuadores en los vehículos actuales es esencial un panel para brindar seguridad al conductor y sus ocupantes, incluso existen colores los cuales alertan si existe algún daño. A continuación, se van a mostrar varias situaciones tales como:

- Color verde o azul: Todo funciona de la manera correcta.
- Color amarillo: Este color es símbolo de precaución, cuando en el panel se enciende un color de estos el vehículo aún puede circular, lo que nos quiere decir es que se requiere un mantenimiento por una avería en algún sistema.
- Color rojo: Cuando se enciende alguna luz testigo con este color es obligatorio detener el vehículo y buscar ayuda para evitar más daños.

En este caso para el vehículo SAE solo se va a usar el panel para brindar información acerca de: velocidad, marchas, revoluciones, temperatura. La información se despliega en la pantalla de forma digital para que sea más visible para el conductor.

Normativa de la Fórmula SAE

La fórmula SAE no tiene un reglamento que interrumpa la ejecución ingenieril de un grupo, puede tener cualquier diseño, ya que es el elemento que monitorea el comportamiento del

monoplaza en la carrera así que debe realizarse según la Escudería para la comodidad del conductor. Por lo general las normas establecidas por la Formula SAE tiene un enfoque a el diseño y seguridad del conductor. (SAE, 2017)

Regla T4.6. La accesibilidad a los controles

En lo que hace referencia esta regla es que los mandos deben estar en el interior de la cabina lo que el grupo debe enfocarse es en el lugar de fijación de la pantalla ya que el volante va unos centímetros mas abajo del arco frontal, En la regla T3.25 hace referencia a la estructura del impacto lateral, T3.3 monocasco de impacto. De la misma manera la pantalla debe tener la inclinación correcta ya que el casco del piloto va delante del arco principal. (SAE, 2016)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se pretende generar una innovación automotriz enfocado a la tecnología en tableros de instrumentos, generando un prototipo totalmente digital como los que se usa en vehículos de alta gama. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010)

En esta investigación, se pretende elaborar un tablero electrónico – digital con materiales de fácil adquisición en nuestro país.

Para la construcción se utilizó los siguientes componentes:

Tabla 1. Materiales a utilizar

	Soporte
Pantalla TFT Nextion de 7 pulgadas	Pantalla táctil resistiva
	FPGA
	Protector de pantalla
	Resistencias y capacitores
	Tornillos y tuercas
	Módulo regulador de voltaje
	Puente rectificador
	Circuito integrado ATMEGA 328P
	Cables, tornillos y tuercas
	Resistencias
Tarjeta electrónica de las señales de los sensores	Capacitores
	Circuito integrado LM393P amplificador operacional
	Resistencias
	Capacitores
Placa electrónica del convertidor de onda	Transistores
	Cables
	Potenciómetro
	Tornillos y tuercas
	Base para circuito integrado

Visera y soporte del tablero	Visera de fibra de vidrio
	Triplex de 4 líneas
	Tornillos y tuercas
	Ángulos metálicos
	Pintura en spray de color blanco, azul y negro
	Pernos con tuercas

Metodología

Se plantea una metodología deductiva ya que se parte de lo general a lo particular para el diseño y la construcción del tablero electrónico-digital, además de una visera que cubre la pantalla brindando confort al piloto, se realizó fibra de vidrio para realizar este componente. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010)

Diseño del interfaz

Al momento de seleccionar el tipo de interfaz que va a ser visualizada en la pantalla nos apoyamos en Adobe Illustrator que es un software para diseño de tal manera que podemos crear las distintas ventanas que se van a reflejar en el panel con las diferentes figuras, colores, letras, se buscó una distribución amplia y el diseño con números grandes para facilitar la visibilidad del piloto en la competición. Además, el tamaño de la Pantalla TFT Nextion es el correcto. (Marcombo, 2012)



Figura 1. Interfaz de tablero electrónico-digital

Diseño de los circuitos de las señales de los sensores y del convertidor de onda.

Antes de realizar el circuito procedemos a realizar una simulación apoyándonos en el software Proteus realizando previamente un esquema eléctrico de nuestro circuito, se puede usar una simbología que es algo más visual hasta ubicar los elementos en el programa y ponerlos a prueba con una simulación luego se transfieren a una placa en el mismo programa, este software es de suma importancia ya que nos permite: observar el circuito con sus componentes, realizar la simulación verificando el comportamiento de cada elemento y visualizar en 3D la tarjeta y la placa electrónica con los elementos que los constituyen además se puede usar diferentes configuraciones para distribuir los elementos por toda la placa. (Frakes & Thomas, 1990)

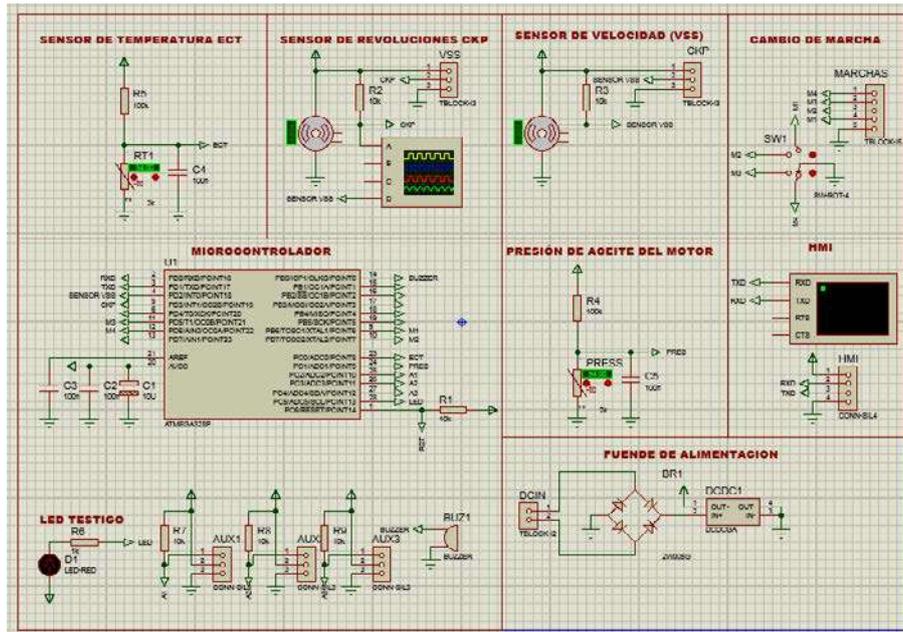


Figura 2. Diagrama de la tarjeta electrónica en el software PROTEUS

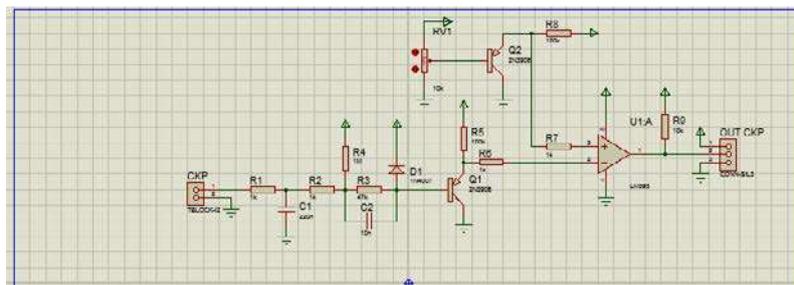


Figura 3. Diagrama de la placa electrónica en el software PROTEUS

Construcción de la tarjeta electrónica y de la placa electrónica.

Es esencial montar todos los componentes en una protoboard antes de realizar en la tarjeta electrónica, el circuito que vamos a realizar es para transformar el tipo de onda senoidal a cuadrada para aprovechar la señal del sensor de la mejor manera ya que en este proceso si algo llegase a salir mal se pueden desmontar los compuestos y ser reemplazados o en otro caso se pueden cambiar de ubicación si se desea que el circuito sea más compacto (Miguel, 2011)

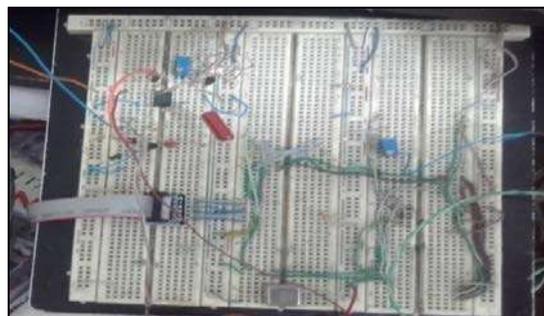


Figura 4. Realización de los circuitos en la protoboard, realizados con fines experimentales

Al momento de verificar el correcto funcionamiento en la simulación de Proteus se procede a realizar la placa electrónica en este proceso es necesario tener conocimientos del software PROTEUS ya que vamos a diseñar el diagrama para pasarlo al diseño de la placa de tal manera ubicar los elementos de la forma más cómoda y compacta, así como se muestra en la figura 5

Al momento de tener diseñado nuestro circuito en PROTEUS procedemos a imprimir en papel transferible blanco, sin diseños, además debemos tener una baquelita que esté cortada a la medida para poder transferir el diagrama.

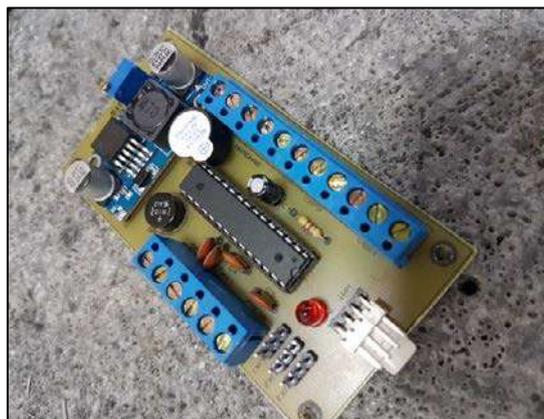


Figura 5. Tarjeta electrónica con sus componentes electrónicos.



Figura 6. Placa electrónica

Programación y grabado de datos en el microcontrolador ATMEGA 328P.

Es uno de los pasos más importante para que la visualización sea la precisa en nuestro caso vamos a usar el software Bascom AVR que es un lenguaje fácil de escribir hace referencia al lenguaje de programación en BASIC (Atmel Corporation, 2014), de tal manera que es usado para microcontroladores de toda la familia AVR, el grabado lo vamos a realizar sobre nuestro microcontrolador y toda la información va a ser compilada en este elemento. (Digital, L. D., 2015)

```

$regfile = "m328pdef.dat"
$crystal = 8000000
$hwstack = 140
$swstack = 160
$framesize = 132
$baud = 9600

Config TIMER1 = Timer . Prescaler = 256
On TIMER1 Segundo
Enable TIMER1

Config INT0 = Falling
On INT0 Vssi
Enable INT0

Config INT1 = Rising
On INT1 Ckpi
Enable INT1

'pin entrada
DDRD.3 = 0
PORTD.3 = 1

Config ADC = Single . Prescaler = Auto . Reference = Avcc
Start ADC

Const Rt = 5 / 1023
Const Rxi = 100000

'vin entrada temperatura
DDRC.2 = 0
PORTC.2 = 1
'Variables de temperatura
Dim Vo As Single
Dim Va As Single

```

Figura 7. Programación en el software Bascom AVR usando un lenguaje BASIC

Pantalla TFT Nextion de 7”.

Se escogió la pantalla LCD TFT Nextion de siete pulgadas ya que es la adecuada para la visualización de todos los indicadores y en especial es de gran ayuda ya que posee su propio software de programación como es Nextion Editor el cual nos permite generar nuestra propia interfaz y diseño, nos ahorra mucho tiempo ya que si no tuviéramos este software de programación se debería acudir a otro software resultando un trabajo más extenso, de tal manera que se puede generar una pequeña cubierta realizada con fibra de vidrio sin tomar mucho espacio, esta pantalla posee una FPGA, el microprocesador está destinado al video ya que es un procesador que actúa con velocidad, tener una velocidad alta en las imágenes precisando de esta manera los datos, tiene un modo grafico estándar. En si buscamos una pantalla que envíe la información lo más rápida para que sea confiable para el conductor, las características que posee este dispositivo es una resolución de 800 x 480 pixeles, posee hasta 32 MB de memoria lo que nos sirve como espacio para almacenar datos, usa un puerto HMI para su comunicación lo que ayuda a eliminar cualquier tipo de inconveniente con el cableado. (Crespo López, 2015)



Figura 8. Pantalla TFT Nextion de 7” con el diseño integrado por el software Illustrator

Programación en Nextion Editor de la pantalla TFT.

El diseño del interfaz es enriquecido mediante varios componentes como botones, texto, barra de procesos, panel de instrumentos entre otros.

Como se explicó con anterioridad la programación es muy sencilla ya que actúa directamente sobre la pantalla siendo de esta manera amigable con sus clientes ya que no se usa de un software externo. (Domínguez & Ferrer, 2013)



Figura 9. Programación en el software Nextion editor

Construcción de la visera de la pantalla TFT Nextion

La visera para el vehículo fórmula SAE fue construida de fibra de vidrio ya que nos otorga varias propiedades tales como: una buena resistencia química, su peso es muy ligero ayudando a la ligereza del vehículo, es un excelente aislante térmico, por su gran resistencia, por su versatilidad, por sus características similares a las de fibra de polímeros y de carbono lo cual nos permiten una facilidad de moldeo, además ayudando a la aerodinámica del monoplaza (Jinez Montesdeoca & Pilamunga Pilamunga, 2016)

La visera de fibra de vidrio está diseñada con el fin de proteger la pantalla y dar sombra para que de tal manera se puedan visualizar los datos y proteger al dispositivo de agentes externos que dañen su funcionamiento.



Figura 10. Visera de la pantalla TFT fabricada con fibra de vidrio

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al momento de realizar las pruebas se logró verificar el correcto funcionamiento del panel de instrumentos, el cual brinda la información en tiempo real del comportamiento del vehículo lo cual es bueno para salvaguardar la integridad de los elementos del motor, además ofrece al conductor una interfaz de fácil visualización siendo esencial al momento de conducir el vehículo.



Figura 11. Tablero electrónico- digital Fórmula SAE

Pruebas de Funcionamiento

Las pruebas son muy importantes en el monoplaza para verificar su comportamiento en el monoplaza a distintas condiciones al momento de implementar el panel de indicadores las pruebas se realizan a distintas condiciones para probar la confiabilidad del circuito implementado en la placa, además estas pruebas deben realizarse con el monoplaza rodando en una pista, ya que existen distintos tipos de sensores, en ciertos casos se puede variar la posición de los sensores ya que si tenemos un sensor ultrasónico al momento de detectar la lluvia este dispositivo empieza a mostrar mensajes erróneos, por lo que estos componentes deben tener una protección y sujeción correctas

Pruebas de los sensores

Para la siguiente prueba nos apoyamos en un osciloscopio el cual es un equipo para detectar las señales enviadas por un sensor y es en este momento donde vamos a verificar el funcionamiento de nuestro circuito acerca del cambio de onda que se realizó en la placa electrónica las pruebas se la realizaron a las revoluciones del motor, sensor de posición del cigüeñal o CKP, sensor de velocidad o VSS, sensor de la temperatura del refrigerante o ECT, se debe verificar la señal de onda que estos reflejan, para no dar señales erróneas a la ECU, el circuito que se realizó tiene el fin de convertir la señal senoidal a una señal cuadrada, portándose como un conmutador ya que si usamos una señal senoidal vamos a tener varios datos en distintos tiempos, de esta manera no nos sirve la señal recibida ya que se desea realizar acciones cada vez que llegue a un pico de la grafica



Figura 12. Pruebas de los sensores realizadas en el monoplaza

Prueba del interfaz de la pantalla TFT

Como se observa en la Figura 13 se realizó tres diseño en nuestros software para una mejor conducción del monoplaza, existe una distinción de tamaños, diseños, figuras. Se diseño las tres interfaces con el fin de no acumular demasiada información en la pantalla ya que solo será una distracción para el conductor.



Figura 13. Interfaz del tablero electrónico-digital

Las interfases fueron diseñadas para mostrar datos en tiempo real tan solo con cambiar las distintas pestañas ubicadas en la pantalla se van a desplegar los distintos datos que el motor envía al monoplaza.

Prueba de las revoluciones del motor

La prueba se realizó en un lapso de tres minutos con el motor encendido y a diferentes revoluciones en el cual se comprobó la velocidad con la que emite los datos, claros y precisos para el correcto monitoreo interno que realizara el conductor. Esta prueba se realizo en neutro con el monoplaza levantado. Se eligió este diseño porque es el más común que se encuentran en los vehículos hoy en día, es uno de los factores más importantes porque según el régimen de revoluciones se obtienen distintos tipos de conducción como eco driving, pero en este tipo de competencia se busca lograr la máxima potencia por lo general se desarrollo a 3500 revoluciones para lo cual el conductor debe visualizar en la pantalla para ir a la marcha siguiente, además ser una medida de protección para el vehículo ya que si llegamos al corte del motor estamos poniendo en peligro varios componentes mecánicos.



Figura 14. Prueba de las revoluciones del motor

Prueba de la velocidad del monoplaza

Las pruebas se realizaron a una velocidad de 80 Km/h para lo cual se iban incrementando las marchas y las revoluciones del motor, la prueba se detuvo a esta velocidad para salvaguardar la integridad física del motor. Además, que las pruebas se deben realizar en un autódromo.



Figura 15. Prueba de velocidad del monoplaza

Prueba de la temperatura del refrigerante

Para esta prueba se realizó con la caja de cambios en neutro el tiempo de funcionamiento tuvo un lapso de tres minutos con una aceleración progresiva de las revoluciones, es importante que el monoplaza este elevado, en esta prueba la temperatura alcanzó aproximadamente los 80 °C e iba en aumento.

Como en las anteriores prácticas el motor se detuvo después del lapso de trabajo con el fin de proteger los componentes del motor ya que como se explicó el monoplaza estaba levantado y en neutro si se buscaba aumentar la temperatura se debía elevar el número de revoluciones por lo tanto podía llegar al corte del motor, comprobando el correcto funcionamiento del microcontrolador y de la programación en la Pantalla LCD TFT Nextion. Esta prueba también se la pueda realizar con el monoplaza circulando en un autódromo.



Figura 16. Prueba de la temperatura del refrigerante del motor

Prueba de visualización y cambio de marcha

Para la siguiente prueba nos apoyamos con el sensor CKP o Sensor de posición del cigüeñal además con el sensor VSS o Sensor de velocidad del vehículo, en este momento no se cuenta con un circuito que vaya ubicado en la caja de cambios para poder recibir una señal que reconozca el microcontrolador y de tal manera desplegar la información en la pantalla TFT

Para que nuestro piloto se guíe en la marcha en la que se encuentra el monoplaza se espera efectuar el circuito electrónico para conectar a la caja de cambios de tal manera desplegar la información en la pantalla TFT, nos ayudara para tener un mejor monitoreo del conductor.

El número de marchas se colocó en esta posición de la pantalla ya que se encuentra en el centro y ayuda al conductor para visualizar las revoluciones por minuto y la marcha a la que se encuentra, existen otras maneras de reflejar el número de marchas como ubicar el número total de marchas de la caja e implementar una señal que señale conforme a la marcha en la que se está manejando el conductor.



Figura 17. Prueba de los cambios de marchas

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación ayuda a que nuevos investigadores diseñen nuevas tecnologías ya que a este sistema se le puede incorporar una gran cantidad de sensores y así tener un mejor control, la información debe ser la necesario para que el interfaz sea sencillo y preciso al momento de conducir el monoplaza

Las pruebas y métodos que se realizaron al monoplaza se realizaron con el vehículo levantado, en esta prueba se visualizo que los sensores y los circuitos funcionan de la mejor manera, pero se espera realizar las mismas pruebas con el monoplaza en marcha sobre el autódromo para verificar el comportamiento de los sensores y del lugar en los que se ubicaron, de la misma manera verificar si los agentes externos no afectan la información que estos toman.

5. REFERENCIAS

- Alexandre, F. (01 de Marzo de 2012). *Ingeniería Eléctrica Electrónica, S.A.* Recuperado el 17 de Junio de 2016, de <http://www.ieespain.com/ieeproteus/>
- ATMEL, C. (08 de Octubre de 2014). *Atmel Corporation.* Recuperado el 20 de Julio de 2016, de <http://www.atmel.com/devices/atmega328p.aspx>
- Barrau, P. R.-P. (2010). *Ergonomía I Fundamentos.* Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Chocano Maceda, J. (2018). Diseño de sistema de visualización de datos para vehículo clásico. *Tesis Doctoral.*
- Crespo López, J. (2015). *Fundamentos de electrónica.* Madrid: Ediciones Paraninfo.SA.
- Digital, L. D. (24 de Septiembre de 2015). *Laboratorio de electrónica digital.* Obtenido de <https://fabelecdigital.wordpress.com/2014/09/25/practica-2-implementacion-de-tablas-de-verdad-de-compuertas-logicas/>
- Doblado, J. A., Marín, R., & Barrero, Ó. (2011). *Sistemas electricos y de seguridad y confortabilidad.* Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Domínguez, E. J., & Ferrer, J. (2013). *Elementos amovibles.* Madrid: EDITEX.

- Frakes, W., & Thomas, P. (1990). Proteus: un sistema de biblioteca de reutilización de software. *Foro SIGM de ACM*.
- Guijarro, E. (12 de Enero de 2009). *UNROBOTICA*. Recuperado el 08 de Junio de 2016, de UNROBOTICA: http://www.unrobotica.com/manuales/Tutorial_AVR.pdf
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*.
- Jinez Montesdeoca, F. D., & Pilamunga Pilamunga, C. D. (2016). Diseño y construcción de un tablero electrónico-digital basado en la normativa vigente de la fórmula SAE para contribuir con la construcción de un vehículo de competencia para la ESPOCH. *Bachelor's thesis*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Lara Barragán, A., & Nuñez, H. (2006). FÍSICA 1 : Un enfoque constructivista. En E. QUINTANAR DUARTE (Ed.). México D.F, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Marcombo, S. (2012). *Aprenda Illustrator CS6 con 100 ejercicios prácticos*. Barcelona: ALFAOMEGA Grupo Editorial S.A.
- MCS Electronics . (26 de Julio de 2016). *www.mcselec.com*. Recuperado el 08 de Noviembre de 2016, de http://www.mcselec.com/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=41
- Miguel, P. A. (2011). *Electrotecnia*. Madrid: Ediciones Paraninfo, SA.
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Pérez, F. U. (21 de Diciembre de 2015). *La Revista Informática*. Recuperado el 24 de Junio de 2016, de <http://www.larevistainformatica.com/BASIC.htm>
- Pérez, J. M. (2014). *Circuitos eléctricos auxiliares del vehículo*. Madrid: Ediciones Paraninfo, SA.
- Redondo Quintela, F., & Redondo Melchor, R. C. (2016). *Redes Eléctricas de Kirchhoff - Teoría de Circuitos*. Salamanca, Salamanca, España: STS Ediciones.
- Rodríguez, A. P. (18 de Febrero de 2016). Recuperado el 11 de Septiembre de 2017, de Sistema de control, inyección y encendido, para motores térmicos y alternativos de ciclo Otto basado en programación abierta bajo LabVIEW: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4329/Memoria.pdf>
- SAE. (2017). Fórmula SAE® Rules. Alemania. Retrieved Abril 08, 2017, from https://www.fórmulastudent.de/uploads/media/FS-Rules_2017_V1.1_01.pdf

SAE, I. (15 de Agosto de 2016). *students*. Recuperado el 25 de Mayo de 2016, de <http://students.sae.org/cds/fórmulaseries/about/>

Valencia B., R. (16 de Julio de 2013). *Unrobotica*. Recuperado el 06 de Julio de 2016, de <http://www.unrobotica.com/manuales/Aplicaciones%20electronicas%20con%20micro%20controladores%20bascom.pdf>

Varle, M. (12 de Septiembre de 2015). *MikroElektronika*. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de <http://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespicbasic/chapter/lenguajes-de-programacion/>

Análisis de la utilización de equivalentes electromecánicos y su incidencia en la obtención de la relación matemática de transferencia de los sistemas de suspensión.

W. Villagrán^{(1)*}, E. Arguello⁽¹⁾, E. Cruz⁽¹⁾, J.C. Castelo⁽¹⁾, F, Sánchez⁽¹⁾

(1) Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica Escuela Superior Politécnica de Chimborazo EC060155
Autor correspondencia. Tel: 0987596974, Email: wvillagran@esPOCH.edu.ec (J. Villagrán)

RESUMEN

La investigación tiene como objetivo identificar la existencia de una ventaja significativa, en la utilización de analogías electromecánicas en la resolución de situaciones problemáticas concernientes a los sistemas mecánicos y eléctricos. El desarrollo del trabajo se fundamenta en los criterios matemáticos elementales que rigen el comportamiento físico de sistemas eléctricos y mecánicos. De acuerdo con la metodología empleada, el tipo de estudio es descriptivo correlacional. Para validar la investigación se consideró una población, constituida por 44 estudiantes pertenecientes a la carrera de Ingeniería Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a los mismos que se les aplicó una prueba, la cual consistía en la resolución de un ejercicio mecánico mediante aplicación de criterios de dinámica, y otra prueba utilizando el método de analogías electromecánicas. Los datos fueron examinados mediante estadística descriptiva, obteniendo las medianas de las muestras para posteriormente, mediante la utilización del estadístico adecuado realizar la correspondiente validación. Conforme a los resultados obtenidos en esta investigación, puede afirmarse que la utilización de equivalentes electromecánicos incide positivamente en el desarrollo de las destrezas necesarias que requieren los estudiantes de ingeniería para el perfeccionamiento de su formación profesional.

Palabras clave: Analogía electromecánica, electrostática, sistema eléctrico, sistema mecánico.

Analysis of the use of electromechanical equivalents and their incidence in obtaining the mathematical relationship of transfer of suspension systems.

Abstract

The objective of the research is to identify the existence of a significant advantage in the use of electromechanical analogies in the resolution of problematic situations concerning mechanical and electrical systems. The development of the work is based on the elementary mathematical criteria that govern the physical behavior of electrical and mechanical systems. According to the methodology used, the type of study is descriptive correlational. To validate the research was considered a population, consisting of 44 students belonging to the career of Automotive Engineering of the Higher Polytechnic School of Chimborazo, to which they applied a test, which consisted in the resolution of a mechanical exercise by application of dynamic criteria, and another test using the electromechanical analogy method. The data were examined by descriptive statistics, obtaining the medians of the samples for later, by using the appropriate statistic to perform the corresponding validation. According

to the results obtained in this research, it can be affirmed that the use of electromechanical equivalents positively affects the development of the necessary skills required by engineering students to perfect their professional training.

Keywords: *Electromechanical analogy, electrostatic, mechanical system, electrical system.*

1. INTRODUCCIÓN

Las analogías electromecánicas nacieron al observarse una semejanza en el comportamiento matemático de ciertos elementos que conforman los sistemas eléctricos y mecánicos. Dicha semejanza en su principio fue utilizada en el desarrollo de simulaciones de sistemas mecánicos con elementos eléctricos, lo cual permitía predecir, observar y conocer el comportamiento de un mecanismo sin la necesidad de la construcción de sus componentes, consiguiendo con ello un ahorro económico. Sin embargo, con el pasar del tiempo, es notorio cómo algunos sistemas mecánicos al transformarlos a sus equivalentes eléctricos adquieren una visualización más amplia para la persona que se encuentra al frente del problema planteado, y su resolución se facilita en gran medida. Actualmente con el análisis computacional, se pueden realizar simulaciones de sistemas mecánicos con facilidad antes de su construcción, sin embargo, el uso de las analogías se ha ampliado y se ha convertido en una herramienta que facilita la resolución de ciertos problemas eléctricos y mecánicos. Específicamente para un estudiante, la resolución de ciertos mecanismos se puede complicar, es por ello que se plantea la utilización de analogías electromecánicas como herramienta metodológica para el cálculo de la relación de transferencia, con el fin de facilitar al estudiante la comprensión del comportamiento de sistemas mecánicos y eléctricos, así como la relación que dichos sistemas guardan y mejorar a la par su rendimiento académico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de la investigación es de tipo experimental debido a que se manipulo una variable independiente, que en este caso es la utilización de equivalentes electromecánicos como herramienta de aprendizaje para la obtención de la relación matemática de transferencia en sistemas dinámicos. La investigación implicó un estudio de grupo que en primera instancia fueron 41 alumnos y en segunda instancia 44 alumnos pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH.

Las fuentes de investigación presentes en el artículo son de carácter bibliográfico debido a que es recopilación, valoración, crítica e información sobre equivalentes electromecánicos, además también es metodológica debido a que indaga sobre los aspectos teóricos y aplicados de medición, recolección y análisis de datos. El estudio de la investigación es de tipo correlacional, debido a que se manipula la variable independiente con el fin de analizar el rendimiento académico de los grupos antes y después de aplicar el método de equivalentes electromecánicos. La incorporación de esta herramienta metodológica es el resultado de consulta de textos de investigación científica y software estadístico para el manejo, presentación de los datos y la validación de hipótesis.

La implementación de analogías electromecánicas como herramienta metodológica en la resolución de sistemas mecánicos, tiene un orden secuencial de pasos, los cuales fueron descritos en el diagrama de flujo mostrado en la Figura.

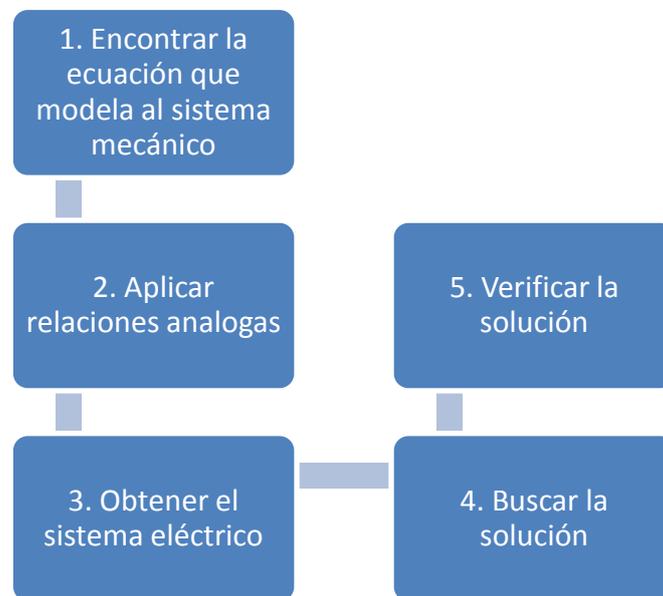


Figura 1. Problema mecánico (a), problema eléctrico (b).

Desarrollo

1. Definición de las analogías electromecánicas

Es muy común utilizar analogías (mecánico-eléctrico) sobre todo para facilitar el entendimiento de ciertas leyes que están marcadas tanto en el ámbito de la electricidad como de la mecánica, permitiendo a la persona que está al frente de un determinado problema, aplicar conocimientos básicos-intermedios de circuitos eléctricos. Y se aclarará que el punto de partida para resolver problemas relacionados al tema en análisis es tener bases bien consolidadas con relación al campo eléctrico (Del Río, 2002).

De la analogía en estudio, Carrillo (2011) menciona en su investigación que, desde el punto de vista matemático las ecuaciones que describen los elementos eléctricos y mecánicos presentan similitudes. Para explicar lo mencionado veremos que, por un lado, las ecuaciones que rigen los sistemas mecánicos de movimiento son a menudo formuladas por la ley de movimiento de Newton, dicha ley afirma que la sumatoria de fuerzas representa el producto entre la masa y la aceleración. Partiendo de dicha ley se puede formular la ecuación (1), que define el sistema mecánico planteado en la Figura 2a, compuesto por un elemento almacenador de energía (masa), un elemento de respuesta a la fuerza aplicada sobre él (Resorte lineal), un retardo entre la fuerza aplicada con respecto al cambio de velocidad (fuerza de fricción) y una fuerza externa responsable del movimiento del sistema mecánico. Por otro lado, se define un sistema eléctrico, circuito mostrado en la Figura 2b, mediante la ecuación (2) que relaciona matemáticamente las características de un almacenador de energía en forma de campo eléctrico (capacitor), elemento que impide el paso a la corriente eléctrica (resistencia), un elemento almacenador de energía en forma

de campo magnético (inductor) y la diferencia de potencial entre dos puntos del circuito (tensión).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{x}{K} = F \quad (1)$$

$$L \frac{d^2Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = E \quad (2)$$

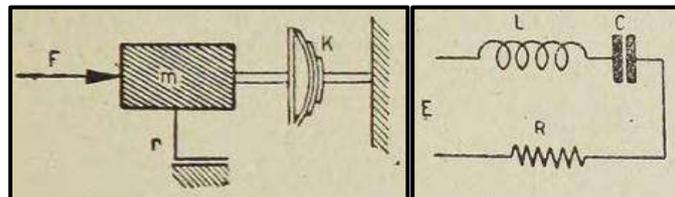


Figura 2. Problema mecánico (a), problema eléctrico (b).

Al analizar las ecuaciones (1) y (2) podremos encontrar una similitud en ambas expresiones. Aunque sus variables sean de diferente naturaleza, sus evoluciones en el tiempo presentan características comunes, de forma que ambos sistemas pueden representarse mediante el mismo modelo matemático, ya sea este definido por la ecuación (1) o (2), a pesar de que sean diferentes físicamente. Sin embargo, es necesario identificar que: a la masa m le corresponde la inductancia L ; el coeficiente de elasticidad K se relaciona con la capacitancia C ; el rozamiento r se asemeja a la resistencia R ; el desplazamiento x se corresponde con carga eléctrica Q ; a la corriente $\frac{dQ}{dt} = i$ se la puede expresar como la velocidad $\frac{dx}{dt} = v$; la aceleración $\frac{d^2x}{dt^2} = a$ se relaciona con la variación de corriente $\frac{di}{dt}$; y la fuerza mecánica F se asemeja a la fuerza electromotriz E .

Dicho esto, podremos definir a un sistema análogo como un par de sistemas cuyas ecuaciones diferenciales que definen su comportamiento tienen igual forma matemática (Llata, 2011).

Para comprender de mejor manera, se ha resumido las analogías electroestáticas de las variables, en la Tabla 1.

Tabla 1. Analogías electroestáticas.

ANALOGÍA ELECTROESTÁTICA	SISTEMA MECÁNICO
Inductancia (L)	Masa (m)
Capacitancia (C)	Elasticidad (K)
Resistencia (R)	Rozamiento (r)
Carga Eléctrica (Q)	Desplazamiento (x)
Velocidad (v)	Corriente (i)
Aceleración (a)	Variación de corriente ($\frac{di}{dt}$)
Fuerza electromotriz (E)	Fuerza mecánica (E)

Cómo en el caso anterior, donde se realizó una analogía con un análisis de mallas del circuito, es posible comparar el sistema mecánico con un análisis de nodos en su equivalencia eléctrica. De esta forma el voltaje, que es una magnitud relativa, queda

representado por la velocidad, que también es una magnitud relativa. Lo mismo sucede con la corriente, que le corresponde una magnitud absoluta: fuerza. En la Tabla 2 se presentan las equivalencias del resto de variables.

Tabla 2. Analogía electromagnética-sistema mecánico.

ANALOGÍA ELECTROSTÁTICA	SISTEMA MECÁNICO
Inversa de Inductancia (1/L)	Elasticidad (K)
Capacitancia (C)	Masa (m)
Inversa de Resistencia (1/R)	Rozamiento (r)
Flujo magnético= $\int e$	Desplazamiento (x)
Voltaje (E)	Velocidad (v)
Corriente (i)	Fuerza (F)
Variación de voltaje ($\frac{de}{dt}$)	Aceleración (a)

2. Aplicación del método para la resolución de un sistema mecánico

A continuación, se presenta un ejercicio, según (Carrillo, 2011), en el cual se aplicará una de las analogías, que se han venido explicando (Fuerza-voltaje). En el ejemplo propuesto se revisarán las consideraciones a tomar en cuenta para la aplicación del método. Para ello se considerará el circuito mecánico de la Figura 3 con el fin de representar y calcular el circuito eléctrico análogo utilizando la equivalencia: Fuerza-voltaje.

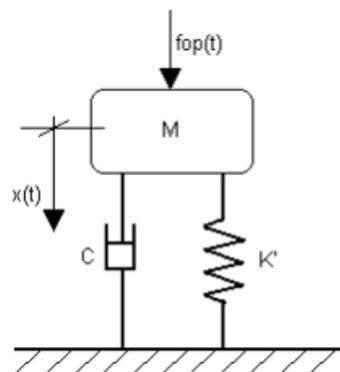


Figura 3. Sistema mecánico, Ejercicio1.

Para el sistema mecánico, la ecuación que lo modela es la siguiente:

$$F(t) = M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) \quad (3)$$

Aplicando las relaciones análogas de Fuerza-voltaje, se tiene:

$$V(t) = L \frac{d^2q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) \quad (4)$$

Como $i = \frac{dq(t)}{dt}$, el circuito análogo será:

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (5)$$

Al que corresponde el esquema indicado en la Figura 4

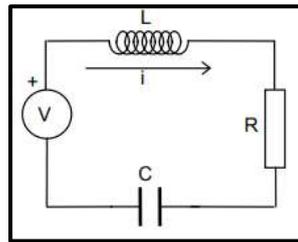


Figura 4. Sistema eléctrico, Ejercicio1.

Luego de aplicar un voltaje V al circuito, será equivalente aplicar una fuerza al sistema mecánico. Entonces la intensidad que circularía por el circuito sería análoga a la velocidad que adquiriría la masa y la carga al desplazamiento de la masa. Es importante tomar en cuenta, y especialmente, analizar la facilidad con la cual se resolvió el problema planteado tras aplicar la analogía eléctrica, además de haber proporcionado una visión más amplia de las variables que actúan sobre el problema planteado.

3. Alcances y limitaciones

Desde hace mucho tiempo atrás cuando el análisis matemático se limitaba por no existir la posibilidad de la utilización de computadores digitales para la simulación de procesos, se ha venido desarrollando y utilizando el principio descrito de analogía. Básicamente la similitud en el comportamiento matemático a través del tiempo entre las variables análogas mecánicas y eléctricas, ha permitido relacionar ambos sistemas para facilitar su entendimiento (Llata, 2011).

Un sistema mecánico es muy distinto a un sistema eléctrico, puesto a que ambos se componen por elementos cuya función es diferente y trabajan con distintos fenómenos físicos. Sin embargo, cuando se estudió el comportamiento matemático de dichos elementos, como se mencionó con anterioridad, las variables que los definen se comportan de manera similar a través del tiempo, por lo que existe la posibilidad de representar un sistema mecánico mediante variables eléctricas y viceversa. Esta similitud no se limita a las representaciones matemáticas de un sistema mecánico con ecuaciones eléctricas, sino más bien esto ha ayudado a la representación y simulación de sistemas mecánicos con circuitos eléctricos (Kuo, 2003).

En su principio la simulación de un sistema mecánico con ayuda de componentes eléctricos facilitaba al entendimiento del comportamiento requerido del mecanismo, sin embargo, en la actualidad estas simulaciones se las puede realizar de manera computacional obteniendo el mismo beneficio basado en el posible ahorro económico al fabricar un prototipo que tiene la probabilidad de no funcionar de acuerdo con las especificaciones requeridas. Considerando la enseñanza de los principios matemáticos de sistemas mecánicos y eléctricos, se puede reconsiderar la simulación del mecanismo en estudio tomando en cuenta el método de las analogías, con el fin de facilitar el entendimiento de la interacción y principios de ambos sistemas y sus similitudes en el comportamiento matemático de las variables que definen sus componentes.

En cuanto al análisis matemático de los sistemas mecánicos, una representación eléctrica de los mismos puede proporcionarnos una mejor visualización de todas las variables que definen sus componentes y, sobre todo, nos puede ayudar a adquirir un mejor

entendimiento en cuanto al funcionamiento y comportamiento del mecanismo. El principal beneficio de lo mencionado radica en la resolución y cálculo acertado de las variables del sistema, al tener una idea clara de la función que cumple cada parte de este (Élgoibar, 2008).

Al proponer una analogía eléctrica se da la posibilidad de cuestionar el comportamiento real de ciertos elementos mecánicos al ser utilizados en diferentes condiciones y bajo distintas cargas (Carrillo, 2011).

Un ejemplo muy común de lo mencionado lo menciona Del Río (2002), al considerar un motor descentrado con vibraciones permanentes comunicadas a su base, ilustrado en la Figura 5, junto con sus representaciones mecánicas y eléctricas.

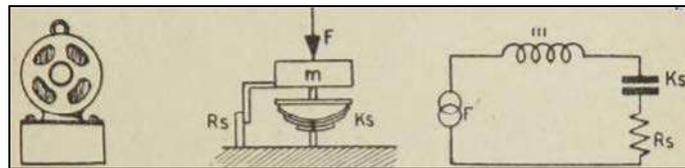


Figura 5. Motor descentrado en su base con representación mecánica y eléctrica.

Hay que considerar que en el caso de que la frecuencia de resonancia de m y K_s estén próximas a la frecuencia de vibración de la fuerza no balanceada debido a la rotación F , esta vibración toma una amplitud muy elevada que provocaría grandes daños a la base; para ello se propone como solución colocar el motor en resortes sobre su base, como en la Figura 6.

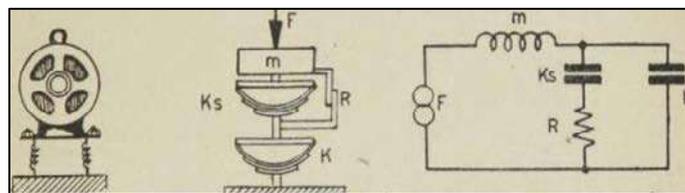


Figura 6. Motor descentrado con muelles en su base y su representación mecánica y eléctrica.

Con este tipo de filtro se podrán cortar frecuencias superiores a una fuerza f_B definida como:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{MK}} \quad (6)$$

Sin embargo, si la frecuencia producida por la vibración del desbalance es inferior a f_B , la vibración puede transmitirse por toda la estructura en proporciones mayores a las que se hubiesen tenido si no se colocaban los muelles. Este comportamiento se lo puede comparar con el funcionamiento de un transformador ideal, ya que este elemento viene a equilibrar la impedancia del generador de vibraciones con la impedancia de la base, ocasionando una mayor transferencia de energía. Como se aprecia, al asemejar el funcionamiento del mecanismo con el comportamiento de un transformador ideal, se puede visualizar el fenómeno de una manera más clara, sin embargo, esto requiere de conocimientos bien consolidados de electrotecnia (Del Río, 2002).

Si mencionamos la dualidad, siendo ésta el intercambio de tensión y corriente en una expresión, o, dicho de otra manera, dos circuitos en los cuales las ecuaciones de malla del

primero y las ecuaciones de nodo del segundo tienen la misma forma matemática; se hace posible incluir el uso de esta propiedad dentro del método de las analogías electromecánicas. Es importante tomar en cuenta que, al emplear la dualidad ya no sólo se requiere de conocimientos de electroestática, si no también es imprescindible tener bases teóricas sobre la electrodinámica para poder emplear la mencionada propiedad. Para explicar el uso de la dualidad, Del Río (2002) propone el análisis de un del sistema mecánico indicado en la Figura 7A. Al realizar el equivalente electrodinámico expresado en la Figura 7B, se puede visualizar como guarda más similitud con el original en la disposición de los distintos elementos en comparación al circuito equivalente electroestático de la Figura 7C, es por ello que en ocasiones es más comodo trabajar con la primera opción, facilitando de cierta manera el cálculo.

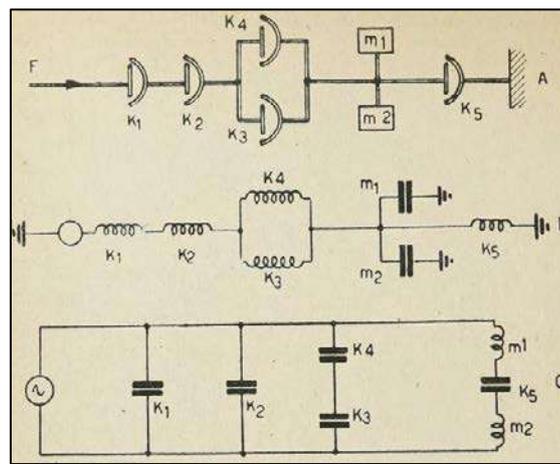


Figura 7. Sistema mecánico (A) con sus equivalentes electrodinámico (B) y electroestático (C).

De esta manera se obtendría los equivalentes electroestáticos y electrodinámicos, siendo éstos dos circuitos dualidades. Sin embargo, existen circuitos que no poseen dual, y por ende, sistemas mecánicos en los que se podrá obtener solo una equivalencia eléctrica. Para facilitar el análisis, únicamente se debe considerar una dualidad en circuitos eléctricos coplanares, de los cuales se podrá conseguir el equivalente en mallas o nodos, dependiendo cuál sea el caso y requerimiento.

Es aquí donde se presenta una limitante en la aplicación del método, sin embargo, el análisis se puede facilitar con el empleo de un solo circuito eléctrico, a pesar de que en el caso de lograr representar el sistema mecánico con un circuito dual, se tendrá varias ventajas. Entre los beneficios de la dualidad podemos mencionar que: se tendría la opción para comparar el resultado de los cálculos con ambos circuitos, el análisis y cálculo de las variables puede resultar más sencillo con una de las dos dualidades y se amplía la visión de los factores determinantes que influyen en el comportamiento de cada componente dentro del sistema.

Desde el punto de vista de la educación, para una persona que recién está adquiriendo conocimientos acerca de los sistemas de control, tanto mecánicos como eléctricos, es posible que le resulte más fácil entender cuál es el comportamiento de un sistema mecánico y uno eléctrico, así como la comprensión de las definiciones matemáticas que componen los mencionados sistemas, al emplear las analogías electromecánicas. La aplicación del método no solo se limitaría al entendimiento, si no también a la resolución de problemas de sistemas mecánicos y eléctricos, los cuales pueden ser simplificados al

encontrar su equivalente antes de resolverlo. Se tiene que tomar en cuenta que es necesario, para la aplicación de las analogías, tener conocimientos suficientes de los principios eléctricos y mecánicos, con el fin de prevenir errores en la resolución de ejercicios propuestos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El propósito de la investigación se fundamenta en alcanzar un mejoramiento en el diseño y modelación matemática de los sistemas de suspensión mediante el desarrollo de destrezas y el rendimiento académico de los estudiantes de ingeniería, con la aplicación de equivalentes electromecánicos, se generan las hipótesis planteadas a continuación, para el análisis de los datos representados en las Tablas 3 y 4 y obtenidos al evaluar a los estudiantes con sistemas mecánicos y eléctricos respectivamente.

H_0 = No existe una diferencia significativa entre la utilización de equivalentes electromecánicos para la obtención de la relación matemática de transferencia de un sistema de suspensión.

H_i = Existe una diferencia significativa entre la utilización de equivalentes electromecánicos para la obtención de la relación matemática de transferencia de un sistema de suspensión.

Tabla 3. Calificaciones correspondientes al primer aporte del periodo marzo-agosto 2014, con la utilización de sistemas mecánicos.

1	2	1	2	3	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	4
4	4	4	4	5	4	5	5
5	5	5	5	6	5	5	5
5	5	5	5	6	6	6	7
7							

Tabla 4. Calificaciones correspondientes al primer aporte del periodo marzo-agosto 2014, con la utilización de sistemas eléctricos.

2	3	3	4	3	3	3	3
4	4	4	5	4	5	5	5
5	5	5	5	5	6	6	6
6	6	6	5	6	7	7	7
7	7	7	7	6	7	7	8
8	8	8	8				

Lo primero a definir con el software es el tipo de distribución que tienen los datos de la Tabla 3 y 4. En las tablas 5 y 6 se muestra el resumen de procesamiento de casos y descriptivos de las muestras otorgados por el programa computacional. En los descriptivos de la muestra se puede evidenciar de manera preliminar que los datos no presentan una distribución normal, esto debido a que los valores de la media, moda y mediana no tienen similitud y ambos valores de curtosis indicarían a demás que los datos se encuentran muy agrupados.

Tabla 5. Resumen de procesamiento de casos

Metodología aplicada	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Calificaciones Mecanico	41	100,0%	0	0,0%	41	100,0%
Electrico	44	100,0%	0	0,0%	44	100,0%

Tabla 6. Descriptivos de las muestras

Metodología aplicada			Estadístico	Error estándar	
Calificaciones	Mecanico	Media	4,0976	,23891	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	3,6147	
			Límite superior	4,5804	
		Media recortada al 5%	4,1084		
		Mediana	4,0000		
		Varianza	2,340		
		Desviación estándar	1,52979		
		Mínimo	1,00		
		Máximo	7,00		
		Rango	6,00		
		Rango intercuartil	2,00		
		Asimetría	-,216	,369	
		Curtosis	-,607	,724	
			Electrico	Media	5,4773
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior			4,9758	
	Límite superior			5,9787	
Media recortada al 5%	5,5000				
Mediana	5,5000				
Varianza	2,720				
Desviación estándar	1,64936				
Mínimo	2,00				
Máximo	8,00				
Rango	6,00				
Rango intercuartil	3,00				
Asimetría	-,202			,357	
Curtosis	-,880			,702	

En la Tabla 7 se entregan los resultados de las pruebas de normalidad. Al tener una muestra mayor a 30 deberemos tomar en cuenta únicamente la prueba de Kolmogórov-Smirnov. En la prueba mencionada ambos valores significativos son menores que el nivel

de error fijado a 0.05, lo que afirma que no se tiene una distribución normal de los datos y por ende se deberá realizar una prueba no paramétrica.

Tabla 7. Pruebas de normalidad

Metodología aplicada		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Calificaciones	Mecanico	,210	41	,000	,939	41	,028
	Electrico	,140	44	,030	,938	44	,020

En las Figuras 8, 9 y 10 se pueden observar en gráficas la distribución de los dos grupos de datos, tanto de los resultados de la evaluación con sistemas mecánicos como de la evaluación con sistemas eléctricos y ambos a la vez respectivamente.

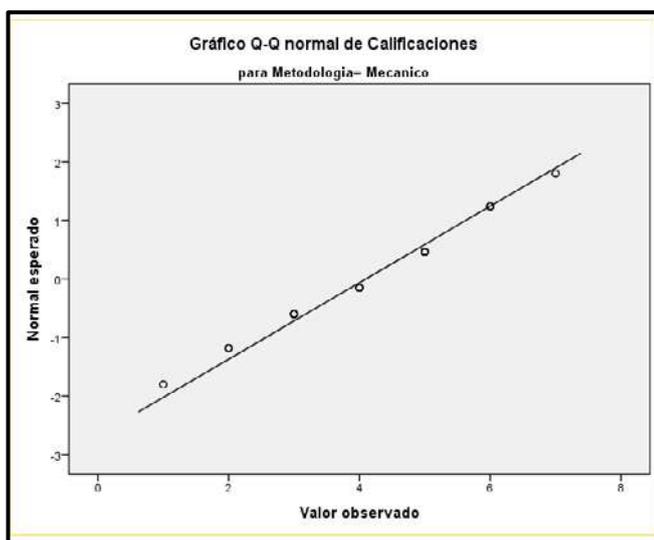


Figura 8. Distribución de calificaciones, Metodología: mecánico

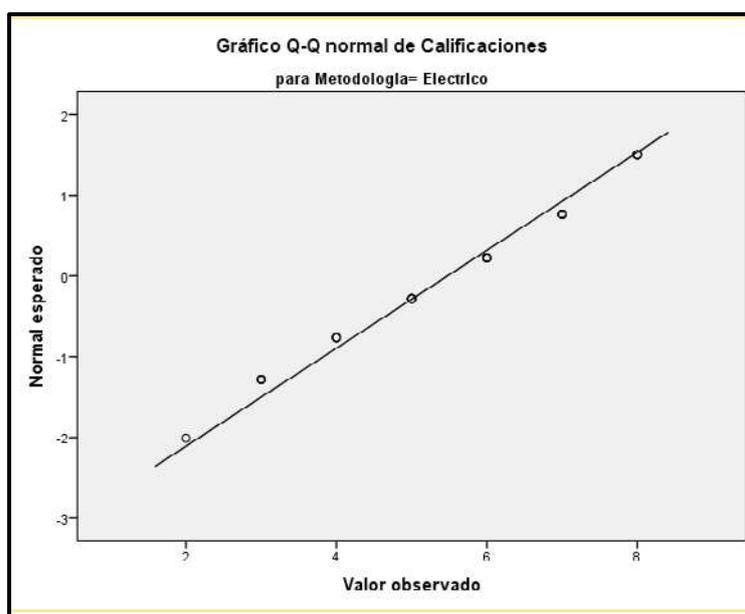


Figura 9. Distribución de calificaciones, Metodología: eléctrico.

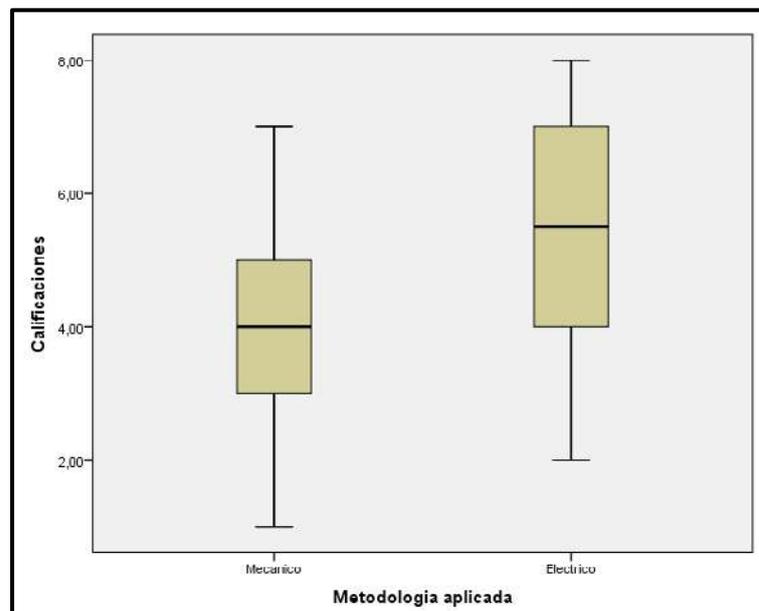


Figura 10. Diagrama de cajas y bigotes para los datos de la evaluación mecánica y eléctrica.

Al no tener una distribución de datos normal, se vio necesario realizar una prueba no paramétrica para muestras independientes. Con ayuda del software se realizó una prueba de medianas, obteniendo el resultado presentado en la Tabla 8. El valor de significancia es menor al nivel de aceptación de 0.05.

Tabla 8. Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las medianas de Calificaciones son las mismas entre las categorías de Metodología aplicada.	Prueba de la mediana para muestras independientes	,001	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es ,05.

Discusión de resultados

La utilización de las analogías electromecánicas ayuda a mejorar el rendimiento de los estudiantes en la obtención de la función de transferencia de sistemas mecánicos. Dicha afirmación está sustentada con ayuda de la bibliografía revisada, en donde se han encontrado varias ventajas ya sustentadas en el presente documento para la utilización de las equivalencias; y con el análisis estadístico realizado.

En cuanto al análisis estadístico, se puede observar en la Tabla 5 que, los datos son ingresados en el software IBM-SPSS, los mismos que corresponden a la evaluación con un análisis netamente mecánico y a un análisis comprendido en la utilización de analogías. Además, en dicha tabla se puede notar que para la valoración son tomados en cuenta el 100% de los datos, 41 y 44, para el análisis mecánico y con analogías, respectivamente.

En la Tabla 6, es evidente que existe una diferencia significativa entre las medias. Pero para aceptar o rechazar la hipótesis planteada esta información no es suficiente, por

ende, es necesario realizar una prueba estadística con el fin de saber si se acepta o rechaza la hipótesis nula. Analizando los datos en el software IBM-SPSS, y examinando la Tabla 8, se llega a la respuesta de rechazar la hipótesis nula, al obtener un nivel de significancia menor que 0.05, es decir, si existe una diferencia notable entre ambas medianas y por lo tanto el uso de las analogías electromecánicas ayuda a mejorar las calificaciones.

Al aplicar las equivalencias electromecánicas como metodología de enseñanza, no solo se logra mejorar el rendimiento del estudiante, sino que también se le proporciona una herramienta de comprobación y análisis profundo de los sistemas mecánicos, ya que como se explicó, en muchos mecanismos es necesario un análisis eléctrico para poder identificar y considerar todas las variables involucradas, para su adecuado funcionamiento.

4. CONCLUSIONES

- Se aplicó la utilización de equivalentes electromecánicos, para el moldeamiento y obtención de la relación matemática de transferencia de los sistemas de suspensión.
- Se utilizó software especializado de simulación para verificar la utilidad de la implementación de los equivalentes eléctricos en los sistemas dinámicos de suspensión.
- Se motivo la utilización del análisis de circuitos eléctricos como herramienta alternativa para resolver determinadas situaciones problemáticas presentes en el estudio de los sistemas dinámicos.
- Al realizar la investigación se constató que la utilización de equivalentes electromecánicos constituye una herramienta didáctica adecuada para la formación de futuros ingenieros.
- La aplicación de herramientas computacionales permiten mejorar las destrezas de modelación y simulación de los sistemas dinámicos, para optimizar el tiempo de diseño y verificar sus alcances.
- Se destacó la importancia de sustentar mediante los fundamentos teóricos adecuados la solución de situaciones problemáticas presentes en el campo profesional del ingeniero automotriz.

AGRADECIMIENTOS

Es importante empezar agradeciendo a los docentes, de la carrera de ingeniería automotriz de la ESPOCH, por consolidar las bases iniciales de este estudio, aportando significativamente, con ideas, propuestas y recursos que permiten el desarrollo académico y técnico de los ingenieros automotrices. Es importante agradecer la ayuda por la información proporcionada por parte de los autores de las diferentes investigaciones, de las cuales se recopiló información, dichos autores se mencionan en las referencias del documento. Finalmente, solo quedan palabras de estima para nuestra alma mater, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en especial a la carrera de Ingeniería Automotriz, que nos brindan la oportunidad día a día de superarnos y aportar, con el desarrollo del país.

REFERENCIAS

- [1] Llinás, Solano, Humberto. *Estadística Inferencial*, Universidad del Norte, 2017. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=5486681>.
- [2] Sánchez, Sánchez, Ernesto Alonso, et al. *Probabilidad y estadística 1*, Grupo Editorial Patria, 2015. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=4569628>.
- [3] Muñoz, Hernández, José Aldemar, et al. *Control automático I: estrategias de control clásico*, Sello Editorial Universidad del Tolima, 2014. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=4909273>.
- [4] Carrillo, A. J. (2015). *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado*. Maracaibo: Fondo Editorial UNERMB.
- [5] Del Río, J. (2010 Octubre 25). *Teoría de los equivalentes electromecánicos, sus limitaciones y algunas aplicaciones*.
- [6] Élgoibar, J. M. (2008). *Introducción a los sistemas de control automático*. Bellisco.
- [7] Kuo, B. (2013). *Sistemas de control automático*. Mexico: Prentice-Hall. Llata, J. R. (2016). *Automática*. Cantabria: Open Course Ware.
- [8] Villagrán Cáceres, J. W. (15 de marzo de 2015). Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado el 28 de febrero de 2018, de <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/4537>
- [9] Batanero, F. J. (2015). *Revista Complutense de Educación*. Recuperado el 10 de 04de2018,de<https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/28020/Actitudes%20docentes-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] Bermudez, b., & Juarez, L. (2014). *Scielo*. Recuperado el 04 de 04 de 2018, de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v25n1/art16.pdf>
- [11] Cala Wilches, O. E. (2014). *bdigital repositorio institucional UN*. Recuperado el 2 de marzo de 2018, de
- [12]http://www.bdigital.unal.edu.co/49152/1/Estudio_comparativo_del_funcionamiento_de_Sistemas_tutores_inteligentes_orientados_a_la_ense%C3%B1anza_de_los_fundamentos_de_Control_Autom%C3%A1tico_v3.pdf
- [13] Camarena, P., Moreno, I., & Del Rivero, S. (Junio de 2016). *Revista Mexicana de Investigación Educativa*. Recuperado el 27 de marzo de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-66662016000200349

[14] Causas, D. (2015). *biblioteca electrónica de la universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 02 de 04 de 2018, de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36805674/l-Variables.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1522683341&Signature=ny9%2FVDwPThdTS6n81xoP6ZUYVVR0%3D&respons-contentdisposition=inline%3B%20filename%3Dvariables_de_Daniel_Cauas.pdf

Simulación mediante la técnica de Bond-Graph el comportamiento de un mecanismo accionado hidráulicamente.

(Simulation using the Bond-Graph technique the behavior of a hydraulically operated mechanism.)

V. Romero*⁽¹⁾, J. Pancha⁽²⁾, J. Néjer⁽³⁾, V. Rojas⁽⁴⁾.

(1) Carrera de Ingeniería Automotriz. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo EC060155.

(2) Carrera de Ingeniería Automotriz. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo EC060155.

(3) Carrera de Ingeniería Automotriz. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo EC060155.

(4) Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana EC170517.

*Tel.: 0999751927, E-mail: vromero@hotmail.es (V. Romero)

RESUMEN

La simulación y la resolución de un mecanismo accionado hidráulicamente, se lo realizó utilizando el método de Bond-Graph, un método alternativo a los procedimientos convencionales. En primer lugar, se analizó los valores de entrada a los que va a estar sometido el sistema, en este caso constaba de un dominio hidráulico y un dominio mecánico. Se comprobó los flujos y esfuerzos para la construcción de los diagramas gráficos y realizar la causalidad del sistema, obteniendo las ecuaciones algebraicas y diferenciales que lo dominan. Estas ecuaciones fueron introducidas en el software Matlab y se obtuvieron las gráficas de desplazamiento del muelle, velocidad de la masa suspendida, ángulo y la velocidad angular de la barra, obteniendo el comportamiento del mecanismo mencionado con varias condiciones de operación de las válvulas del sistema hidráulico.

Palabras clave: Bond-Graph, simulación, sistema, mecanismo, hidráulico.

ABSTRACT

The simulation and resolution of a hydraulically driven mechanism, was performed using the Bond-Graph method, an alternative method to conventional procedures. First, we analyzed the input values to those who are about to be in the system, in this case it consisted of a hydraulic domain and a mechanical domain. It was verified the flows and efforts for the construction of the diagrams and the causality of the system was realized, obtaining the algebraic and differential equations that dominate it. These equations were introduced in the Matlab software and the speeds of displacement of the spring, speed of the suspended mass, angle and angular velocity of the bar were obtained, obtaining the behavior of the mechanism with several operating conditions of the valves of the hydraulic system.

Key words: Bond-Graph, simulation, system, mechanism, hydraulic.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y análisis de los sistemas por ordenador, persigue la realización de modelos matemáticos que permiten emular el comportamiento de elementos e instalaciones. La alta competitividad en la industria, el escaso tiempo de desarrollo de producto del que se dispone, y lo que caro que resulta en tiempo y dinero la realización de prototipos iniciales, hacen que el diseño y análisis por ordenador de los productos sea cada vez más importante (1).

Por otro lado, en la mayoría de los campos de la ingeniería los componentes de un sistema están interconectados y pertenecen a diferentes dominios de la física (mecánico, eléctrico, hidráulico, térmico). A la hora de desarrollar un sistema completo multidisciplinar se hace necesario integrar un proceso de diseño que conlleve a su realización (2).

El objetivo del modelado y simulación de sistemas dinámicos es la generación de un conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales o modelo matemático. Éste resulta ser una descripción ambigua del sistema que representa (3). En la mecánica clásica existen varios métodos capaces de resolver analíticamente estos problemas, tales como las ecuaciones de Newton-Euler, el terreno de trabajos virtuales, las ecuaciones de Lagrange y las ecuaciones canónicas de Hamilton, pero cuando se consideran modelos complicados, sobre todo modelos tridimensionales, los desarrollos matemáticos que son necesarios realizar analíticamente son largos y laboriosos que a menudo se ocasionan errores difíciles de detectar (4).

Mediante la técnica de Bond Graph, un sistema físico puede ser modelado mediante elementos que tienen la propiedad de generación (fuentes de flujo y esfuerzo), almacenamiento (inercias), disipación (resistors) y transformación de energía conservativo mediante bonds, que indican la transferencia de energía, y uniones, que simbolizan el comportamiento dinámico del sistema. La estructura resultante se representa en un diagrama denominado bond graph. Este diagrama ofrece una visión global del sistema y de su estructura física. Además, tras su extensión causal, el bond graph también ofrece su estructura computacional y revela los posibles problemas matemáticos de su simulación. Todo el sistema resulta abierto y accesible, a diferencia de los métodos clásicos de estudio. Una ventaja adicional del método de bond graph radica en la facilidad de ensamblaje de submodelos o componentes particulares en el modelo general, sin tener que preocuparse de la generación de las ecuaciones adicionales que resultaría tremendamente ardua por métodos clásicos (5).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se va a simular mediante la técnica del Bond-Graph el comportamiento del mecanismo de la figura 1, accionado hidráulicamente, el cual soporta en su extremo derecho una masa puntual “m” mediante un sistema muelle-amortiguador. Para llevar a cabo dicho estudio será preciso asignar valores a los diferentes parámetros de la siguiente forma:

Dominio mecánico

- $M = 100 \text{ (Kg) } \pm 10\%$
- $J = 20 \text{ (N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2)$
- $L = 1 \text{ (m)}$
- $m = 5 \text{ (Kg)}$
- $K = 100 \pm 10\% \text{ (N/m)}$
- $R_a = 15 \text{ (N}\cdot\text{s/m)}$

Dominio hidráulico

- $A_p = 8\cdot 10^{-3} \text{ (m}^2)$
- $Q = 0.1\cdot 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$
- Resistencias de la válvula: R_1, R_2, R_3

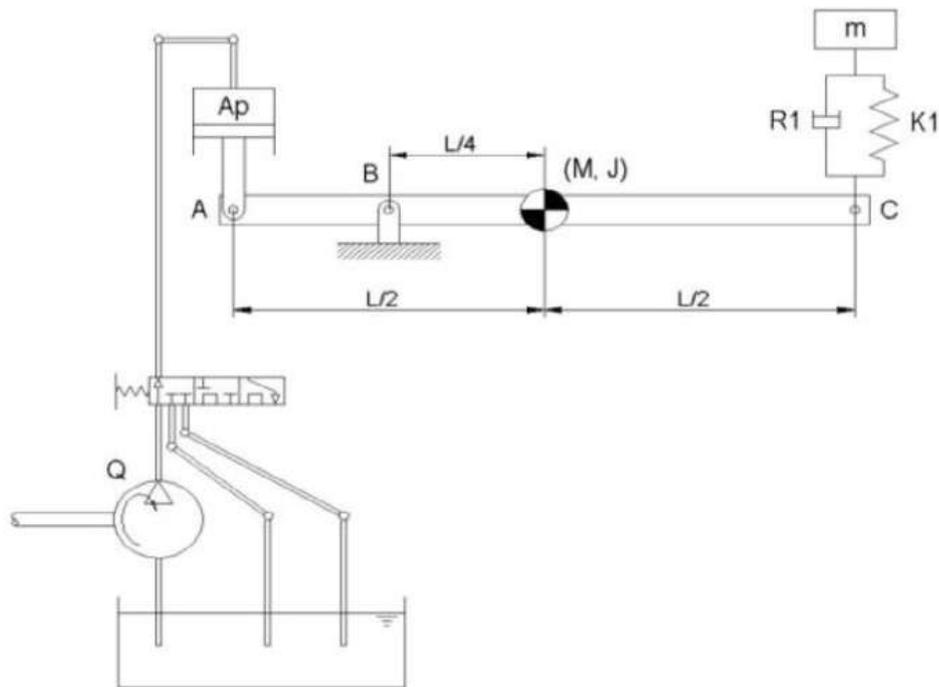


Figura 1. Mecanismo Hidráulico.

En lo que respecta al modelo de simulación, hay que tener en consideración que la válvula de control del pistón se abre y cierra de acuerdo con el siguiente ciclo de trabajo:

- Para $t \leq 10$ s., sólo se permitirá el paso de fluido de la bomba al depósito, no existiendo posibilidad de carga ni descarga de la cámara del pistón.
- Entre $t > 10$ s. y $t \leq 15$ s., sólo se permitirá el paso de fluido de la bomba al pistón de área 'Ap'.
- Entre $t > 15$ s. y $t \leq 20$ s., sólo se permitirá el paso de fluido de la bomba al depósito, no existiendo posibilidad de carga ni descarga de la cámara del pistón.
- Entre $t > 20$ s. y $t \leq 25$ s., se permitirá la descarga del pistón de área 'Ap' (para evitar problemas, no abrirla del todo sino a la mitad), co-existiendo el paso de fluido de la bomba al depósito.
- Y para $t > 25$ s., sólo se permitirá el paso de fluido de la bomba al depósito, no existiendo posibilidad de carga ni descarga de la cámara del pistón.

Se sabe además que la resistencia que ofrece una válvula abierta al paso del fluido es de $1 \cdot 10^6$ (N·s/m), que la resistencia que ofrece una válvula medio abierta al paso del fluido es de $1 \cdot 10^{10}$ (N·s/m), que la resistencia que ofrece una válvula cerrada al paso del fluido es de $1 \cdot 10^{15}$ (N·s/m) y que la compresibilidad del fluido es $1 \cdot 10^{10}$ (N/m).

2.1. Descripción del modelo de simulación.

Se realiza el modelo de bond-graph, ejecutando el modelo de la barra ABC y de la masa suspendida [m] que se encuentra sobre el punto C.

Se modela el punto B de la barra como una unión perfecta, y se añade un nodo 1 para conectar el sistema hidráulico en el punto A, a través del grafo 21.

En el sistema mecánico existen la fuente de esfuerzo $[-Mg]$ y $[-mg]$, y la fuente de flujo $[V_0=0]$.

En el sistema hidráulico, la válvula tiene 3 posiciones, y se colocan 3 resistencias R1, R2, y R3 para simular los 3 estados de la válvula. También se añaden 2 compresibilidades del fluido C1 y C2 para simular el comportamiento del fluido en el sistema hidráulico.

Válvula hidráulica:

- ✓ Se simulará el paso de fluido desde la bomba hacia el pistón a través de R1.
- ✓ El pasó de fluido por la válvula y de regreso al depósito a través de R3.
- ✓ Y el retorno de fluido desde el pistón hacia el depósito a través de la R2.

En el modelo hidráulico existen la fuente de flujo [Q] de la bomba y la fuente de esfuerzo del depósito [Pa = cero para manejar presiones relativas únicamente].

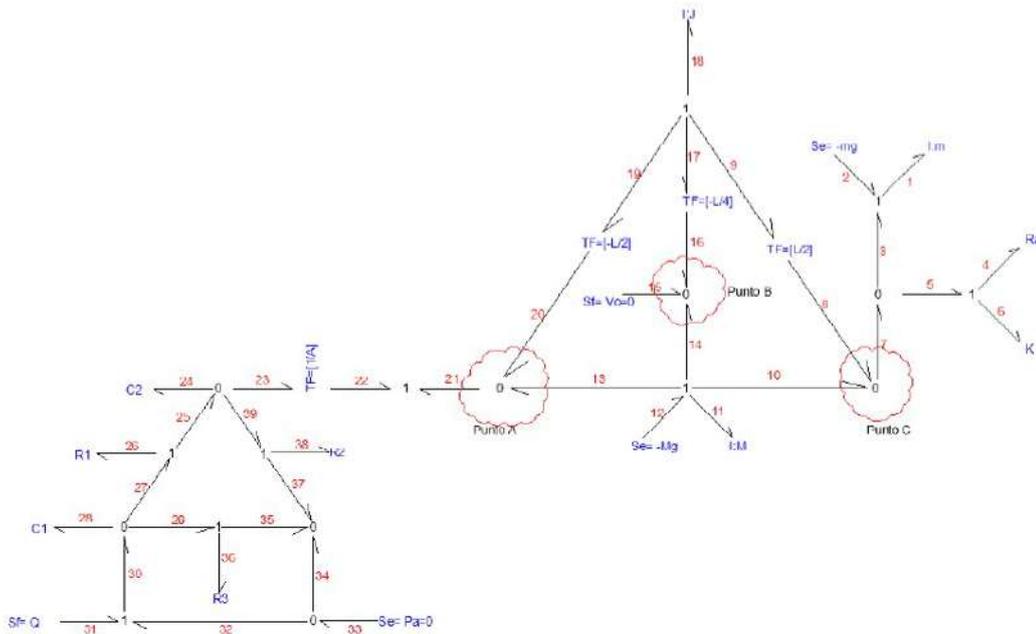


Figura 2. Modelo de Bond-Graph del sistema.

A continuación, se realiza el análisis de causalidad para saber el tipo y numero de ecuaciones a obtener.

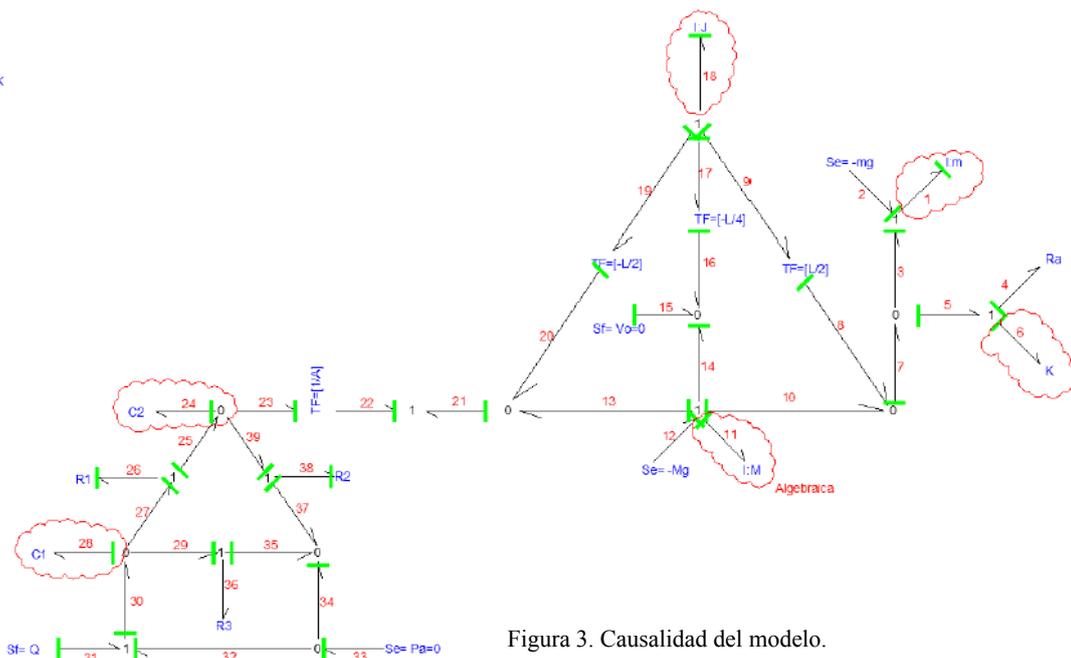


Figura 3. Causalidad del modelo.

De la causalidad se obtiene que:

El modelo tendrá cinco ecuaciones diferenciales y una algebraica en el grafo número 11.

Ecuaciones de los grafos:

Tabla 1. Ecuaciones de los grafos.

GRAFO	FLUJOS	ESFUERZOS
1	V_m	$KX1 + Ra.3WL/4 - Ra.V_m - mg$
2	V_m	$-mg$
3	V_m	$KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)$
4	$3WL/4 - V_m$	$Ra(3WL/4 - V_m)$
5	$3WL/4 - V_m$	$KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)$
6	$3WL/4 - V_m$	$KX1$
7	$WL/2 + WL/4 = 3WL/4$	$KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)$
8	$WL/2$	$KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)$
9	W	$[KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)].(L/2)$
10	$WL/4$	$KX1 + Ra(3WL/4 - V_m)$
11	$WL/4$	$E11$
12	$WL/4$	$-Mg$
13	$WL/4$	$C2V2.Ap$
14	$WL/4 - V_o$	$-Mg - C2V2.Ap - E11 - KX1 - 3Ra.WL/4 + Ra.V_m$
15	V_o	$=Ec \text{ grafo } 14$
16	$-WL/4$	$=Ec \text{ grafo } 14$
17	W	$=(Ec \text{ grafo } 14)*(-L/4)$
18	W	$= -Ec9 - Ec17 - Ec19$
19	W	$C2V2.Ap(L/2)$
20	$-WL/2$	$-C2V2.Ap$
21	$(WL/4 - WL/2) = -WL/4$	$-C2V2.Ap$
22	$-WL/4$	$C2V2.Ap$
23	$-WL.Ap/4$	$C2V2$
24	$[C1V1/R1]-[C2V2/R1]-[C2V2/R2]+[WL.Ap/4]$	$C2V2$
25	$(C1V1 - C2V2) / R1$	$C2V2$
26	$(C1V1 - C2V2) / R1$	$C1V1 - C2V2$
27	$(C1V1 - C2V2) / R1$	$C1V1$
28	$Q-[(C1V1 - C2V2) / R1]-[C1V1/R3]$	$C1V1$
29	$C1V1/R3$	$C1V1$

30	Q	C1V1
31	Q	C1V1 - Pa
32	Q	Pa
33	Q-[C2V2 / R2]-[C1V1/R3]	Pa
34	[C2V2 / R2]+[C1V1/R3]	Pa
35	C1V1/R3	Pa
36	C1V1/R3	C1V1 - Pa
37	C2V2/R2	Pa
38	C2V2/R2	C2V2 - Pa
39	C2V2/R2	C2V2

Ecuaciones del sistema:

$$\frac{dVm}{dt} = \left(KX1 + \frac{Ra \cdot 3WL}{4} - Ra \cdot Vm - mg \right) * \left(\frac{1}{m} \right)$$

$$\frac{dKX1}{dt} = \frac{3WL}{4} - Vm$$

$$E11 = \frac{d}{dt} \left(\frac{WL}{4} \right) \cdot M = \frac{ML}{4} \cdot \frac{dW}{dt}$$

$$\frac{dV1}{dt} = Q - \left(\frac{C1V1}{R1} \right) + \left(\frac{C2V2}{R1} \right) - \left(\frac{C1V1}{R3} \right)$$

$$\frac{dV2}{dt} = \left(\frac{C1V1}{R1} \right) - \left(\frac{C2V2}{R1} \right) - \left(\frac{C2V2}{R2} \right) + \left(\frac{WL \cdot Ap}{4} \right)$$

$$\frac{dW}{dt} = \left\{ -3K \cdot L \cdot X1 + C2L \cdot A \cdot V2 - M \cdot g \cdot L - E11 \cdot L + 3 \cdot Ra \cdot L \left(Vm - \frac{3}{4}L \cdot W \right) \right\} * \left(\frac{1}{4 \cdot J} \right)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = W \left[\frac{360}{2\pi} \right]$$

Figura 4. Ecuaciones del sistema.

2.2. Introducción de datos y ecuaciones en el software MATLAB.

Se introducen en el software los siguientes datos.

Dominio mecánico

K = 100; %(kg) Contante de rigidez muelle
M = 100; %(Kg) Masa de la barra
m = 5; %(Kg) Masa suspendida
Ra = 15; %(N.s/m) Constante del Amortiguador
g = 9.81; %(m/s^2) Gravedad
J = 20; %(N.m.s^2) Momento de inercia rotacional
L = 1; %(m) Longitud de la barra

Dominio Hidráulico

A = 8*10^(-3);%(m^2) Área del pistón

$Q = 0.1 \cdot 10^{-3}$; $\%$ (m^3/s) Caudal de la bomba
 $C1 = 1 \cdot 10^{10}$; $\%$ (N/m) Compresibilidad del fluido
 $C2 = 1 \cdot 10^{10}$; $\%$ (N/m) Compresibilidad del fluido

Variables:

$y(1)$ = Desplazamiento muelle [X1]
 $y(2)$ = Velocidad de masa [Vm]
 $y(3)$ = Volumen 2 [v2]
 $y(4)$ = Volumen 1 [v1]
 $y(5)$ = Velocidad angular de la barra [w]
 $y(6)$ = Angulo de la barra [ángulo= dw/dt]

Reemplazando la ecuación algebraica dentro de la ecuación de W, se introducen las siguientes ecuaciones:

$dy(1) = (3/4) \cdot L \cdot y(5) - y(2)$;
 $dy(2) = (K/m) \cdot y(1) + (Ra \cdot 3 \cdot L / (4 \cdot m)) \cdot y(5) - (Ra/m) \cdot y(2) - g$;
 $dy(3) = (C1 \cdot y(4)) / R1 - (C2 \cdot y(3)) / R1 - (C2 \cdot y(3)) / R2 + ((A \cdot L / 4) \cdot y(5))$;
 $dy(4) = (Q) - (C1 \cdot y(4)) / R3 - (C1 \cdot y(4)) / R1 + (C2 \cdot y(3)) / R1$;
 $dy(5) = (1 / (4 \cdot J + L^2 \cdot M / 4)) \cdot ((-L \cdot C2 \cdot A \cdot y(3)) - (3 \cdot L \cdot K \cdot y(1)) + (3 \cdot Ra \cdot L \cdot (y(2) - (3/4) \cdot L \cdot y(5))) - (L \cdot g \cdot M))$;
 $dy(6) = y(5)$;

2.3. Simulación de los estados de la válvula.

En la simulación la válvula debe pasar por 3 estados o posiciones (abierta, cerrada y semiabierta) y a su vez deja pasar fluido entre la bomba, el pistón, y el depósito.

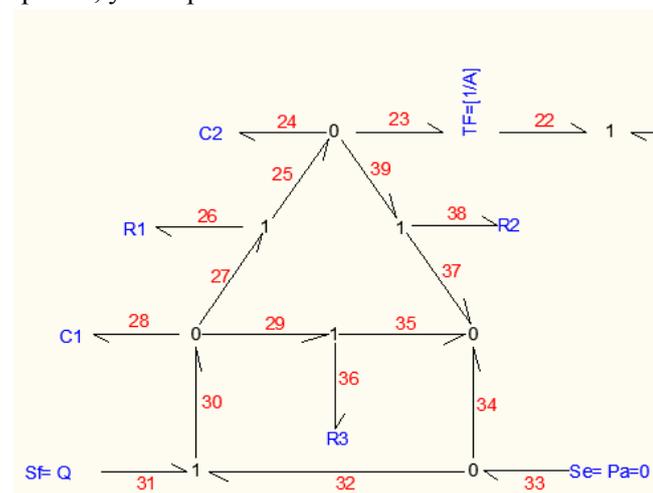


Figura 5. Circuito hidráulico, y resistencias de la válvula R1, R2 y R3.

Para representar los 3 estados de la válvula, se asignarán valores a las resistencias para simular estos estados de apertura y cierre entre el circuito hidráulico, se puede ver en la siguiente tabla estos valores:

Tabla 2. Valores de resistencia de las válvulas.

Estados Resistencias	Paso de fluido de la bomba al pistón solamente (ESTADO 1)	Circulación del fluido hacia el depósito, No pasa hacia el pistón. (ESTADO 2)	Retorno del fluido del pistón al depósito con válvula semiabierta (ESTADO 3)
R1	$1 * 10^6$	$1 * 10^{15}$	$1 * 10^{15}$
R2	$1 * 10^{15}$	$1 * 10^{15}$	$1 * 10^{10}$
R3	$1 * 10^{15}$	$1 * 10^6$	$1 * 10^6$

A continuación, se muestran las condiciones de los estados de las válvulas.

Tabla 3. Condiciones de funcionamiento de las válvulas.

Condiciones del modelo	$t \leq 10s$	$15s \Rightarrow t > 10s$	$20s \Rightarrow t > 15s$	$25s \Rightarrow t > 20s$	$t > 25s$
Estado de la válvula asignado	2	1	2	3	2

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la primera simulación se parte de valores nominales para M y K de 100 kg y N/m respectivamente.

Se espera observar el comportamiento del sistema con las 3 posiciones de la válvula, la variación del ángulo teta de la barra, y ver la variación del desplazamiento de la masa suspendida m.

Se espera ver como este desplazamiento y la velocidad de la masa m se estabilizan luego de un tiempo determinado.

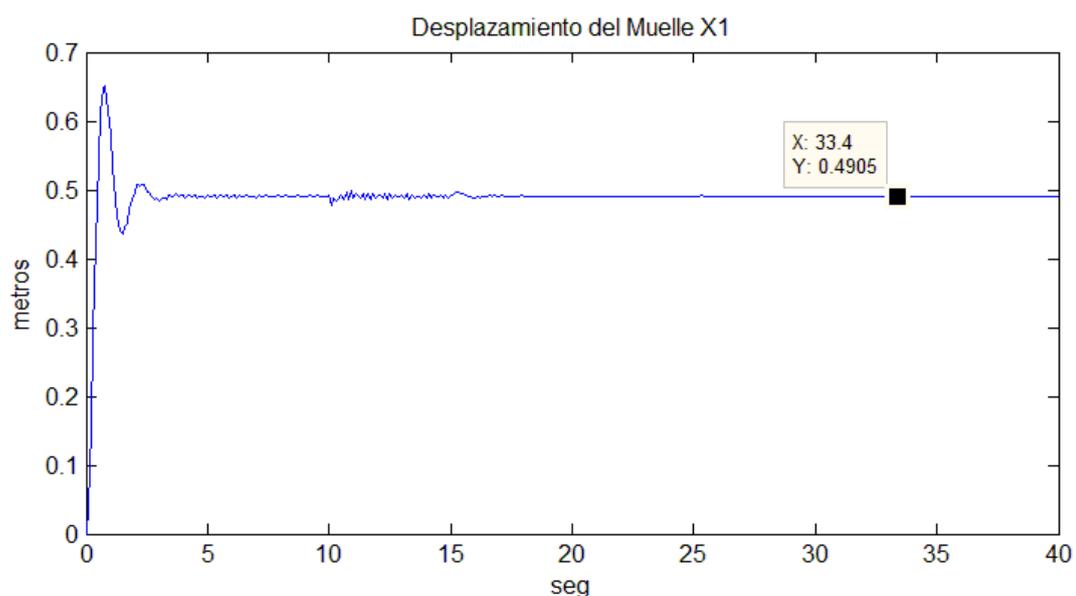


Figura 6. Desplazamiento del Muelle.

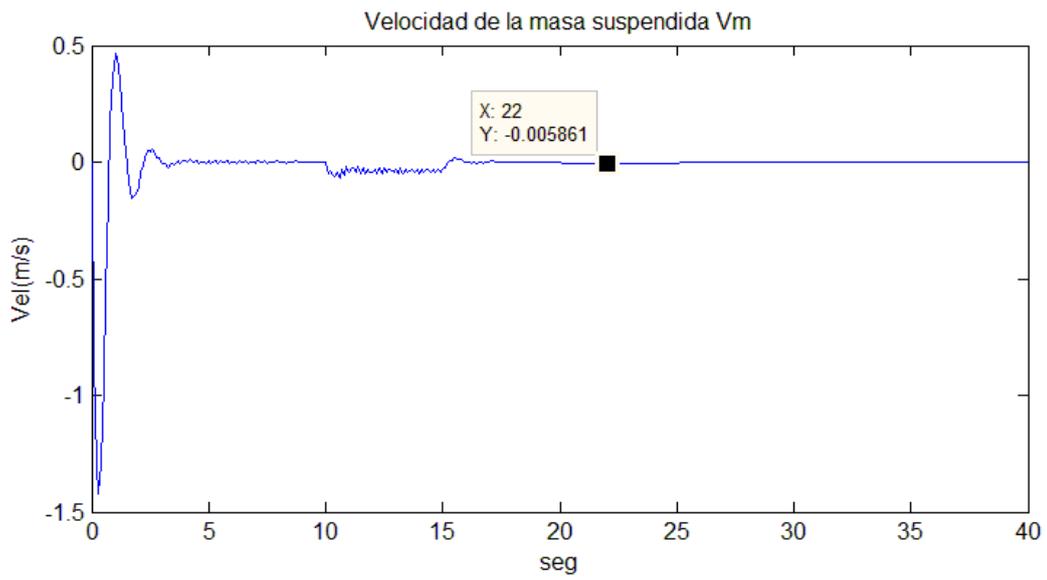


Figura 7. Velocidad de la masa suspendida.

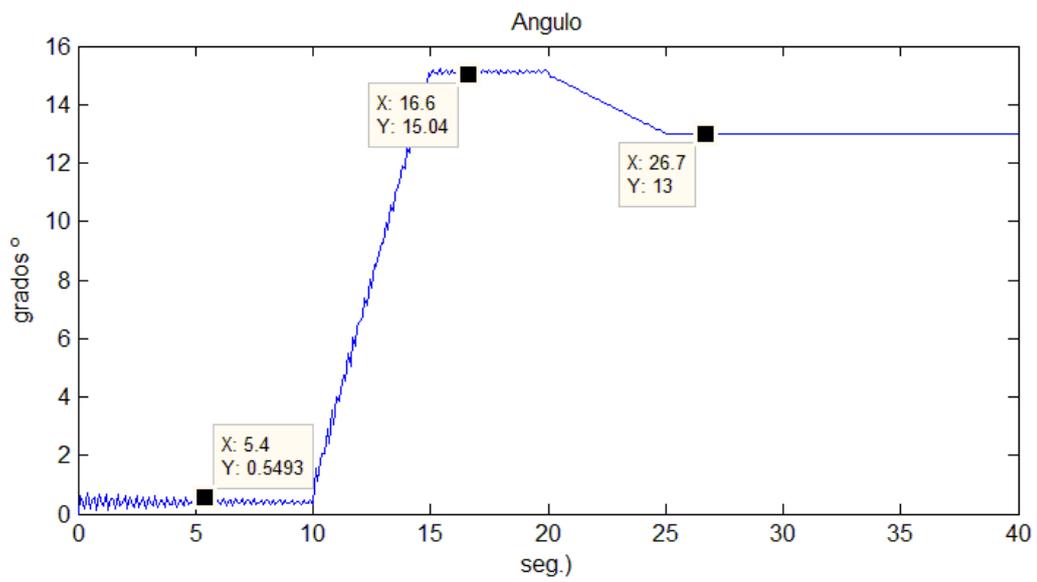


Figura 8. Ángulo

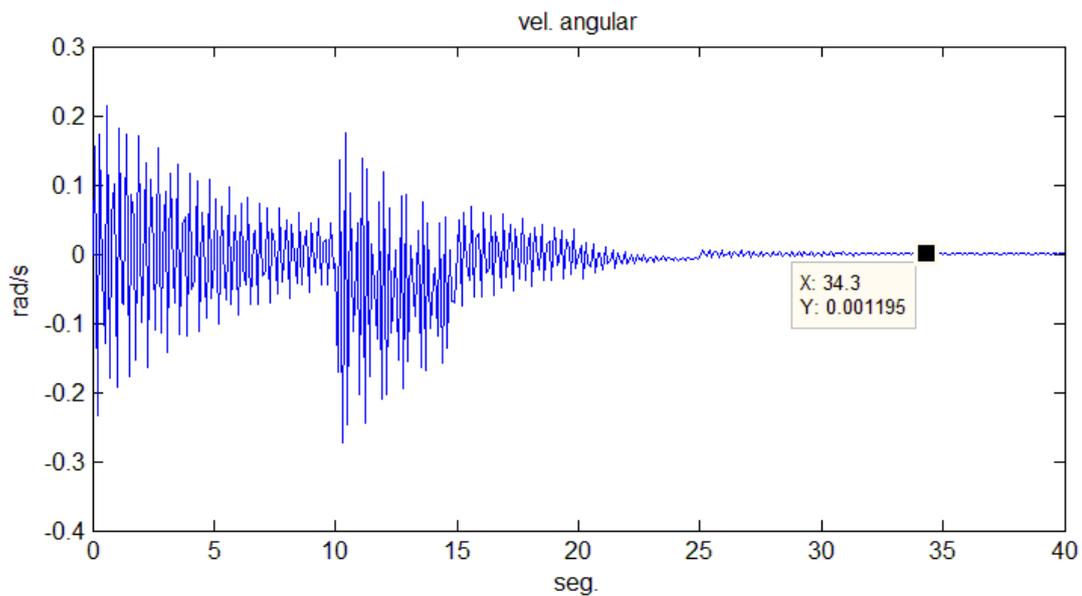


Figura 9. Velocidad angular.

4. CONCLUSIONES

- ✓ En la primera simulación se ha partido de valores nominales de M (kg) y K (N/m) = 100. Se puede observar las etapas de funcionamiento del sistema.
- ✓ De 0–10s, la barra no se mueve y permanece con su ángulo=0, en este lapso la masa suspendida [m] se mueve verticalmente y se estabiliza en este periodo de tiempo.
- ✓ De 10-15s, la válvula deja pasar fluido hacia el pistón, se observa como la barra gira hasta 16, 6° y se mantiene en esa posición. El desplazamiento y velocidad de la masa (m) varían muy poco.
- ✓ De 15-20s, se mantiene estática la barra y se observa cómo se estabiliza los valores de X y V_m .
- ✓ De 20-25s, se permite la descarga del fluido desde el pistón al depósito, pero con la válvula semiabierta, lo que se manifiesta en el cambio de pendiente en el gráfico del ángulo para este lapso.
- ✓ De 25s en adelante, el sistema permanece estático y permite estabilizar las variables de velocidad y principalmente desplazamiento de la masa m , (X) el cual, con estos valores iniciales de K y M , se estabiliza en 0,4905 m.
- ✓ El valor que buscamos es 0,38m por lo que será necesario variar los valores de M y K hasta encontrar el valor deseado.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda utilizar el solucionador adecuado en MATLAB para poder obtener un resultado más preciso.
- ✓ Al momento de realizar la causalidad tener muy en cuenta las fuentes de flujo y esfuerzo para la gráfica de los grafos.

REFERENCIAS

1. H. B. Pacejka. 1985. Modelling complex vehicle systems using bond graphs, J. of the Franklin Institute, 319 (1/2), pp.67-81.

2. H. B. Pacejka. 1985. Bonds graph in vehicle dynamics, 3rd Seminar on advanced vehicle dynamics. Amalfi, May 1986.
3. Albert Martinus Bos, Modelling multibody systems in terms of multibond graphs with application to motorcycle [Phd. Thesis], Twente University, Enschede, The Netherlands, ISBN 90-9001442-X. 1986.
4. Peter J. Gawthrop, Richard W. Jones. Bond-Graph based adaptative control, Proceedings 4ta IFAC Symposium on Adaptative System in Control and Signal Processing. Grenoble. 1993. pp.67-72
5. Neville Hogan. Impedance control: An approach to manipulation. Parts I, II, III – Theory Trans. Of the ASME, J. of Dynamic Systems Measurement and Control, 107(I). 1985. pp. 1-24.

Utilización de I – X Chart para el control estadístico de proceso en ensayos de desgaste de pastillas y discos de freno originales y alternos en Ecuador

Eder L. Cruz Siguenza, Wilson J. Villagrán Cáceres, Elvis E. Arguello, Juan C. Castelo Valdivieso, Fabian E Sánchez Carrión

Autor correspondencia. Tel: 0987085097, Email: eder.cruz@esPOCH.edu.ec (E. Cruz)

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Facultad de Mecánica

Escuela de Ingeniería Automotriz

Riobamba – Ecuador

Sobre los autores

Eder L. Cruz Siguenza:

Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correspondencia: eder.cruz@esPOCH.edu.ec

Wilson J. Villagrán Carrera:

Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correspondencia: wvillagran@esPOCH.edu.ec

Elvis E. Arguello:

Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correspondencia: e_arguello@esPOCH.edu.ec

Juan C. Castelo Valdivieso:

Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correspondencia: j_castelo@esPOCH.edu.ec

Edgar F. Sanchez Carrión

Docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correspondencia: edgar.sanchez@esPOCH.edu.ec

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo demostrar que la utilización de las cartas I - X BAR, colabora al análisis en el control estadístico de procesos dentro de un estudio de desgaste de componentes del sistema de freno específicamente discos y pastillas de la marca Chevrolet – Aveo, para el centro de nuestro estudio es el análisis de resultados del desgaste continuo que existe en las zapatas de frenos de las marcas más comunes que existe en el Ecuador. Los últimos avances en el diseño de cartas de control se han enfocado en las cartas con parámetros variables (VP) en las cuales se modifica los parámetros de la carta de acuerdo al valor de la última muestra. Estas cartas han demostrado ser más eficaces en la detección de las causas asignables, pero más complejas para su implementación en las organizaciones. Aunque es mucha la literatura referente al diseño económico y/o estadístico de cartas VP, son pocos los autores que enfocan sus esfuerzos en hacerlas accesibles a las empresas. En este artículo se presentará un nuevo procedimiento diseñado con el fin de disminuir productos no conformes y de las ventajas del diseño económico y económico-estadístico de cartas I con parámetros de variables.

Palabras clave: Variables, I-bar, análisis, estadístico, asignable

Abstract

The purpose of this research is to demonstrate the use of the I-X BAR, collaboration in the statistical analysis of the processes of a set of brake system components, specifically diskotheques and pads of the Chevrolet brand - Aveo, for the center of our study is the analysis of the results of the continuous wear that exists in the shoes of the most common brands that

exist in the equator. The latest advances in the design of control charts have focused on the cards with variable parameters (VP) in which the parameters of the card are modified according to the value of the last sample. These letters have proven to be more effective in detecting the assignable causes, but more complex for their implementation in organizations. Although it is very important in the literature regarding the economic and / or statistical design of VP cards, it is only the authors who focus their efforts on making them accessible to companies. This article presents a new procedure designed to reduce non-conforming products and the advantages of the economic and economic-statistical design of the charts I the parameters of the variables.

Keywords:

Variables, I-bar, analysis, statistical, assignable

Introducción

Las zapatas de freno forman parte fundamental del sistema de frenos al ser este el componente que entra en contacto con el disco de freno, transformando así la energía cinética del vehículo en “energía calorífica” [1]. Para que una pastilla de freno preste no solo seguridad, sino también confort y durabilidad se realizan pruebas o ensayos de laboratorio acogidas a normas internacionales.

En el Ecuador a raíz del alza de los impuestos a la importación de productos en especial de automóviles ha traído como consecuencia la creación de empresas manufactureras destinadas a la producción de repuestos alternos, por lo cual se ha decidió analizar la conveniencia que tienen estos repuestos en comparación a los originales y a los repuestos alternos extranjeros que cumplen una serie de normas para “comercialización internacional” [2].

Para llegar a una comparación óptima entre las pastillas de freno mediante la Regulación ECE 13H se ha realizado un estudio de mercado de los vehículos europeos más comercializados sobre todo en el Distrito Metropolitano de Quito, ya que las normas a utilizar son Europeas.

Debido a los altos impuestos que rigen en el Ecuador a la “importación de productos” [3], se ha decidido analizar la conveniencia en la sustitución de pastillas originales por pastillas alternas nacionales como internacionales; así mismo gracias a una creciente demanda en lo que respecta al parque automotor ha dado como resultado un aumento considerable en la venta de este repuesto, por lo que es necesario el estudio de “control de calidad”[4]. La finalidad de esta investigación está basada en valorar de una manera cuantitativa la eficiencia de frenado de las “pastillas de freno”[5], que se distribuyen a nivel nacional debido a que en nuestro país no existe un ente que valide y apruebe las diferentes pastillas de freno para lo cual se usará normas con ensayos de laboratorio (Norma ECE 13H, Norma CFR105, Norma CFR 135). Fernando Carrión; académico de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO), afirmó que “El parque automotor, en el primer trimestre del año 2014, comenzó a crecer un 11%, mientras que la “tasa de población” [6], de Quito no llega al 2%.”, eso demuestra el elevado grado de demanda de vehículos que se está teniendo. Otro de los factores que incrementó la compra venta de vehículos fue la normativa “Pico y Placa” establecida en el Distrito Metropolitano de Quito.

“El rendimiento de los sistemas de freno debe coincidir con las pruebas requeridas para la aprobación de las nuevas pastillas de freno en origen, y mediante pruebas de rendimiento se determina si las pastillas de freno no originales (alternas) cumplen con las “normas”[7], preestablecidas; la prueba más importante es la “Prueba de sensibilidad de velocidad”, la cual es destinada a asegurar que el frenado (desaceleración) de las pastillas de “freno muestren desviaciones”[8], de desaceleración menores a diferentes velocidades (65, 100 y 135 Km/h),

estas variaciones en la desaceleración pueden oscilar hasta un +/- 15% de los valores obtenidos a la velocidad más baja” (Naciones Unidas, Directiva Europea).

La finalidad de esta investigación está basada en determinar de una manera “cualitativa la eficiencia que poseen las pastillas de freno nacionales” [9].

MÈTODO

En esta presente investigación se optó por el método de calidad I-X BAR ya que son gráficas que estudian el comportamiento de cada pastilla original y alterna, en la parte superior se grafica el promedio I-bar de las muestras recolectadas [10]. De esta manera se monitorea la estabilidad de la media (valor de tendencia central). En la parte inferior se gráfica el rango R de las muestras recolectadas; de esta manera se monitorea la estabilidad de la dispersión del proceso. La Por ejemplo, si hay cuatro turnos de trabajo en un día, las mediciones de cada turno podrían constituir un subgrupo.

Hay dos maneras de obtener los subgrupos. Una de ellas es retirar varias piezas juntas a intervalos regulares, por ejemplo cada hora.

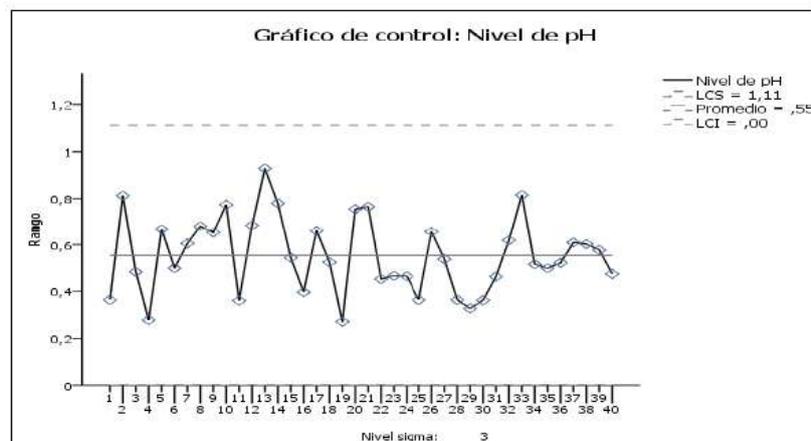
Como ya se ha visto, para calcular los límites de control es necesario obtener un gran número de mediciones, divididas en subgrupos. En nuestro ejemplo, podríamos obtener 30 subgrupos de 6 datos cada uno. Después de calcular el “Promedio y el Rango”[12], de cada subgrupo. A partir de esta tabla, se calculan el promedio general de promedios de subgrupo y el promedio de rangos de subgrupo. La desviación estándar del proceso se puede calcular a partir del rango promedio, utilizando el coeficiente d_2 , que depende del número de mediciones en el subgrupo. La desviación standard del rango se puede calcular utilizando el coeficiente d_3 , que también depende del número de mediciones en el subgrupo. Y así podemos calcular los Límites de Control para el Gráfico de R: ”[13].

EJECUCIÓN DEL INFORME CON LA CARTA I - X BAR

La salida incluye los gráficos de I barra y R, así como tablas que contienen las infracciones de reglas y los estadísticos del proceso.

Examine primero el gráfico I. El gráfico R utiliza rangos de muestras para controlar los cambios en la dispersión de un proceso. Los rangos de muestras se trazan como puntos en el gráfico y se conectan con líneas. La línea central sólida es el promedio de los rangos de muestras. Las dos líneas punteadas son el límite de control superior (UCL) y el límite de control inferior (LCL). Tenga en cuenta que el valor del LCL, 0,0, no puede verse ya que está alineado con el eje horizontal.[14]

Figura 1: Carta demostrativa utilización I – X Bar



Fuente: Autor

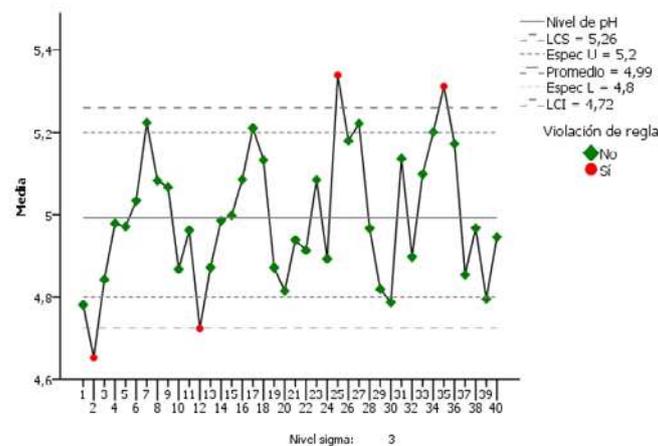
Los límites de control se calculan de forma que si el proceso está controlado, casi todos los puntos de la muestra se sitúan entre los límites. Los límites de control reflejan la cantidad de variación esperada en los rangos de la muestra cuando sólo están presentes causas de variación comunes.

Todos los puntos del gráfico R están dentro de los límites de control. La variabilidad del proceso está controlada. Para obtener una vista diferente, la del proceso en sí, en lugar de la variabilidad, examine el gráfico de I barra.[15]

Si un gráfico R indica que la variabilidad del proceso está fuera de control, no debe tener en cuenta el gráfico de I barra. El promedio de los rangos de la muestra se utiliza para el cálculo de los límites de control en el gráfico de I barra. De este modo, si el gráfico R no muestra control, los límites de control en el gráfico de I barra son cuestionables. Dado que la variabilidad del proceso parece estar controlada, examine ahora el gráfico de I barra.

En el gráfico de I barra siguiente se muestran los resultados para un período de tiempo especificado.

Figura 2: Carta demostrativa límites de control y límites de especificación I – X Bar



Fuente: Autores

El gráfico de I barra utiliza medias muestrales para controlar los cambios en un proceso. Las medias muestrales (o promedios) se trazan como puntos y se conectan con líneas. La línea central sólida es el promedio de las medias muestrales[16]. Las dos líneas punteadas internas son el límite de control superior (UCL) y el límite de control inferior (LCL). Los límites de

control reflejan la cantidad de variación esperada en las medias muestrales cuando sólo están presentes causas de variación comunes.

Para ver cómo están configurados estos datos, consulte la sección acerca de los gráficos de control para variables en Gráficos de control.

El promedio es 4,99, que está en el objetivo, pero este trazo muestra que determinados puntos del proceso están fuera de control.

En la tabla de infracciones de reglas que se muestra a continuación se indican los puntos que infringen cualquier regla. En la tabla se utiliza la variable de subgrupos para identificar los puntos. En este caso, la variable de subgrupos es tiempo de medición. [17]

En la tabla de estadísticos del proceso, el valor CP y PP es inferior a 1, lo que indica que el proceso muestra una variabilidad excesiva[19]. Los índices de variabilidad del proceso CpU y PpU muestran que el proceso se comporta de un modo relativamente simétrico. Para obtener más información acerca de estos índices, consulte Índices de función del proceso y Índices de rendimiento del proceso.

Con el gráfico de I barra, puede determinar que ciertos puntos del proceso están fuera de control.

El procedimiento crea un Gráfico I-bar para monitorear las medias de los subgrupos, para monitorear las varianzas de los subgrupos[20]. La señal fuera-de-control son iluminadas incluyendo los puntos que se encuentran más allá de los límites de control y cualquier racha inusual en los datos. Los Gráficos pueden ser construidos en el modo Estudio Inicial (Fase 1), donde los datos actuales determinan los límites de control o en el modo Control a Estándar (Fase 2) donde los límites provienen ya sea de un estándar conocido o de datos previos. El resultado y las opciones disponibles en el procedimiento I-bar y Gráficos S-Cuadrada son similares a los de los procedimientos X-bar y Gráficos R[21].

Este documento señalará solamente las diferencias entre los dos procedimientos. Para una discusión detallada de las opciones comunes, refiérase a la documentación para I-X bar y Gráficos I-R bar

APLICACIÓN AL ESTUDIO

Un estudio complementario se realizó, recolectado los datos de la tesis ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN DISCO DE FRENO ORIGINAL FRENTE A UN ALTERNO PARA UN VEHÍCULO CHEVROLET AVEO MEDIANTE SIMULACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES “para realizar un estudio complementario al echo en la tesis en el cual nosotros analizaremos cuales deberían ser los LCS y LCI que puede ser permisible para que dichos productos (pastillas, y discos, no sean tomados como productos no conformes ya para fines de producción en línea. Ahora bien este proceso se lo realizo en la ESCUELA POLITECNICA DE CHIMBORAZO.

Para desarrollar el análisis de la fricción generada por el contacto entre disco y pastilla, los estudiantes y tutores de la tesis comentaban que “se cuenta con un banco especializado en pruebas del sistema de frenos, en el cual se monta los elementos a ensayar, un motor eléctrico simula la rotación del eje de la rueda, la presión en la mordaza sobre las pastillas de freno es igual que en los vehículos y el accionamiento del pedal se realiza mediante una palanca. Las partes que conforman el banco de pruebas se encuentran en mal estado por lo que se realiza un mantenimiento reparación y cambio de algunos componentes, como las cañerías del líquido de frenos, la mordaza y bomba, el eje del motor eléctrico, conexiones eléctricas del sistema, montaje de un motor de vacío para el accionamiento del servo, etc. El anexo E muestra el procedimiento y sugerencias para la realización del ensayo” [23], de estas pruebas han resultado datos muy interesantes que en nuestro estudio tomamos como base para una análisis estadístico más exhaustivo en función al control estadístico de este proceso para validar por otra parte la

capacidad del proceso para poder ser producidos en línea en estas condiciones. Los datos son los siguientes:

Tabla 1: Resultados Prueba de desgaste discos y pastillas de freno

Medición	Desgaste repuestos originales (mm)		Desgaste repuestos alternos (mm)	
	Disco	Pastilla	Disco	Pastilla
Di	0	0	0	0
D1	0,2	1,65	0,8	3,45
D2	0,35	1,1	0,85	3,5
D3	0,25	1,25	0,9	3,7
D4	0,2	1,7	0,65	3,35
D5	0,25	1,5	0,7	3,55
D6	0,3	1,2	0,9	3,9
D7	0,1	1,45	0,9	3,5
D8	0,6	1,55	1,05	3,8
D9	0,3	1,5	0,8	3,9
D10	0,45	1,15	0,7	3,95
Promedio	0,3	1,41	0,83	3,66

Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6714>

Para ello utilizaremos las tablas de constantes para la utilización de las cartas de control en nuestro caso por variables al ser el análisis dimensional y no por atributos, como se analiza dos productos el original y el alternativo nuestro n será igual a 2 para el análisis y uso de las tablas

Figura 3: Tablas de constantes y formas para cartas de control para datos Individuales



APPENDIX E - Table of Constants and Formulas for Control Charts (Cont.)

Subgroup Size	Median Charts, **				Charts for Individuals*			
	Chart for Medjans (X)		Chart for Ranges (R)		Chart for Individuals (X)		Chart for Ranges (R)	
	Factors for Control Limits	Divisors for Estimate of Standard Deviation	Factors for Control Limits		Factors for Control Limits	Divisors for Estimate of Standard Deviation	Factors for Control Limits	
	\bar{A}_2	d_2	D_3	D_4	E_2	d_2	D_3	D_4
2	1.880	1.128	-	3.267	2.660	1.128	-	3.267
3	1.187	1.693	-	2.574	1.772	1.693	-	2.574
4	0.796	2.059	-	2.282	1.457	2.059	-	2.282
5	0.691	2.326	-	2.114	1.290	2.326	-	2.114
6	0.548	2.534	-	2.004	1.184	2.534	-	2.004
7	0.508	2.704	0.076	1.924	1.109	2.704	0.076	1.924
8	0.433	2.847	0.136	1.864	1.054	2.847	0.136	1.864
9	0.412	2.970	0.184	1.816	1.010	2.970	0.184	1.816
10	0.382	3.078	0.223	1.777	0.975	3.078	0.223	1.777

Fuente : Autor

Y al ser un cumulo de datos con una variabilidad relativamente estable utilizaremos la carta I – R Bar, la cual está en función de la media de nuestra variable y su rango, podríamos ocupar el I – S bar, que analiza la media y la desviación estándar, cualquiera de las dos nos va a validar nuestra hipótesis pero por esta vez hemos elegido analizar en función de la media y el rango.

Para ello utilizaremos las fórmulas del I – S bar las cuales son:

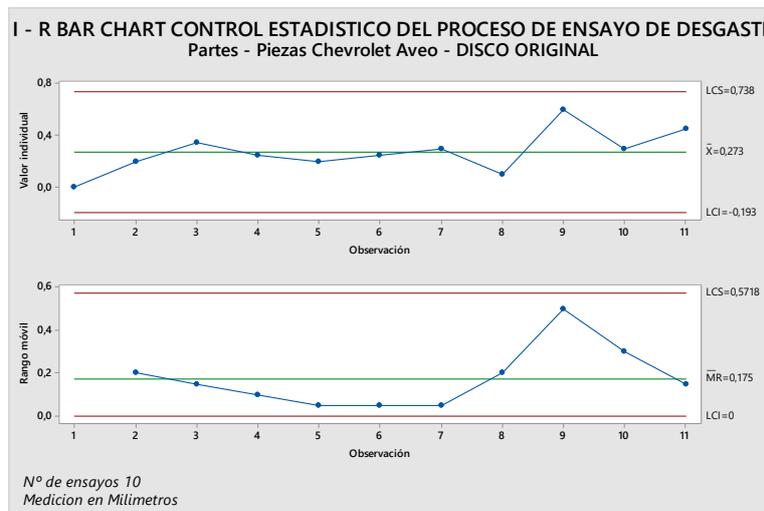
$$UCL, LCL = \pm E_2 \tag{1}$$

$$UCL_R = D_4 \tag{2}$$

$$LCL_R = D_3 \tag{3}$$

Comenzaremos el análisis el desgaste que mantiene los discos

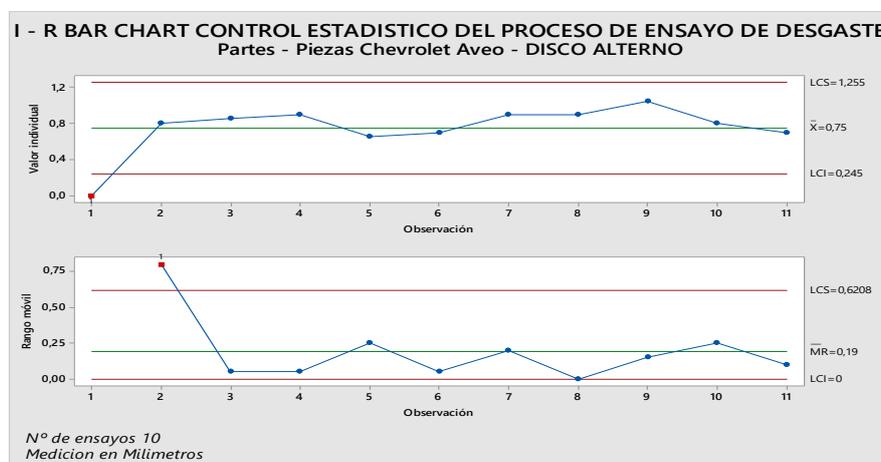
Figura 4: I – R Chat pruebas de desgaste de disco original Aveo



Fuente: Autores

Como podemos apreciar en la grafica en referencia a la media el desgaste del disco original tiene un comportamiento moderado cercano a la media 0,273 mm a excepción del punto 9 que estaría dentro de los limites de control pero con una tendencia hacia el límite superior en función a la carga y cambio de temperatura. No siendo así en función del Rango que su media esta sesgada hacia el limite de control inferior lo cual al acercarse al 0 es lo más optimo por el tema de desgaste de las pastillas, pero el límite superior al estar muy alejado con un 0,5718 mm me indica que existe mucha variabilidad en el proceso.

Figura 5: I – R Chat pruebas de desgaste de disco alterno Aveo

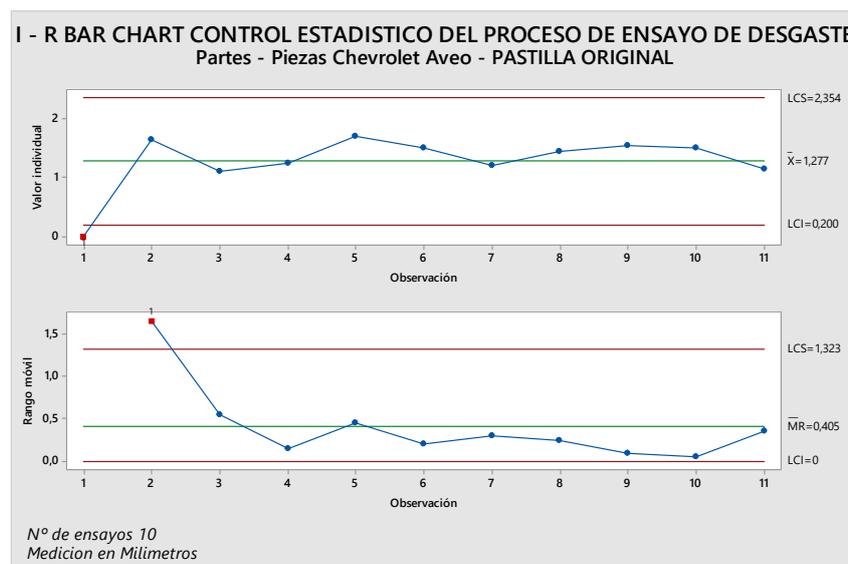


Fuente: Autores

Los datos del I - X Chart nos está indicando que los datos están sobre la media que es de 0,75 mm el cual es muy alto si relacionamos a la media de los discos originales el cual es de 0,273 mm, además de ello el limite inferior inicia con un 0,245 mm entonces es muy permisible el error en este tipo de disco, por otro lado la media del R – Chart esta muy cercano al del disco original, ahora bien si podemos observar el limite superior es muy amplio con un 0,6208 mm, entonces la variabilidad es demasiada alta y nos permite un rango muy alto de error.

De igual manera podemos describir el comportamiento de las pastillas de freno, dentro de las mismas especificaciones de comportamientos de desgaste para comparar entre un las piezas originales y alternas.

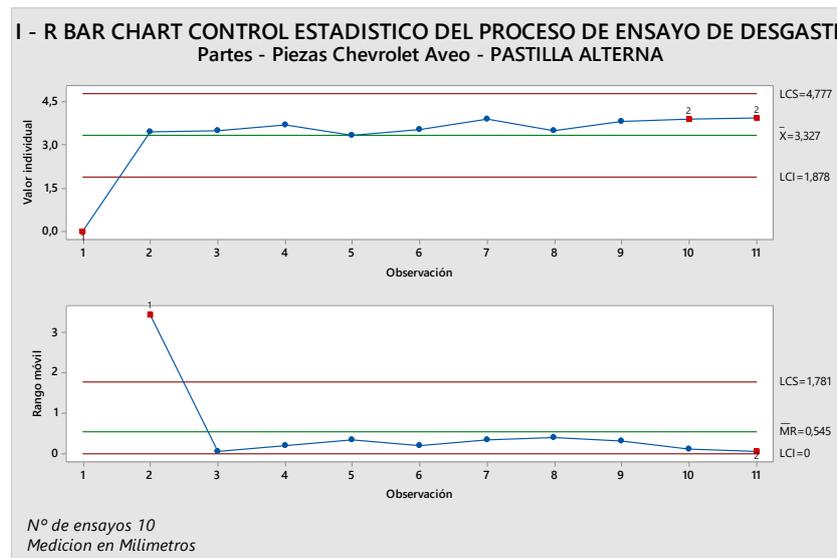
Figura 6: I – R Chat pruebas de desgaste de pastilla original Aveo



Fuente: Autores

Tenemos una tendencia similar de las pastillas de frenos originales, con los discos están dentro de un margen normal, las pastillas en este caso con un 1,277 mm pero está dentro de los estándares de desgaste que sería lo óptimo hasta 0,3 mm.

Figura 7: I – R Chat Pruebas de desgaste de Pastilla Alterna Aveo



Fuente: Autores

Pues, está claro que el desgaste de las pastillas alternas están sobre la media esperada que es de 3mm, en nuestro caso de las pastillas del Aveo tiene una media de 3,327, y analizando la gráfica esta la mayoría de los datos sobre este valor por lo que se requeriría establecer un tipo de metodología para el mejoramiento de la calidad en estas pastillas. El comportamiento en función al Rango muy parecido al de los discos alternos, muy elevado el límite de control superior.

Si no hay puntos fuera de los límites de control y no se encuentran patrones no aleatorios, se adoptan los límites calculados para controlar la producción futura.”[22].

III. HIPÓTESIS

El planteamiento de la hipótesis de investigación e hipótesis nula se planteó de la siguiente forma:

Hi: Los discos y pastillas originales tienen un menor desgaste acorde al control estadístico de procesos en el ensayo de pruebas de desgaste.

Ho: Los discos y pastillas originales no tienen un menor desgaste acorde al control estadístico de procesos en el ensayo de pruebas de desgaste.

IV. Resultados:

Elaboración de Cartas de control I - R CHART(variables)

Mediante el análisis planteado podemos tener datos estadísticos exactos teniendo en cuenta varios parámetros que una pastilla de frenos debe cumplir. Además, podemos separar y diagnosticar cual es la falla para que la producción tenga un crecimiento notable tanto en forma social como financiera. Por ejemplo en el Ecuador existen varias empresas que se dedican a la importación de pastillas de diferentes marcas como JFBK, BRAKE LINING, XTENDER, entre otras. Estas son producidas con estándares ecuatorianas y algunas con internacionales, para distribuir a los talleres de servicio mecánico de todo el país, las cuales tienen que cumplir con requerimientos de calidad adecuadas, para ello se hace varias tomas de datos de vehículos que llegan a talleres y concesionarias las cuales deben tener a su espesor mínimo 3 mm hasta 25.000 km de uso en esta ciudad, Pero al transcurrir del tiempo observan que hay muchas pastillas defectuosas que provocan un sin número de pérdidas en términos de garantías. Pero a todo ello la aplicación de este método de graficas de control de calidad por datos individuales de control de calidad es basto para comprender cual es este comportamiento de desgaste. Por lo que hemos tomado los datos del trabajo mencionado anteriormente para dar una alcance mas amplio a la investigación.

V. ANALISIS DE RESULTADOS -DISCUSION

Con los datos obtenidos de las cartas de control por datos individuales I - X,R Chart, podemos hacer un análisis de capacidad a cada uno de los componentes discos – pastillas, originales y

alternas, para ver si efectivamente tienen potencial de cambio con alguna metodología de mejoramiento continuo, o requerirá de una reingeniería de procesos.

Recordemos que C_p (Índice de capacidad potencial) ≥ 1 el procesos es capaz, quiere decir que es capaz de cumplir con las características y requerimientos que requieren los discos. Si el valor no supera el 0,67. El proceso es incapaz de producir de acuerdo a parámetros establecidos. Por lo que necesitaría una metodología mas drástica para obtener un cambio una de ellas en la reingeniería de procesos. Esto lo define la siguiente tabla que detalla la clasificación de acuerdo a la capacidad del proceso.

Figura8: Tabla de nivel de Capacidad del proceso

Valor de C_p	Clase de Proceso	Observaciones
$C_p \leq 2$	Clase mundial	Se tiene calidad 6 sigma
$1,33 \leq C_p < 2$	Clase 1	Muy capaz
$1 \leq C_p < 1,33$	Clase 2	Capaz, pero a media que el C_p se acerca a 1, se generan más defectos
$0,67 \leq C_p < 1$	Clase 3	Incapaz, se requiere un análisis del proceso y modificaciones
$C_p \leq 0,67$	Clase 4	Muy incapaz, se requiere modificaciones mayores

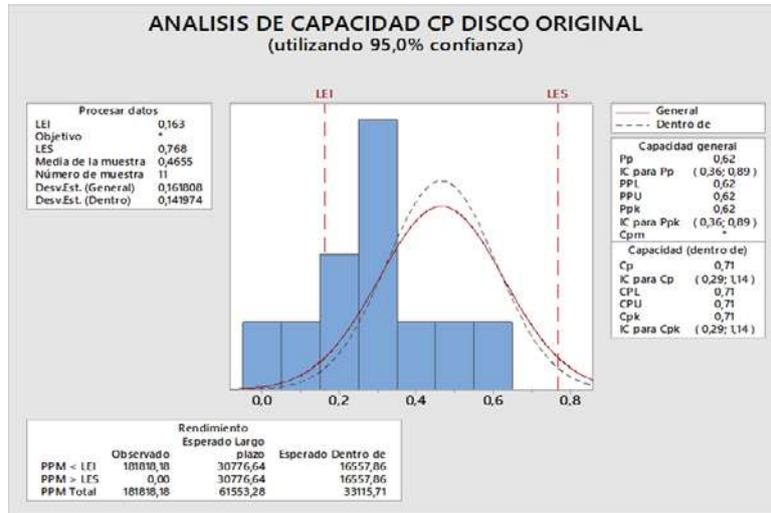
Fuente. Autores

Tabla 2: Datos estadísticos discos originales

DISCOS ORIGINALES							
MEDIA			M RANGO			Tolerancia +- 0,03 media	
LCS	LCI	X	LCS	LCI	XR	LES	LEI
0,738	0,193	0,273	0,5718	0	0,175	0,768	0,163

Fuente: Autores

Figura 9: Análisis de capacidad disco original



Fuente Autores

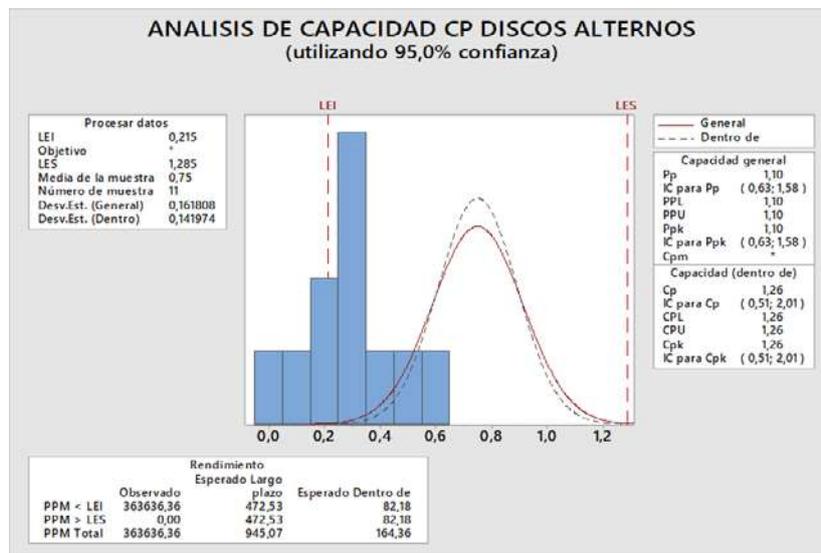
Como podemos ver el índice de Cp de los discos es de 0,71 el cual es bueno como valor de acuerdo a la tabla descrita es mayor que 0,67 pero recordemos que estamos analizando en función de defectos entonces si estamos más alejados al 1 estaremos diciendo que tenemos menos capacidad de producir errores.

Tabla 3: Datos estadísticos discos alternos

DISCOS ALTERNOS							
MEDIA			M RANGO			Tolerancia +/- 0,03 media	
LCS	LCI	X	LCS	LCI	XR	LES	LEI
1,255	0,245	0,75	0,6208	0	0,19	1,285	0,215

Fuente Autores

Figura 10: Análisis de capacidad disco alternativo



Fuente Autores

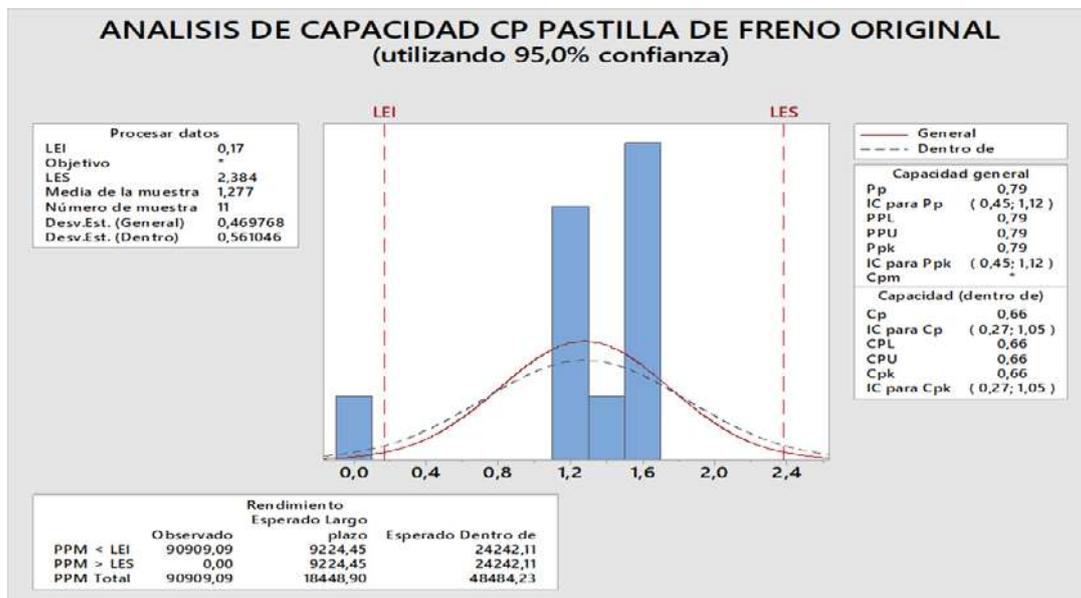
De acuerdo al análisis mencionado anteriormente que si se esta sobre el 1 quiere decir que tiene mucha capacidad para producir o proporcionar errores dentro de la producción, por lo que los alternos al estar sobre esta valor con 1,26 es muy alto el índice de capacidad de errores, por lo que diríamos que requiere de una reingeniería de procesos y aseveramos que el desgaste en función a la media y rango es muy alto.

Tabla 4: Datos estadísticos pastillas originales

PASTILLAS ORIGINALES							
MEDIA			M RANGO			Tolerancia +/- 0,03 media	
LCS	LCI	X	LCS	LCI	XR	LES	LEI
2,354	0,2	1,277	1,323	0	0,405	2,384	0,17

Fuente Autores

Figura 9: Análisis de capacidad pastilla original



Fuente Autores

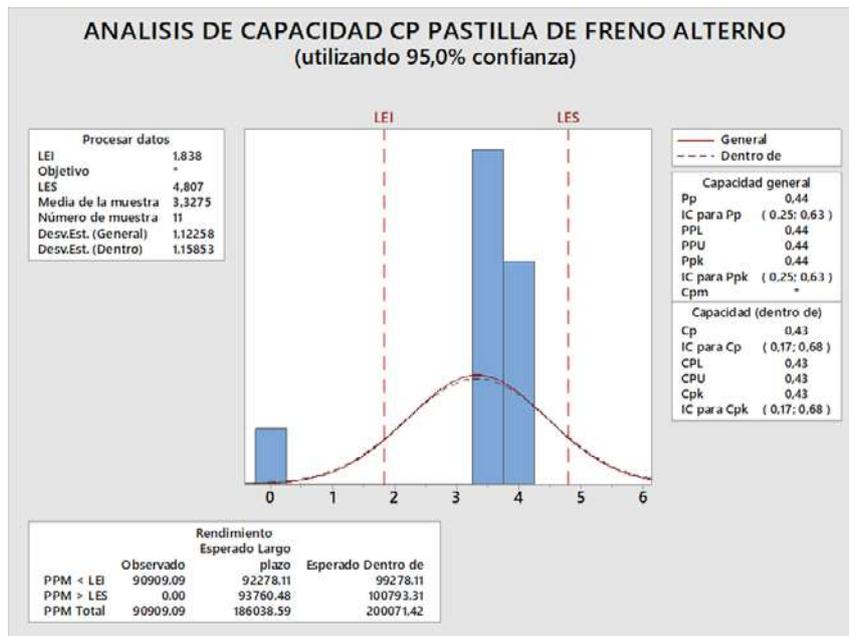
Dentro del análisis tenemos que las pastillas originales les corresponde un valor de 0,66, tomando como referencia el valor de para el arranque de las pruebas, obstante el rango de la misma es elevado por lo cual se requiere desarrollar mejoras al proceso.

Tabla 4: Datos estadísticos pastillas originales

PASTILLAS ALTERNOS							
MEDIA			M RANGO			Tolerancia +- 0,03 media	
LCS	LCI	X	LCS	LCI	XR	LES	LEI
4,777	1,878	3,327	1,781	0	0,545	4,807	1,848

Fuente Autores

Figura 9: Análisis de capacidad pastilla de freno en alterno



Para el análisis y el comportamiento de manera similar, se iniciara el arranque desde 0, el desgaste tiene un comportamiento similar con la diferencia, que los datos están acumulados sobre 3 mm, que de acuerdo a las recomendaciones no debería pasar de 3 mm. Por lo que se requiere de una reingeniería de procesos dentro de estas organizaciones productoras de pastillas alternas para poder cubrir la demanda del mercado satisfactoriamente.

VII. CONCLUSIONES:

- El freno de tambor o Zapata es un estudio presenta buenas características de diseño en los originales obteniendo un desgaste de 1,277 mm de promedio a comparación de los alternos que obtuvieron después de las pruebas un desgaste de 3,327 mm, en el tema de los discos se observó que tenía un comportamiento similar obteniendo en los originales un desgaste de 0,273 mm, muy por debajo de la media máxima esperada que es de 0,4 mm, y en los originales se obtuvo un 0,75 mm, obteniendo un desgaste superior al promedio esperado de allí el porque los alternos tiene una menor vida útil.
- La teoría de desgaste es similar a la de presión uniforme, de acuerdo a los datos diríamos que los discos y pastillas originales cumple satisfactoriamente con las funciones para las cuales fue diseñado, se tiene buena selección de materiales, el sistema no es complejo, se tiene baja probabilidad de que falle y en general es eficiente según el nivel de análisis que se está realizando en nuestro caso el desgaste que sufre con el uso, si se quiere dar resultados más comprometedores como el caso de una evaluación de un accidente, variables como materiales, temperatura, definen mucho la vida útil[15]
- El sistema de frenos en un automóvil puede resultar determinante ante cualquier accidente al volante. Es fundamental ser consciente de que los sistemas de frenos de mala calidad pueden resultar muy peligrosos en la conducción [16].
- Los laboratorios han analizado más de mil discos de freno comprados en el mercado europeo totalmente al azar. Se han estudiado las principales características técnicas de estos sistemas que pueden producir problemas tanto en la fase de montaje como en la utilización del disco de freno por parte del usuario final, por lo que se debe profundizar más el estudio y continuar con las pruebas para tener una sociedad libre de accidentes por temas de discos y pastillas defectuosas o en mal estado.

- Análisis han encontrado graves deficiencias en seguridad, confort, montaje y otros problemas derivados del uso de los mismos. Por lo que un factor muy importante que no se evalúa con rigurosidad por el tema de la variabilidad de tipos de personas detrás de un volante sería la que define mucho la vida útil de un disco y una pastilla de freno.

IX.REFERENCIAS

- [1] Avilez, A., & Romero, J. (2010). Física avanzada trabajo potencia y energía en mecanismos industriales.
- [2] L., Font, V., & Godino, J. D. (2014) Negocios y comercialización Internacional: comercio exterior. *Canales de comercialización internacional* 141.
- [3] Tobón, S., & López Loya, J. (2015). México en el mundo: inserción eficiente. Experiencias Exitosas en Materia de Información Para Los Sistemas .36(1), 42-55
- [4] James Shecks & Alexandra, J. (2018) UF2221 - Gestión, control y calidad en el servicio de transporte de viajeros. Fábrica y poder, mecanismos de control empresarial. *Díaz. periodo 2016–2017*.
- [5] Santana, N. J., Flores, R. F. P., Garcia, C. L. G., & Salgado, J. P. M. (2015). La Evaluación cualitativa: reflexión para la transformación de la realidad educativa. Evaluación de Los Aprendizajes. *REVISTA CIENTÍFICA AXIOMA*, 1(14), 14- 18.
- [6] M. E., Pistonesi, M. V., & Fanitini, S. G. (2014). Crecimiento de la población . *Revista do Instituto Internacional de São Paulo. ISSN 2237-9657*, 2(2), 93-101.
- [7] & Otzen, T. (2015). Estudios Experimentales 2 Parte: Normalización Nacional e Internacional de vehículos . *International Journal of Morphology*,
- [8] Vergara, G., Avilez, A., & Romero, J. (2016). Sistemas de suspensión y transmisión de vehículos.
- [9]] Iturbe, A. M., Ruiz, M. E., Pistonesi, M. V., & Fanitini, S. G. (2014). Procesos cuantitativo y cualitativos en el mercado. *Internacional de São Paulo. ISSN 2237-9657*, 2(2), 93-101.

- [10] López, B. G. (2016). Métodos de análisis de control de calidad In *Sociedad del conocimiento: aprendizaje e innovación en la universidad* (pp. 115-136).
- [11] Pino-Fan, L., Font, V., & Godino, J. D. (2014). Métodos de agrupaciones. *Matemática educativa: La formación de profesores*, 141.
- [12] Sánchez Turcios, R. A. (2015). t-Student: Estadística y contabilidad . *Revista mexicana de cardiología*, 26(1), 59-61.
- [13] Torrijo, E. M. Q. (2017). Estudio financiero exterior e interior. *Revista Didasc@ lia: Didáctica y Educación. ISSN 2224-2643*, 8(1), 99-110.
- [14] Fortuny, J. M. (2009). La influencia del control de calidad en estudios estadísticos. *Enseñanza de las Ciencias*,
- [15] , L., Font, V., & Godino, J. D. (2014). Sistemas de frenos y suspensiones *La formación de profesores*, 141
- [16] S., & López Loya, J. (2015). La importancia de los frenos en automóviles y camiones.
- [17]]Pistonesi, M. V., & Fanitini, S. G. (2014). Procesos cuantitativo y cualitativos en el mercado. *Internacional de São Paulo. ISSN 2237-9657*, 2(2), 93-101.
- [18] López, B. Métodos de análisis de control de calidad In *Sociedad del conocimiento: aprendizaje e innovación en la universidad* (pp. 115-136).
- [19] Godino, J. D. (2014). La Calidad en las Empresas financieras. *Calidad educativa: La formación de profesores*, 141.
- [20] Sánchez Turcios, R. A. (2015). Cartas de control . *Revista mexicana de cardiología*, 26(1), 59-61.
- [21] JOHN Eduard (2017). Estudio financiero exterior e interior. *Revista Didasc@ lia: Didáctica y Educación. ISSN 2224-2643*, 8(1), 99-110.
- [22] Antonnhy J. M. (2009). La influencia del control de calidad en estudios estadísticos. *Enseñanza de las Ciencias*
- [23] <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6714>

Desarrollo de un prototipo de un vehículo Audi R8 Spyder no tripulado utilizando comunicación con interfaz gráfica bajo el estándar IEEE 802.11

(Development of an unmanned Audi R8 Spyder vehicle prototype through communication with graphical interface and IEEE 802.11 standard)

J. Pastillo-Angamarca ⁽¹⁾, Daniel Quispe-Toapanta ⁽²⁾, C. Padilla-Padilla ⁽³⁾, J. Gavilánez-Carrión* ⁽⁴⁾

(1)(2)(3)(4) Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

*Correspondencia. Tel.: 0980228196, E-mail: javier.gavilanes@esPOCH.edu.ec (J. Gavilánez)

RESUMEN

Se ejecuta un modelo dependiendo de las tarjetas de avance adecuadas para recrear los desarrollos y marcos de un vehículo genuino con una precisión en su curso directo. El modelo utiliza perspectivas mecánicas para administrarse a sí mismo a lo largo de una dirección y se trabaja con control manual. Wireless se comprende como una gran cantidad de avances con la capacidad de intercambiar y cooperar entre sus diversos dispositivos (teléfonos, impresoras, estaciones de trabajo, establecimientos de alta fidelidad, teléfonos celulares, aparatos eléctricos, etc.) sin el requisito de asociaciones de enlace, que nos permite controlar el vehículo mediante métodos para cualquier dispositivo electrónico, que esté asociado con el sistema cercano del modelo a través de una interfaz realista que fue estructurada explícitamente para controlar el vehículo, para realizar diversas tareas de preparación y de esta manera realizar un comunicación de usuario - máquina. Este trabajo pretende mecanizar el tiempo que tarda el vehículo en hacer una línea recta. La importancia del proyecto es eliminar el tiempo de reacción del vehículo en su dirección (línea recta). Los resultados demuestran una conducta correcta del vehículo en diversas circunstancias y demuestran la necesidad de coordinar los datos táctiles para hacer un control de ruta ideal.

Palabras Claves— Wireless, Vehículo, Maquinar, Interfaz Realista, Dirección.

ABSTRACT

It is a model of the progress cards for the developments and frames of a genuine vehicle with a precision in its direct course. The model uses mechanical perspectives for the same work control manual. Wireless is understood as a lot of advances with the ability to exchange and cooperate among its various devices (telephones, printers, work stations, hi-fi providers, cell phones, electrical appliances, etc.) without the requirement of link associations, which allows us to control the vehicle using methods for any electronic device, which is related to a system for use through a realistic interface that has been structured in an explicit way to control the vehicle, to perform preparation tasks and in this way perform a user-machine communication. This work aims to mechanize the time it takes for the vehicle to make a straight line. The importance of the project is to eliminate the reaction time of the vehicle in its direction (straight line). The results become a control of the ideal route.

Key words: Wireless, Vehicle, Realistic interface, Machine, Directions.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de Intelligent Transportation Systems (ITS) es mejorar la seguridad, la productividad y la eficacia en cualquier método de transporte. Estas son interfaces entre los vehículos y la calle donde el diseño es mejorar su conducción. Es concebible realizar cambios en sus estructuras actuales [1]. La regla es que la disposición de los vehículos autónomos, desde otra perspectiva, es obtener un conductor falsificado que vea cómo dirigir los actuadores de manera similar a como lo haría un conductor físico

(humano). El punto de partida de los datos para la ruta independiente de los vehículos se encuentra en los marcos de ubicación, debido a su ejecución para comprender la dirección del vehículo.

Los marcos de rutas inerciales tienen la razón para enumerar la situación de las calidades de aceleración directa del vehículo y su velocidad angular determinada por el sistema, el INS [1] es un marco hecho de unos pocos sensores que miden velocidades crecientes y variedades precisas. Figura 1]. Complementando los datos, podemos evaluar la posición del vehículo desde su posición subyacente. Por fin, obtiene una distribución precisa y libre de sus señales exteriores. En cualquier caso, el procedimiento debe ser exacto en el momento en que se inicia el marco. Además, se nos presenta una situación en la que la desventaja es que la estimación de los marcos de inercia se invierte sobre la energía.

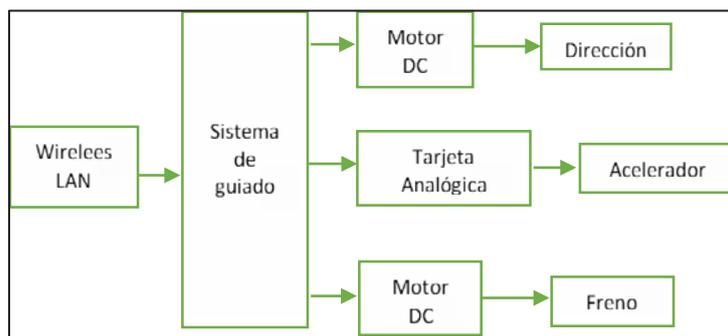


Figura 1. Estructura del Sistema de Control

Wireless son redes de telecomunicaciones cuyo objetivo es la conexión más flexible a través de redes cableadas (wired), su comunicación entre ellas se realiza en el medio físico utilizando el aire como medio de transmisión [3]. Dado que el aire no está 100% limpio y debido a su mal uso, se debe al uso regular de las bandas de frecuencia utilizables para sus comunicaciones. Por lo tanto, la banda ISM a 2,4 GHz y la UNII (Infraestructura de información nacional sin licencia) a 5 GHz, utilizada sin reservas para redes remotas que funcionan en todo el mundo, aparecen en la Fig. [2]

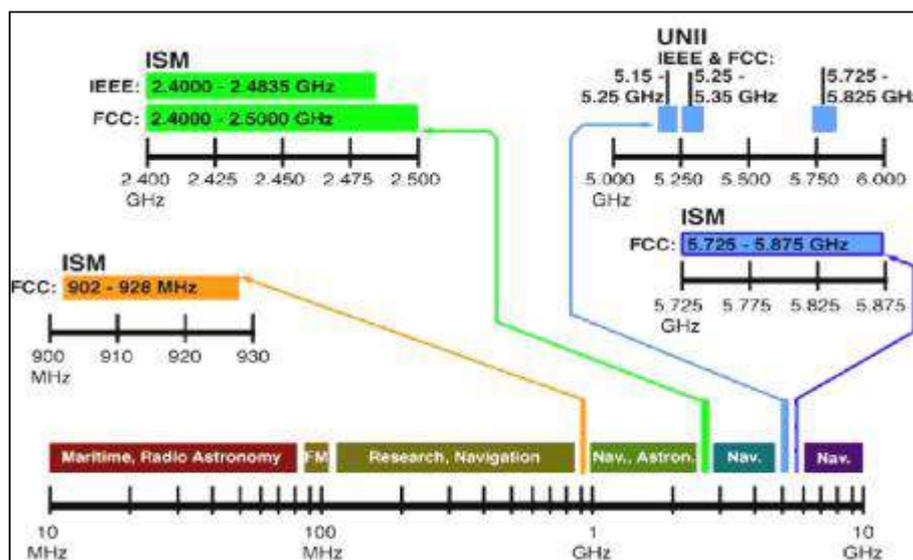


Figura 2. Banda ISM y UNII

Modelos Matemáticos de los Sistemas

Un modelo matemático de un marco dinámico se caracteriza por una gran cantidad de condiciones que se refieren a los elementos del marco adecuadamente como el marco genuino. Un modelo matemático no es extraordinario para un marco dado.

Se puede hablar de un marco desde múltiples puntos de vista, por lo que puede tener numerosos modelos matemático, dependiendo de cada punto de vista.

Se representa con respecto a las condiciones diferenciales.

Estas condiciones se adquieren de leyes físicas que administran un marco dado.

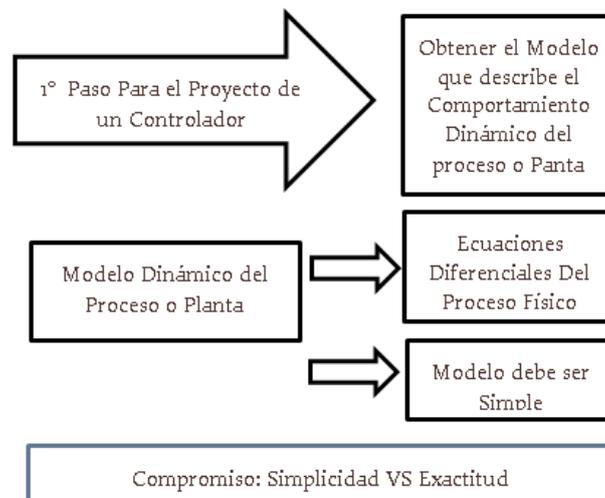


Figura 3. Modelado matemático de un sistema de control

Modelo Ostensible

Es una representación inexacta de la planta que se utiliza para la estructura del controlador.

Pantalla de ajuste

Es una descripción más precisa de la planta e incorpora aspectos destacados no utilizados por el originador.

Demuestre un error

Es la diferencia que existe entre el modelo nominal y el de calibración

Obtención de Modelos:

- Estrategia de investigación

Depende de la utilización de leyes esenciales de la ciencia material que deciden las conexiones entre todas las señales del marco (modelo aparente).

- Técnica de prueba

El marco se considera un descubrimiento que está expuesto a varios tipos de signos para adquirir sus parámetros.

- Reacción en el tiempo.
- Reacción de frecuencia.
- Prueba de distinción paramétrica

Nota: En el proceso de Modelación es necesario a veces la inclusión del ACTUADOR, los cuales son generalmente NO LINEALES.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal del proyecto es ejecutar y probar un marco de control y ruta autónoma para un vehículo no tripulado, consulte la Figura 4.



Figura 4. Prototipo Vehículo Audi R8 Spyder

En el proyecto incluye aspectos como el modelado matemático, la identificación paramétrica y distintos tipos de simulación de estado y navegación, control basado en el modelo.

Programación para la creación de la red local

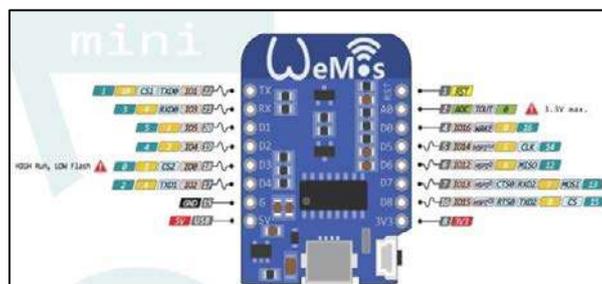


Figura 5. Tarjeta de desarrollo Wemos

```
// connect to WiFi network
Serial.println ();
Serial.println ();
```

```
Serial.print ("Connecting to ");
Serial.println (ssid);

WiFi.begin (ssid, password);

While (WiFi.status () != WL_CONNECTED) {
  Delay (500);
  Serial.print (".");
}
Serial.println ("");
Serial.println ("WiFi connected");

// Start the server
Server. Begin ();
Serial.println ("Server started");

// Print the IP address
Serial.print ("Use this URL to connect: ");
Serial.print ("http ://");
Serial.print (WiFi.localIP ());
Serial.println ("/");

}

Void loop () {
  // Check if a client has connected
  WiFiClient client = server. Available ();
  If (! client) {
    Return;
  }

  // Wait until the client sends some data
  Serial.println ("new client");

  While (! client.available ()) {
    Delay (1);
  }

  // Read the first line of the request
  String request = client.readStringUntil ('\r');
  Serial.println (request);
  client.flush ();
}
```

Modular D1 mini Pro

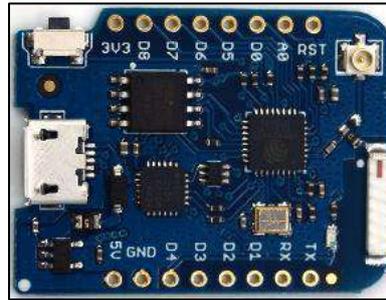


Figura 6. D1 mini Pro

El Wemos D1 mini usa la arquitectura de Arduino, pero cuenta con menos pines del normal. Aun así, es muy adecuado para este tipo de trabajos ya que su costo es muy reducido, es versátil y cuenta con una gran cantidad de shields, que nos harán no tener que volvernos locos haciendo circuitos en protoboard, sino simplemente pinchando uno encima de otro.

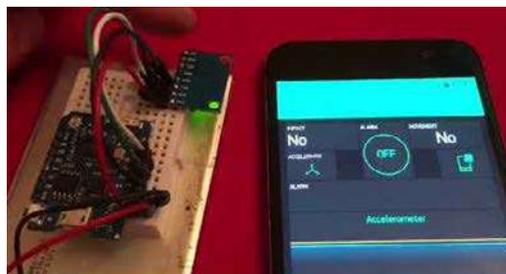


Figura 7. Prueba de las tarjetas Wemos y D1 mini pro

Interfaz Gráfica para el Manejo del Vehículo



Figura 8. Interfaz para el control del vehículo no tripulado.

Normas Estándares

En el Proyecto utilizamos varias normas conforme a Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) (Milliken & Milliken, 1995) [5].

El vehículo puede ser considerado como un sistema de dos masas: La masa no suspendida y la masa suspendida, cada uno con su sistema de ejes individual (SE_u y SE_s respectivamente) como se muestra en la Figura 9. Ambos se unen para formar el sistema de ejes de la PMP (SE_{PMP}), mostrado en la Figura 10. Sus sistemas son derechos.

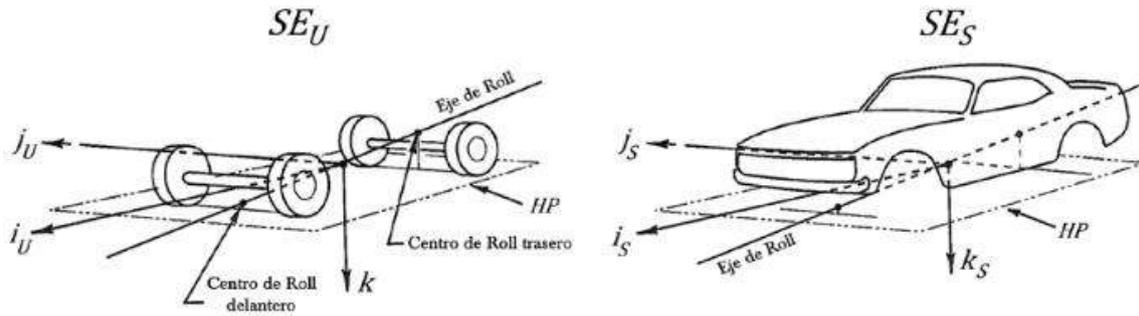


Figura 9. Sistema de dos masas

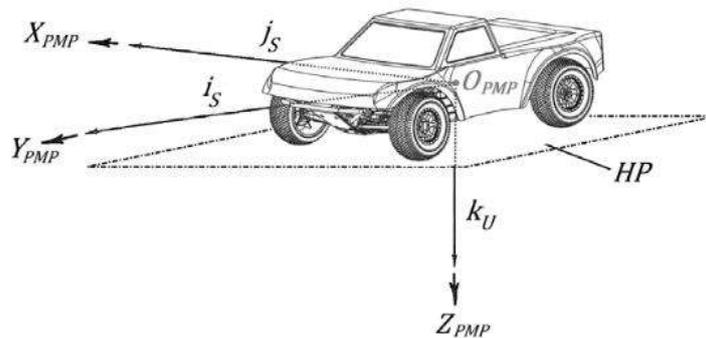


Figura 10. Sistema de ejes de la PMP

El origen O_{PMP} del SE_{PMP} está situado en el centro de masa (CM) de la PMP (CM_{PMP}), el eje X_{PMP} está ligado al eje I_s del SE_s y es positivo hacia el frente de la PMP, el eje Y_{PMP} está ligado al eje j_s del SE_s y es positivo hacia la derecha de la PMP, el eje Z_{PMP} está ligado al eje k_u del SE_u y es positivo hacia abajo de la PMP.

Se asume la existencia de un plano horizontal HP, sobre la cual se desplaza la PMP. El Cuerpo en interacción directa con HP es la llanta de la figura muestra el sistema de ejes de la llanta SE_w .

El origen O_w del SE_w esta situado en el centro del área de contacto de la llanta con HP (conocido como huella de la llanta), la llanta gira sobre el eje del giro de la llanta S_w y su interacción HP conteniendo a O_w da origen a X_w , que es positivo en dirección a avance de la llanta.

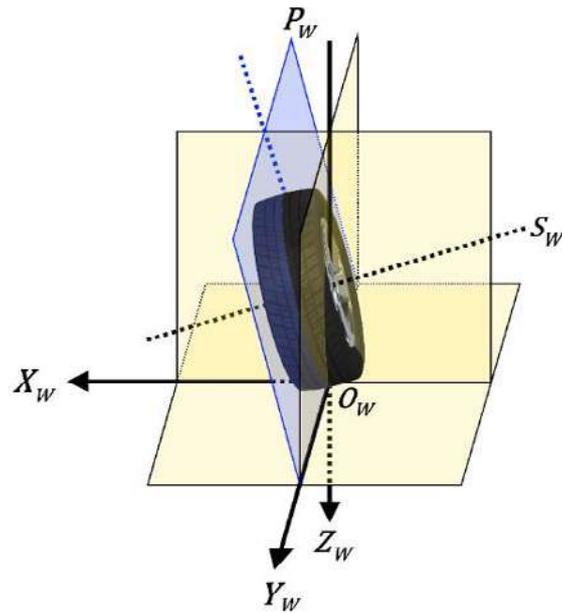


Figura 11. Sistemas de ejes de llanta

Un vehículo está hecho de varios marcos y subsistemas de todos modos, con el objetivo final de este trabajo, los principales principios fueron considerados: masa no suspendida, suspensión, guiado y marco de manejo.

Masa no Suspendida

Los componentes de un vehículo que no son sostenidos por los componentes flexibles fundamentales de la suspensión (resortes, barra de torsión, etc.) establecen la masa no suspendida (USM) (Happian-Smith, 2002). Uno de ellos, la llanta, es el lugar incontable de fuerzas en el que arranca la demostración en el vehículo: a través de la cooperación con la superficie de remoción, otorga los poderes de aceleración, tracción, frenado, restricción en la curva para la movilidad, al igual que las potencias y el par mecánico. Dar el control y la fuerza del equivalente (Milliken y Milliken, 1995).

A continuación, los poderes e impactos requeridos para mover el vehículo longitudinalmente, perseguir una forma doblada y los resultados de inclinar la llanta en varios ejes que son de gran importancia.

Punto de deslizamiento

Las llantas son elásticas a torsión, por lo tanto, al momento de girarlas la huella de la llanta se resistirá a este movimiento gracias a la fricción elástica entre el camino y el material de la llanta.

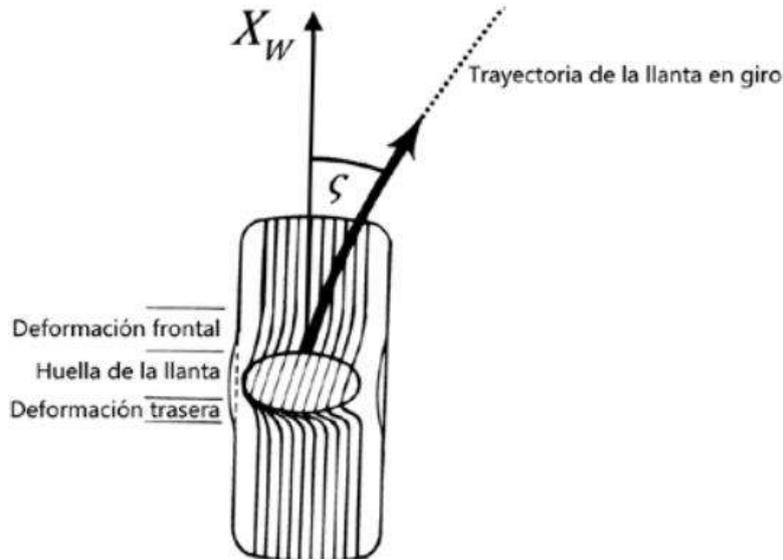


Figura 12. Slip Angle

Sistema de Propulsión

La mayoría de los vehículos comerciales son impulsados por un motor de encendido interno solitario (ICM), mientras que en la demostración de vehículos es además básico ser impulsado por un motor eléctrico solitario (ME). El tren motriz se encarga de transmitir el desarrollo del motor a las ruedas determinadas, a fin de crear las potencias de tracción vitales para que un vehículo siga una dirección. En la figura 13 se muestra una descripción general del marco del giro.

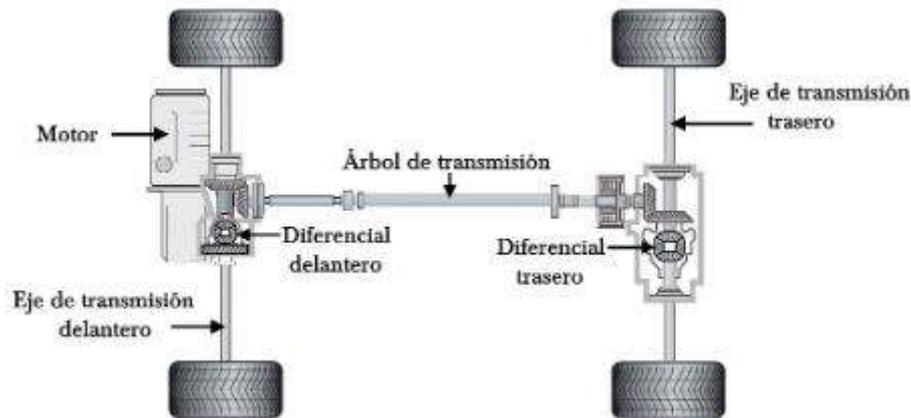


Figura 13. Sistema de Propulsión

Ecuación para la Velocidad

Para relacionar la velocidad con respecto a un marco inercial con la aceleración medida por los acelerómetros, es necesario tener en cuenta que ambas están medidas en diferentes marcos de referencia. El cambio de base se hace usando la matriz de rotación (c^T):

$$\dot{v}_T = c^T a_v + g_T \tag{1}$$

$$C = \begin{matrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \end{matrix} \quad (2)$$

En donde:

q_1 son elementos de un vector llamado “cuaternio” que se explica en la sección F.

g_T Es un vector que determina la fuerza de gravedad

Cuaternio

El cuaternio es un vector de cuatro segmentos que habla de la disposición del vehículo.

La velocidad de progreso del cuaternio se identifica con la velocidad precisa del vehículo mediante métodos para la articulación que lo acompaña:

$$\dot{q}_T = \frac{1}{2} \Omega_4 q_T \quad (3)$$

Campo Magnético

El campo magnético es el rendimiento del marco, estimado por los magnetómetros del vehículo. Es un vector de tres partes, y cada segmento habla de la atractiva calidad de campo en cada una de los tres ejes del vehículo. Las estimaciones se utilizan para calcular la declinación magnética (contraste preciso del norte geográfico y del norte magnético), que permite calcular el error en todo el vehículo. $\varrho\psi_T$.

Siendo así, la función g que relaciona las salidas con las entradas y con el vector de estado se definiría como:

$$y = g(x) = [p^T \quad v^T \quad \psi^T] \quad (4)$$

Y la ecuación que permite calcular el rumbo a partir de las variables de estado del sistema es:

$$\psi^T = \text{atan2}(C_{12}, C_{11}) \quad (5)$$

Modelo Aumentado

Las contribuciones al modelo cinemático creado son la velocidad de aceleración y velocidad estimada por la unidad de inercia, y estas medidas vienen corrompidas con ruido, que no es blanco, sino que

incluye unas desviaciones aleatorias conocidas como “random walk”. Se añaden al vector de estado seis partes adicionales, que se comparan exactamente con las desviaciones en los acelerómetros y los giróscopos. La idea es que estos estados adicionales sean estimados por el observador y que se usen para corregir las medidas de aceleración y velocidad angular provenientes de la unidad inercial.

En la Tabla 1 se resumen las ecuaciones que se utilizan en el modelo aumentado. Puede verse en dicha tabla que las desviaciones en la aceleración y la velocidad se restan al vector de aceleración antes de integrar.

Estados del sistema	Salidas del sistema	Entradas del sistema
$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_T \\ \mathbf{v}_T \\ \mathbf{q}_T \\ \mathbf{b}_a \\ \mathbf{b}_\omega \end{bmatrix} = f(\mathbf{x}, \mathbf{a}_V, \boldsymbol{\omega}_V)$	$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_T \\ \mathbf{v}_T \\ \psi_T \end{bmatrix} = g(\mathbf{x})$	$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_V \\ \boldsymbol{\omega}_V \end{bmatrix}$
$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}_T &= \mathbf{v}_T \\ \dot{\mathbf{v}}_T &= \mathbf{C}^T \mathbf{a}_V + \mathbf{g}_T \\ \dot{\mathbf{q}}_T &= -\frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}_4 \mathbf{q}_T \\ \dot{\mathbf{b}}_a &= \mathbf{n}_a \\ \dot{\mathbf{b}}_\omega &= \mathbf{n}_\omega \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mathbf{p}_T &= \mathbf{I} \mathbf{p}_T \\ \mathbf{v}_T &= \mathbf{I}_3 \mathbf{v}_T \\ \psi_T &= \tan^{-1}(C_{12}, C_{11}) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mathbf{a}_V &= [a_x \ a_y \ a_z]^T \\ \boldsymbol{\omega}_V &= [p_\omega \ q_\omega \ r_\omega]^T \end{aligned}$

Figura 14. Ecuaciones que componen el modelo cinemático de un vehículo

Filtro de Kalman

El canal de Kalman utiliza una medida fugaz que comprende el examen de los elementos de los factores de estado y, además, utiliza una medida transversal a partir de la cual obtiene las estimaciones en los intervalos temporales de los factores notables. El canal de Kalman es un cálculo recursivo en el que el estado subyacente se ve como una variable gaussiana irregular. Un modelo estocástico directo se demuestra por las condiciones de progreso y estimación [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \tag{6}$$

donde w_k es ruido blanco $N(0, Q_k)$ en el instante k , v_k es ruido blanco $N(0, R_k)$ en el instante k , A es la matriz de transición de estados, \mathbf{x}_k es el vector de estados a estimar, B y \mathbf{u}_{k-1} es la matriz de comandos y H_k es la matriz de observación.

Para establecer las ecuaciones del filtro de Kalman las siguientes hipótesis son requeridas.

- Las medidas de ruido son consideradas gaussianas e independientes una de otra.
- La matriz de covarianza es conocida.
- El estado inicial x_0 es un vector gaussiano independiente de w_k y v_k .

El filtro de Kalman se describe en dos pasos la predicción y corrección.

Predicción

- Estimación a priori:

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \Phi_k \mathbf{x}_{k-1|k-1} \tag{7}$$

- Covarianza del error estimado

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \Phi_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (8)$$

Corrección

- Innovación:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_{k|k-1} \quad (9)$$

- Ganancia de Kalman:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (10)$$

- Estación a posteriori:

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{y}_k \quad (11)$$

- Covarianza de error estimado a posteriori:

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (12)$$

donde Φ_k es la matriz de transición de estados que relación $\mathbf{x}_{k|k-1}$ con $\mathbf{x}_{k-1|k-1}$, $\mathbf{P}_{k|k-1}$ es la covarianza del error asociada a la estimación a priori, \mathbf{z}_k es el vector de mediciones al instante k , \mathbf{H}_k es la matriz de observación que relaciona entre mediciones y el vector de estado en el instante k y \mathbf{R}_k es la matriz de covarianza del ruido.

Filtro de Madgwick

Es importante conocer que los ángulos de posición se pueden obtener mediante la integración de la velocidad angular que no es más que la derivada del ángulo en el tiempo.

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt + C \quad (13)$$

donde C es la constante de integración y es responsable de la presencia de errores en la medición que son de carácter acumulativo, por tal motivo se ha realizado la implementación del filtro AHRS de Sebastián Madgwick.

Los valores de actitud *yaw*, *pitch* y *roll*, además de expresarse gráficamente mediante métodos para la aplicación en Preparación, también aparecen, en cualquier caso, es en la representación realista donde puede descubrir la ilimitada utilización de los usos, ya que Permitir la observación de la situación de los cuerpos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo las estimaciones particulares, se elige una forma directa como en la Figura 15 dentro de la Escuela Politécnica Superior de Chimborazo (ESPOCH), donde hay un Punto de salida A y debe alcanzar un Punto B de llegada que se evaluará según sus respectivos análisis [7].



Figura 15. Trayectoria lineal del vehículo

Pruebas realizadas en tiempo real

Las pruebas, Figura 15, fueron realizadas con la batería cargada en su totalidad su valor fue de 12.8 V, no tiene un sistema de carga, por lo que la batería tiende a ir desgastando variando su velocidad, y el tiempo al momento de realizar su trayectoria lineal.

Pruebas hechas al prototipo en tiempo real

Tabla 1. Pruebas numero 1, en tiempo real

INTENTOS	DISTANCIA [m]	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [m/s]
1	15	4,64	3,232
2	15	4,78	3,138
3	15	5,55	2,702
4	15	6,26	2,396
5	15	6,88	2,18

Tabla 2. Pruebas numero 2, en tiempo real

INTENTOS	DISTANCIA [m]	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [m/s]
1	15	4,47	3,355
2	15	4,92	3,048
3	15	5,21	2,879
4	15	5,98	2,508
5	15	6,53	2,297

Tabla 2. Pruebas numero 3, en tiempo real

INTENTOS	DISTANCIA [m]	TIEMPO [s]	VELOCIDAD [m/s]
1	15	4,58	3,275
2	15	4,98	3,012
3	15	5,33	2,814
4	15	6,11	2,454
5	15	6,88	2,18

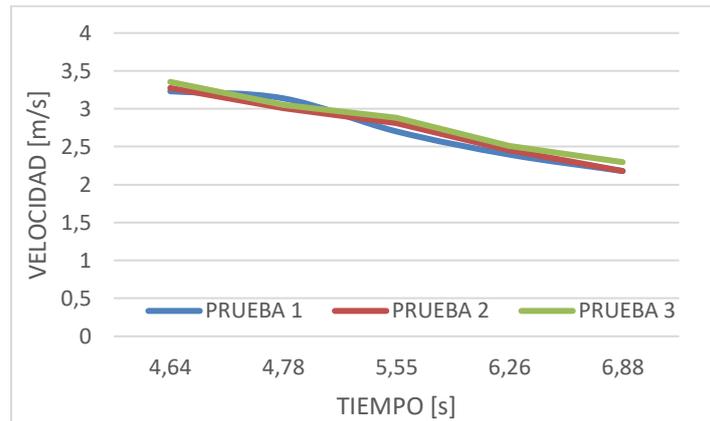


Figura 16. Grafica de resultados.

Al finalizar las distintas pruebas y una vez obtenido los datos podemos observar una mínima variación en los tiempos y velocidades en que se demora en cada prueba realizada, como se puede verificar en la Figura 16. Cada prueba fue realizada en tiempo real y con una carga total de la batería (12.8V).

Observamos que a medida que se realizaba cada uno de los intentos la velocidad y el tiempo del prototipo iban disminuyendo, la cual se da a conocer que la batería es directamente proporcional al tiempo en que se realiza dicha trayectoria.

3.1. DISCUSIÓN

- Cuando realizamos las pruebas observamos que el prototipo tiene una velocidad aceptable, los tiempos se pueden mejorar, si modificamos la programación del motor paso a paso (PWM), ya que este motor es el encargado de limitar la variación de la potencia del prototipo.
- A través de la tecnología y nuevos sistemas ya diseñados se puede dar un mejor funcionamiento a nuestro prototipo, de tal manera que se puede implementar como agentes virtuales, que son capaces de interactuar con humanos, como ya existen los CHATBOTS, que son utilizados actualmente para el servicio al cliente y soporte, así como administradores de hogares inteligentes.
- El sistema diseñado no es solo un prototipo que puede ser utilizado o puesto en práctica no solo en vehículos, sino se podía implementar en una máquina automática, para de esta manera pueda ser controlada a través de una interfaz. Ya que, en situaciones de emergencias, pueden ser utilizados para acceder a lugares poco accesibles, para accionar mecanismos peligrosos, u ofrecer una panorámica de un accionamiento singular, podrían semejarse hacer la tarea de un robot todo terreno, como el robot SCORP.

4. CONCLUSIONES

- Al finalizar el proyecto logramos estudiar y analizar el sistema de navegación autónoma. Los materiales usados para la construcción del prototipo son el módulo D1mini pro y la placa Wemos ya que por sus características tecnológicas y económicas se ajustan al objetivo de implementar un prototipo de bajo costo con altas prestaciones respecto a su precisión. La

programación se hace de acuerdo al pin que se conecta a la Wemos si la señal es análoga programamos con (0 y 1023 bits) que eso es equivalente a 0 o 5 V. Si la señal es digital la programación cambia a 0 y 1. En la Wemos nos facilita a crear una red local y nos ayuda a que nos dé una dirección IP. Al final se puede decir que logramos llegar a un resultado favorable donde se puede solucionar el problema inicial

- En estos días, un vehículo Google es el más destacado entre los vehículos de referencia y más excepcionales en este tipo de mercado. El gigante informático esperaba que, en 2020, sea usual observar vehículos completamente independientes dando vueltas en las calles. Para esto, la probabilidad de asociarse con los fabricantes de automóviles ofrecerá las licencias de su marco de trabajo, de modo que estas organizaciones sean las que los actualicen en los vehículos.

REFERENCIAS

- [1] Open source IMU and AHRS algorithms. Abril 2017, [Online]. Disponible: <http://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>
- [2] Cuenca L., León J., “Implementación de un sistema de navegación inercial, para mejorar la precisión de posicionamiento de un prototipo GPS en una trayectoria dentro de la ESPOCH”, Tesis de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, Tech. Report., 2017. p. 89
- [3] DIGITAL, L. D. (24 de SEPTIEMBRE de 2015). *LABORATORIO DE ELECTRONICA DIGITAL*. Obtenido de LABORATORIO DE ELECTRONICA DIGITAL: <https://fabelecdigital.wordpress.com/2014/09/25/practica-2-implementacion-de-tablas-de-verdad-de-compuertas-logicas/>
- [4] Naranjo J. E, González C., García R., de Pedro T (2006). ACC+Stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control. En IEEE trans. On Intelligent Transportation Systems, 7(2), 213-225
- [5] ObradovicD., Lenz H. and Schupfner M (2007). Fusion of sensor Data in siemens Car Navigation System. En IEEE Tran. On Vehicular Technology. 56(1). 43-50
- [6] Lan, Y. Yan, G. and Lin, Z. A hybrid control approach to multi-robot coordinated path following. In *Proc. 48th IEEE Conf. Held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conf Decision and Control CDC/CCC 2009*, pp. 3032-3037, 2009.
- [7] Egerstedt, M. and Hu, X. A hybrid control approach to action coordination for mobile robots. *Automatica*, vol. 38, no. 1, pp. 125-130, 2002.
- [8] Shirong Liu; Linbo Mao; Jinshou Yu; Path Planning Based on Ant Colony Algorithm and Distributed Local Navigation for Multi-Robot Systems, *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, June 2006 Page(s):1733 - 1738 .
- [9] Zhang Meiyu, Huang Han, Hao Zhifeng, Motion Planning of Autonomous Mobile Robot Based on Ant Colony Algorithm, *Computer Engineering and Application*, 2005, No. 25: 34-37.
- [10] Vélez C.M., Agudelo A. (2006). Control and Parameter Estimation of a Mini-Helicopter Robot Using Rapid Prototyping Tools, *WSEAS*

Trans. on Systems, Vol. 5, No. 9, pp. 2250-2256

[11] BARRERA, Daniel, “Diseño e implementación de un cuadracóptero con sistema de control automático de estabilidad y comunicación inalámbrica de datos utilizando plataformas de hardware y software libre”, Universidad de Costa Rica, Julio 2012

[12] ABBEEL, Pieter; COATES, Adam; MONTEMERLO, Michael; NG, Andrew and THURN, Sebastian. Discriminative Training of Kalman Filters. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2005; p.289-296.

[13] CACCIA, G. Veruggio; ALESSANDRI, M. Fault Detection of Actuator Faults in Unmanned Underwater Vehicles. *IFAC Control Engineering Practice*, England Vol. 7, (March 1999) pp. 357-368.

[14] BISHOP, Gary. An Introduction to the Kalman Filter. North Carolina: Technical Report TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 1995; p. 1-16.

[15] Santos, A. G. (2008). Autonomous Mobile Robot Navigation using Smartphones. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Lisboa.

[16] Milliken, W., & Milliken, D. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers.

[17] Moutou, S. (2015). Travail pratique: Utilisation d'un Accéléromètre MPU6050. Obtenido de Wikiversity:

https://fr.wikiversity.org/wiki/Micro_contr%C3%B4leurs_AVR/Travail_pratique/Utilisation_d'un_Acc%C3%A9l%C3%A9rom%C3%A8tre_MPU6050

[18] MSUK. (2013). Advantages of CVD's over dog bones? Obtenido de MSUK Forum: <https://www.msuk-forum.co.uk/forums/topic/177353-advantages-of-cvds-over-dog-bones/>

[19] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación.

[20] Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Cambridge: The MIT Press.

DIAGNÓSTICO Y MONITORIZADO DEL FUNCIONAMIENTO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN ALIMENTADOS CON GAS POBRE

J.C. Lucero¹*, F. Tinaut², S. Del Blanco, A. Peralvo³

(1)* Universidad UTE, Quito, Ecuador, juan.lucero@ute.edu.ec
y UVA (Universidad de Valladolid-España)

(2) CIDAUT (Fundación para la Investigación en el Transporte y la Energía), Valladolid, España.
fratin@cidaut.es

(3) Universidad UTE, Quito, Ecuador, alexander.peralvo@ute.edu.ec

*Correspondencia: Telf 0984672927, juan.lucero@ute.edu.ec (Autor: JC Lucero)

RESUMEN

El presente resumen está desarrollado en base a la investigación realizada en las entidades colaboradoras: Fundación CIDAUT y UVA con el fin de determinar aspectos y técnicas de mantenimiento predictivo de motores estacionarios para la generación de energía eléctrica. Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) están integrados a la tecnología de gasificación termoquímica de biomasa. La gasificación es un proceso que convierte la biomasa en un combustible gaseoso útil para la alimentación de motores MCIA, aprovechando energéticamente los residuos forestales y agrícolas. Tras la introducción, se presentan los aspectos generales del diagnóstico y mantenimiento de motores alimentados con gas de gasificación con aire (gas pobre). La presencia de alquitrán, de partículas y de agua, la variación de la composición del gas y la existencia de vapores de Na y K introducen problemas específicos para el correcto funcionamiento de los motores, que además trabajan en condiciones próximas a las de plena carga largos periodos de tiempo. Se introducen los conceptos de fallo, avería y síntoma, y su relación entre ellos, que justifica el monitorizado en continuo de variables (como presiones, temperaturas, niveles), así como las inspecciones y los análisis en discontinuo (por ejemplo para el lubricante). Seguidamente se enumeran los principales problemas que pueden ocurrir en estos motores, en culata y válvulas, lubricante, corrosión, gripados, picado de biela, emisiones contaminantes, deterioro del catalizador de oxidación, condensaciones, deposiciones de alquitranes, etc. Todos estos problemas se tratan de minimizar mediante una combinación adecuada de un sistema de mantenimiento predictivo, basado en el monitorizado en continuo, y un plan de mantenimiento, con información sobre el estado de los componentes o del lubricante que se sustituyen.

Palabras clave: Mantenimiento de motores, mantenimiento predictivo, monitorizado, gasificación, biomasa.

ABSTRACT

This work related to Master of Automotive Engineering, University of Valladolid, is based on business practices performed in the collaborative institution CIDAUT Foundation. The purpose of work is to determine aspects and techniques of predictive maintenance of stationary engines in order to generate electric power. Alternative Internal Combustion Engines (ICE) are part of thermochemical biomass gasification technology. Gasification is a process that converts biomass into a combustible gas useful for the engine supply (ICE) taking energetically advantage of forest and agricultural residues. After the introduction, the general aspects of the diagnosis and maintenance of engines fed with gasification gas with air (poor gas) are presented. The presence of tar, particles and water, the variation of the composition of the gas and the existence of vapors of Na and K introduce specific problems for the correct functioning of the engines, which also work in conditions close to the full load long periods of time. The concepts of failure, failure and symptom are introduced, and their relation between them, which justifies continuous monitoring of variables (such as pressures, temperatures, levels), as well as inspections and analyzes in batch (for example for the lubricant).

The main problems that can occur in these engines, in cylinder head and valves, lubricant, corrosion, seizures, connecting rod pitting, pollutant emissions, deterioration of the oxidation catalyst, condensation, tar deposits. All these problems are minimized by an appropriate combination of a predictive maintenance system, based on continuous monitoring, and a maintenance plan, with information on the state of the components or lubricant that are replaced.

Key words: Maintenance of engines, Predictive Maintenance, monitored, gasification, biomass.

1. INTRODUCCIÓN

Aprovechamiento energético de biomasa mediante gasificación combinada con motores de combustión interna.

El uso de la biomasa como recurso energético es de gran importancia para el desarrollo socioeconómico y presenta ventajas medioambientales. La transformación de la biomasa a un gas combustible se realiza mediante un proceso de combustión incompleta a elevadas temperaturas (gasificación), con un agente gasificante que si es aire genera el denominado gas pobre. El aprovechamiento de este gas pobre permite la obtención de energía eléctrica y térmica en pequeñas potencias (100 kW_e) usando motores de encendido provocado acoplados a generadores asíncronos. En la Fig. 1 se presenta un esquema de una planta de gasificación desarrollada por la Fundación CIDAUT en combinación con la Universidad de Valladolid.

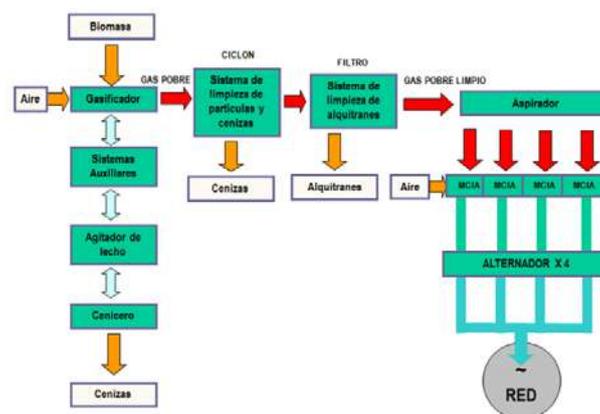


Figura 1. Esquema general de la planta de gasificación de biomasa

Los motores MEP alimentados con gas pobre exigen que la mezcla admitida sea estequiométrica o muy próxima a ésta, para aumentar la velocidad de propagación de llama y la potencia específica. En [1] se describe un método para estimar la potencia de un motor trabajando con combustibles no convencionales. Para evitar problemas de autoinflamación se limita la relación de compresión del motor.

Los motores de combustión interna alternativos que trabajan con gas de gasificación (gas pobre) como combustible presentan ciertos inconvenientes, a diferencia de los motores a gasolina y gasoil. El principal problema en el funcionamiento de estos motores es la presencia de compuestos de alquitrán en el gas proveniente del proceso de gasificación. Además, la presencia de partículas sólidas, la variación de composición del gas pobre debido a las condiciones de la biomasa y del propio proceso de gasificación, el contenido en agua del gas pobre, o incluso la presencia de compuestos de Na y K añaden dificultades.

El proceso de gasificación, con el tipo de gasificador y las condiciones de operación, y de limpieza son los principales responsables de la presencia de alquitrán en el gas pobre combustible [2]. Es decir, las condiciones de operación, el mantenimiento, las anomalías, que tiene el motor de combustión a gas pobre dependerán directamente de la tecnología de gasificación usada y de la biomasa procesada. Cabe indicar que incluso después de una limpieza exhaustiva del gas todavía hay ciertas cantidades de alquitrán en el gas pobre.

Por las condiciones expuestas es importante realizar un diagnóstico y mantenimiento exhaustivo de los motores a gas pobre. Para ello consideramos las siguientes definiciones de términos:

- Fallo es la finalización de la habilidad de una máquina, elemento o sistema para realizar la función para la cual ha sido diseñada, sin que necesariamente el sistema deje de funcionar.
- Avería es un fallo que origina un desperfecto, rotura o mal funcionamiento de un elemento o sistema. Una avería por lo general requiere una intervención de mantenimiento correctivo [3].
- Síntoma es una manifestación externa del estado de un sistema o del funcionamiento de sus componentes, que cambian al variar sus condiciones operativas y ante la presencia de fallos. Sin embargo los síntomas no son necesariamente manifestación de los fallos, ya que los síntomas se pueden medir. La base fundamental de todo proceso de diagnóstico y seguimiento de motores son los síntomas, por lo tanto es de vital importancia su identificación, medición, valoración y su correlación con los fallos.

Los síntomas pueden ser modificaciones de los valores de variables físicas elementales como la temperatura, presión, velocidad del motor, etc. Se ha denominado estos síntomas como variables de funcionamiento. Dependiendo la obtención de las variables podemos clasificarlas en:

- Variables monitorizadas en continuo.- Obtenidas durante el funcionamiento del motor.
- Variables monitorizadas en discontinuo.- A partir del análisis de un componente extraído del motor, es especial análisis del lubricante, así como inspecciones y desmontaje de componentes.
- Inspecciones en discontinuo y/o con instalación parada.- Sometido a condiciones de funcionamiento o pruebas definidas.

La combinación de los mantenimientos preventivos, correctivos y predictivos con el diagnóstico y predicción de fallas y averías garantizan el funcionamiento y monitorizado correcto del motor a gas pobre. Entendiendo que el mantenimiento predictivo es el conjunto de actividades destinadas a mantenerlos en funcionamiento, escogiendo como momento óptimo la intervención y reparación el estado más óptimo al fallo. Es un seguimiento continuo de algunas variables que determinan el estado del sistema, y se comparan con patrones preestablecidos

Diagnóstico y predicción de fallos y averías

- El diagnóstico de fallos de un motor es el proceso de detección de síntomas, evaluación de su condición actual y determinación de la causa de las anomalías en las máquinas.
- La predicción de fallos puede definirse como la medición sistemática y análisis de tendencias de sus parámetros de diagnóstico, con el fin de evaluar su estado actual y predecir la probabilidad futura de fallos.

La relación entre mantenimiento predictivo, predicción de fallos y diagnóstico de fallos así como las acciones inmediatas a adoptar, las comprobaciones adicionales o incluso la modificación del plan de mantenimiento para evitar futuros fallos, se puede observar en la siguiente Figura 2.

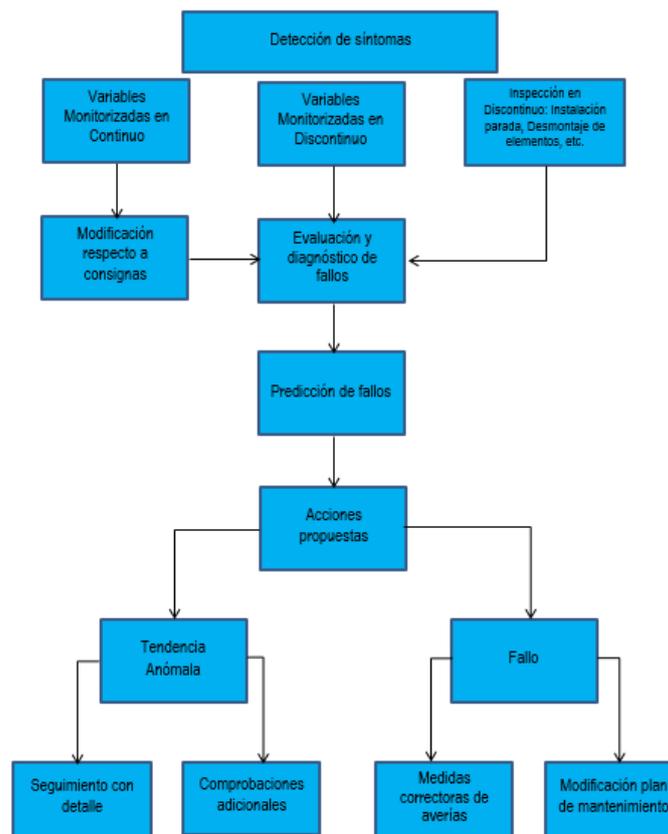


Fig. 2: Detección de síntomas, predicción de fallos y acciones propuestas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Planta de gasificación

La investigación fue realizada en la provincia de Valladolid- España en la planta de Nava del Rey propiedad de Cidaut, está diseñada para la investigación y desarrollo de tecnología del proceso de gasificación y aprovechamiento energético de diferentes tipos de biomasa (forestal y agrícola). El aprovechamiento a pequeña escala se realiza en lugares de producción de residuos biomásicos para la generación de calor y/o energía mecánica o eléctrica.

Como características principales de la instalación encontramos las siguientes:

- Potencia generada: 100 kWe y 100 - 200 kWt (nivel térmico)
- Producción energética anual: 800 MWhe (Sobre la base de 8000h/año)
- Consumo anual: 800-1000 Tm (en función a la humedad de la biomasa)
- Cuenta con un sistema de control para automatización completa
- Tiene un sistema integral de mantenimiento
- El sistema de gasificación consta de:
 - Gasificador de lecho fijo y de corrientes paralelas (Downdraft)
 - Sistema de agitación basado en parrilla giratoria refrigerada
 - Carga de biomasa automática con secado incorporado
- Sistema de acondicionamiento de gas pobre
 - Multiciclón para separación de partículas
 - Scrubber multietapa encargado de la refrigeración y separación de alquitranes

- Sistema de reintroducción de alquitranes en biomasa entrante
- Sistema de generación de energía eléctrica y térmica
 - Grupos motor-generator asíncrono con motores adaptados de automoción.
 - Control en lazo cerrado basado en sonda lambda
- Adaptación continua de carga requerida y composición del gas pobre

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar un buen diagnóstico del funcionamiento del motor a gas pobre es necesario establecer una correlación entre los fallos o anomalías y manifestaciones externas del estado del motor o del funcionamiento de sus componentes, es decir una correlación entre fallos y síntomas.

El proceso de diagnóstico requiere la detección e identificación de los síntomas originados por los fallos y por otro lado la identificación del fallo mediante una evaluación de dichos síntomas. La identificación de la relación causa efecto se conoce como correlación síntomas-fallos.

El monitorizado o supervisión de un sistema consiste en el seguimiento de su valor o de valores de parámetros asociados a los mismos. Este seguimiento puede hacerse en forma continua o discontinua. Para el caso del monitorizado continuo o permanente existen sensores acoplados recogiendo datos permanentemente del motor e instalación. El monitorizado puede ser del estado del motor o del funcionamiento.

La ventaja del monitorizado continuo es que permite localizar fallos que sólo se producen bajo determinadas condiciones de funcionamiento del motor, así como las averías intermitentes que se presentan sin causas aparentes. Este tipo de monitorizado se conoce como “performance monitoring”. A continuación se listan las variables de funcionamiento relacionadas con las averías y con la regulación de la instalación en conjunto, tal como pueden verse en la figura 3.

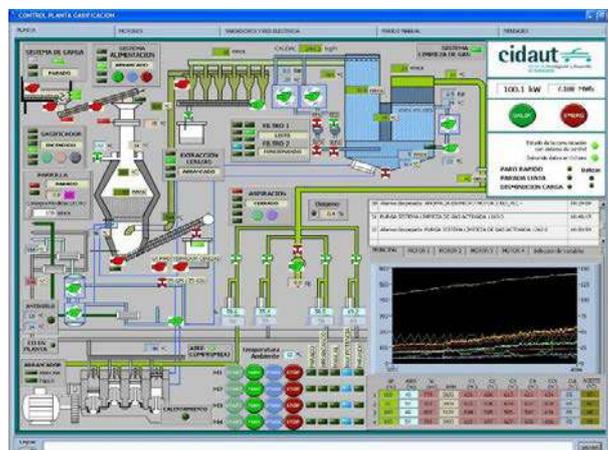


Figura 3. Pantalla de monitorización de la planta de gasificación en el punto nominal de funcionamiento

- Temperatura de refrigerante.- Depende de recomendación de fabricante por diseño del motor. Entre 82°C y 93°C
- Temperatura de lubricante.- Con el motor en condiciones de operación debe estar próxima a 100°C
- Temperaturas de escape.- En la pipa de escape de cada cilindro de cada motor y en el conducto común de escape, entorno a 600°C
- Temperaturas en el gasificador.- Varios puntos: válvula de alimentación de biomasa, parte superior del gasificador, gas pobre a la salida, agua de refrigeración de la parrilla.
- Presión del gasificador.- Se monitorizan las caídas de presión, ya que son manifestaciones de taponamientos o fugas.

- Composición del gas pobre producido.- Se monitoriza el contenido de O₂, el cual debe ser muy bajo para evitar una mezcla explosiva.
- Presión del líquido refrigerante.- No debe ser mayor de 1,5 bar. La monitorización controla la operatividad de termostatos, bomba, válvulas limitadoras de presión y conducciones.
- Presión del sistema de lubricación.- Como referencia en ralentí debe superar los 2 bar, a 2000 rpm 4,5 bar y máxima carga no sobrepasar los 6 bar.
- Sonda lambda a la salida de cada motor.- Se utiliza para regular en continuo la mezcla estequiométrica gas pobre/aire en cada motor, actuando sobre la correspondiente válvula de aire.
- Posición de válvulas de aire y de gas pobre.- Su posición es resultado de la actuación del sistema de control (dosado y potencia deseada) desde 0% (cerrada) hasta 100% (totalmente abierta).
- Niveles de fluidos, cenizas y biomasa.- Los correspondientes valores se utilizan como parte del sistema de regulación y para las alarmas de seguridad.

Para evaluar el estado del motor se hace un seguimiento de los cambios de las variables monitorizadas en continuo, así como del deterioro del estado de los componentes debido al desgaste, ensuciamiento, corrosión, etc. Se pueden ver más detalles en [4]. El conocimiento de los fallos más comunes de motores a gas de gasificación y de la planta es una constante recopilación de know-how acompañado de estudios e investigaciones tecnológicas. Así por ejemplo en [5] se listan los siguientes fallos típicos en motores a gas pobre:

1. Gripado entre pistón y camisa
2. Gripado del cigüeñal
3. Sobrepresión en el cárter
4. Detonaciones
5. Alta temperatura del agua de refrigeración
6. Baja presión de aceite del circuito de lubricación
7. Alta temperatura de aceite de lubricación
8. Altas vibraciones en cigüeñal
9. Altas vibraciones en turbocompresor
10. Fallos de encendido.
11. Bajo rendimiento (Mayor consumo de combustible)
12. Alta temperatura en cámaras de combustión
13. Corrosión interior
14. Fallos en equipos de control
15. Fallos en la alimentación a equipos de control

De estas anomalías se tratarán las más relevantes que son:

Culata y válvulas

El principal problema que puede tener un motor que trabaja a gas pobre es el de formación de depósitos de alquitrán en la parte interna del motor como es en la culata, los cuales se endurecen al condensar. Los fenoles se encuentran entre los principales componentes de alquitrán en el gas de gasificación. Altas cantidades de fenoles en el gas son sospechosos de causar la formación de depósitos en la cámara de combustión y por lo tanto aumentar el desgaste del motor.

La niebla de alquitrán y polvo forman un depósito como asfalto alrededor de los vástagos de las válvulas de admisión, generando adhesión entre los componentes. El pegado de válvulas es más un problema de los depósitos acumulados que del desgaste del motor. El problema de pegado de válvulas repercute en un cierre de válvula lento, reduciendo la alimentación del gas y hasta una pérdida de compresión del cilindro.

Los vástagos de válvula pueden presentar desgastes y eventualmente deformaciones. En el primer caso el límite lo marca la holgura existente con respecto a la guía de válvula, que de superarse, obliga a sustituir la válvula y según el caso también la guía. La deformación del vástago normalmente se produce por la colisión de la válvula con el pistón, situación posible en muchos motores cuando la distribución se desfasa accidentalmente un determinado número de grados [6]. Esta colisión de componentes móviles como es el pistón y las válvulas pueden también ocurrir en el encendido en frío de un motor a gas pobre, si las válvulas se encuentran pegadas.

Para evitar el pegado de los vástagos de las válvulas en sus guías cuando se realiza una parada programada de larga duración se recomienda depositar una pequeña cantidad de líquido disolvente en dichas partes. Además, antes de una puesta en marcha tras una parada prolongada y especialmente si no se aplicó líquido disolvente, se recomienda girar el motor manualmente para comprobar si las válvulas están pegadas.

Las válvulas pueden ser reacondicionadas o limpiadas, y el motor puesto en servicio sin serios daños en los anillos y cojinetes. Es decir el agarrotamiento de las válvulas de admisión puede ser corregida sin una revisión completa del motor. Sin embargo, cuando las válvulas se pegan es una señal clara de la necesidad de mejorar el sistema de limpieza, o rediseñar el gasificador para reducir la producción de alquitrán.

Aceite lubricante

En los motores a gasolina, los vapores que escapan de la combustión a través de las paredes del cilindro, tienden a reducir la viscosidad del lubricante con el tiempo. En el caso de motores a gas y en especial en el gas pobre, las fracciones volátiles de aceite de motor se evaporan, haciendo que el aceite se espese naturalmente. El aumento de viscosidad mejora la capacidad de lubricación del aceite, pero también aumenta las necesidades en el arranque.

En el caso de un gas sucio, se puede introducir partículas de alquitrán y sustancias corrosivas en el aceite a través de las fugas de gases de combustión entre cilindro y pistón. Las partículas en el aceite, ceniza y acumulación de carbón en el cárter pueden aumentar el desgaste del motor. Si existen partículas duras y más gruesas que la película de aceite, puede rayar superficies de apoyo. Sin embargo, partículas como las de carbón de leña y cenizas tienden a ser fácilmente aplastadas, pasando a ser partículas más pequeñas, reduciendo al mínimo este problema.

Si se produce formación de escorias de ceniza, las partículas son más abrasivas y podría causar un severo desgaste. En especial cenizas con pequeñas cantidades de sodio, que lleguen al aceite lubricante y al gas combustible puede provocar la corrosión de válvulas del motor. Es evidente que la eliminación de partículas es muy importante para la vida del motor. Es importante mantener la calidad y características del aceite, también realizar un diagnóstico de su estado, como se detalla en un apartado posterior.

Corrosión

La corrosión en los motores a gas pobre es causada por vapores alcalinos (Na, K y Ca) que suelen estar presentes en pequeñas cantidades. La corrosión en los cilindros aumenta el desgaste a bajas temperaturas de funcionamiento [7]. Por debajo de los 50°C, el desgaste del cilindro y del segmento aumenta rápidamente con el aumento de la condensación de agua y de productos de hidrólisis corrosivos debido al ácido carbónico. Por debajo de 85°C, el desgaste del cilindro y segmento depende del consumo y espesor de película de aceite. Por encima de 85°C el desgaste es mínimo e independiente del espesor de película de aceite. Cuando el motor está operando muy frío, se forma depósitos en los cilindros, los pistones, las válvulas y el escape. Esto se puede observar fácilmente en la parte interna del colector de escape. Algunos de estos depósitos son de la nitración del aceite.

Gripado entre pistón y camisa

El gripado es la avería que se produce cuando dos piezas que deslizan una sobre otra, una de ellas fija y otra móvil, se agarrotan o sueldan entre sí [5]. Esta avería es considerada una de las más graves del motor debido que significa la destrucción del motor. Sucede con poca frecuencia, debido que en la mayoría de casos es evitable con la realización de mantenimientos programado y con diagnóstico de las variables de funcionamiento. El gripado pistón-camisa puede tener origen a tres causas: Fallo en la lubricación, fallo en la refrigeración, desequilibrio de la biela.

Picado de biela

El picado de biela o knocking se produce por la autoinflamación de una porción separada de la mezcla que todavía no ha llegado la llama de la chispa del encendido. La característica propia de este proceso es la rápida combustión de una fracción importante de mezcla combustibles en el interior de cilindro, lo que produce un ruido característico y grandes pérdidas locales de caloríficas. El picado es uno de los fallos más comunes en los motores a gas pobre, las consecuencias de este fenómeno son en primer lugar una pérdida de potencia, seguida de la degradación acelerada del pistón, cilindro y válvulas.

Los factores que intervienen en esta anomalía son en primer lugar los cambios en la composición del gas pobre, que se traducen en una reducción de la velocidad de combustión laminar que provoca un alargamiento del proceso de combustión y propicia la autoinflamación de porciones de mezcla combustible. Otros factores que promueven la autoinflamación son las sobrecargas del motor y excesos de temperatura del aire de admisión, así como fallos de la instrumentación y los sensores.

Emisiones de gases contaminantes.

Un problema importante es que variación de las condiciones y composición del gas de gasificación que alimenta los motores, originada por la variación de la biomasa (humedad, tamaño de astillas, composición), los funcionamientos de las válvulas de carga (alimentación de biomasa, aire) y descarga (de cenizas, de char), así como la inestabilidad del lecho que se origina con la formación de bóvedas (con posibles caminos preferentes para que el aire alcance la salida de gases sin reaccionar) y la posible ruptura de las bóvedas (con aumento transitorio de volátiles o de partículas).

Este funcionamiento no estrictamente estacionario del gasificador y de sus sistemas asociados (alimentación de biomasa, extracción de cenizas, limpieza de gases) y de los propios sistemas de control de los motores (regulación de dosado por sonda lambda, temperatura de refrigerante y de lubricante) origina que el motor en su conjunto se vea sometido a variación de las condiciones, que se traduce en pequeñas variaciones de la potencia producida (debidas a la variación de poder calorífico y de velocidad de combustión), pero sobre todo en variaciones de las emisiones contaminantes gaseosas (NO_x, CO, HC).

Los sistemas de control de la planta de gasificación, en su conjunto: gasificador, limpieza, motor, generador eléctrico, deben ser capaces de identificar estas variaciones y actuar sobre las variables de funcionamiento para adaptarse a las condiciones variables con el tiempo y reducir sus efectos.

Un elemento de particular importancia para las emisiones de NO_x es la presencia de compuesto de nitrógeno en la biomasa, que se pueden detectar en forma de NH₃ en el gas de gasificación y que tienen un efecto directo sobre las citadas emisiones de NO_x.

Catalizador de oxidación.

Debido a las regulaciones de emisiones de cada país, es necesario desarrollar conceptos y tecnologías adecuadas que reduzcan las emisiones de CO. De acuerdo con la experiencia de la empresa Jenbacher [8], se han realizado pruebas iniciales con oxi-catalizadores para la reducción de CO pero en un tiempo relativamente corto se han deteriorado. La razón es siempre la misma, síntomas de envenenamiento del catalizador. Para algunas plantas el catalizador en el bypass tuvo una efectividad del 50 % después de aproximadamente 30 h. Un análisis final de la capa superficial del catalizador mostró no sólo venenos

catalíticos de plomo y zinc, también potasio, que junto con el calcio causa una vitrificación de la activa superficie.

El catalizador pierde efectividad si hay potasio en los gases de gasificación, por lo que se da mucha importancia a la presencia de K en el aceite lubricante, porque es un indicador de la capacidad del sistema de limpieza de gases (scrubber o similar) para eliminar el K pero también el resto de sustancias (partículas, Li, Na, etc.)

Problemas generales de la instalación

Condensación de líquidos con importante contenido en agua (especialmente por funcionamiento a temperaturas inferiores a las nominales, por ejemplo en los procesos de arranque y calentamiento). Estos condensados son fuertemente ácidos (bajo pH) y por ello corrosivos. Problemas en puntos bajos de conductos. Requiere un diseño cuidadoso de las geometrías y las inclinaciones de los conductos. Ejemplo: deterioro del catalizador de oxidación por condensados en escape del motor.

Deposición de partículas y condensación de alquitranes, tanto en condiciones nominales como por temperaturas inferiores. Problema que puede presentarse en cualquier punto donde la temperatura o la velocidad del flujo se reduzcan: válvulas, ensanchamientos, filtros, intercambiadores, Intercambiador de calor para aprovechamiento térmico, los problemas de condensados ácidos se agudizan en este elemento, sobre todo con bajas temperaturas de los gases o del fluido secundario.

4. CONCLUSIONES

El uso de la biomasa como recurso energético es de gran importancia por ser renovable y contribuir al desarrollo socioeconómico. La energía producida con biomasa puede ser usada para calefacción y producción de agua caliente, calor para procesos industriales y generación eléctrica. Para pequeñas potencias eléctricas (del orden de 100 kW), la mejor opción es la gasificación con aire seguida de combustión del gas pobre en motores de combustión interna. Las desventajas de la inversión por unidad de potencia y el rendimiento de una planta de gasificación son minimizadas al aplicar un correcto control y monitorizado de funcionamiento de la planta y de motores de combustión interna.

Las condiciones de operación, el mantenimiento, las anomalías, y en consecuencia el sistema de monitorizado que tiene el motor de combustión a gas pobre dependen directamente de la tecnología de gasificación usada y de la biomasa procesada.

En el monitorizado del estado del motor Condition Monitoring se hace una evaluación de cambios de las variables monitorizadas en continuo y del deterioro del estado de los componentes debido al desgaste, ensuciamiento, corrosión, etc.

La ventaja de monitorizado continuo es que permite localizar fallos que sólo se producen bajo determinadas condiciones de funcionamiento del motor, así como las averías intermitentes que se presentan sin causas aparentes.

Las variables monitorizadas en discontinuo requieren de una inspección y análisis del componente extraído del motor, es especial el análisis del estado del lubricante y su directa relación con el estado del motor.

El principal problema que puede tener un motor que trabaja a gas pobre es el de formación de depósitos de alquitrán en la parte interna del motor como es en la culata, los cuales se endurecen al condensar.

En motores con gas pobre limpio, las fracciones volátiles de aceite de motor se evaporan, haciendo que el aceite se espese naturalmente. El aumento de viscosidad mejora la capacidad de lubricación del aceite, pero también aumenta las necesidades en el arranque.

REFERENCIAS

1. Tinaut, F.V., Melgar, A., Horrillo, A., Diez, A. Method for predicting the performance of an internal combustion engine fuelled by producer gas and other low heating value gases, *Fuel Processing Technology, Elsevier*, 87, pp. 135-142, 2006.
2. Basu, P., *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Capt. 4. *Elsevier*, 2010.
3. Figueroa, S. *Diagnóstico del desgaste y el estado de MEC*. Universidad Politécnica de Valencia. 1994.
4. Lucero, J.C. *Diagnóstico y monitorizado del funcionamiento de motores de combustión alimentados con gas pobre*. Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Automoción. Universidad de Valladolid, 2014.
5. Renovetec. Motores de gas: Principales averías. *Energiza*. Año 1, junio, pp. 5-15, 2011.
6. Villar, A.S. *Motores Mantenimiento de Vehículos Autopropulsados*. Madrid: Thomson Paraninfo. 2007.
7. SERI. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Capt. 11. Colorado. 1988.
8. Herdin, G., Robitschko, R., Klausner, J., Wagner, M. *GEJ Experience with Wood Gas Plants*. GE Jenbacher, 2003.

Efecto de la extracción de azufre empleando tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM] [BF₄] en las propiedades de la gasolina comercial

(Effect of sulfur extraction using 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate [BMIM] [BF₄] on the properties of commercial gasoline)

Cristian Valenzuela ⁽¹⁾, Liliana Guzmán-Beckmann ⁽²⁾, Marco Singaña ⁽¹⁾, Catherine Donoso ^{(1)*}

(1) Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Av. General. Rumiñahui s/n, Sangolquí, P. O. Box 171-5-231B, Ecuador.

(2) Departamento de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional

(3)

*Correspondencia. Tel.: 0998504076, E-mail: iq.donosoc@gmail.com (C, Donoso)

RESUMEN

Los procesos de eliminación de azufre de los derivados del crudo son indispensables en la etapa de refinación, por tanto es importante conocer si los diversos tratamientos modifican las propiedades físico-químicas de los combustibles. En el presente trabajo se pretende estudiar los efectos del líquido iónico tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM] [BF₄] como un solvente verde en la desulfuración extractiva de gasolina extra comercializada en el Ecuador. Para la evaluación se somete la muestra a una desulfuración extractiva, controlando la temperatura (25 y 35 °C), relación másica alimentación/solvente (3:1 y 1:1) y el número de etapas de extracción (1 y 3 etapas), obteniéndose como máximo una eficiencia de remoción de azufre del 40%. Los valores bajos de solubilidad de la gasolina en el IL, la determinación de la densidad y el poder calórico superior de la gasolina desulfurada indican que conserva sus propiedades después de la extracción. Un análisis de la factibilidad económica y ambiental de su implementación industrial también fue tratado

Palabras clave: gasolina, líquido iónico [BMIM] [BF₄], desulfuración extractiva, solubilidad

ABSTRACT

Sulphur removal processes from crude derivatives are indispensable in the refining stage, so it is important to know if the various treatments modify the physical-chemical properties of fuels. In the present work we intend to study the effects of the ionic liquid tetrafluoroborate of 1-butyl-3-methylimidazolium [BMIM] [BF₄] as a green solvent in the extractive desulphurization of extra gasoline commercialized in Ecuador. For the evaluation, the sample is subjected to an extractive desulphurization, controlling the temperature (25 and 35 °C), feed/solvent mass ratio (3:1 and 1:1) and the number of extraction stages (1 and 3 stages), obtaining a maximum sulphur removal efficiency of 40%. The low solubility values of gasoline in the IL, the determination of density and the superior caloric power of desulfurized gasoline indicate that it retains its properties after extraction. An analysis of the economic and environmental feasibility of its industrial implementation was also discussed.

Key words: gasoline, ionic liquid [BMIM] [BF₄], extractive desulphurization, solubility.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de compuestos que contienen azufre y nitrógeno desactivan los catalizadores en los procesos de refinación de crudo (1), por ello, en las últimas décadas se ha estudiado intensamente la desulfuración extractiva (EDS) utilizando líquidos iónicos como disolvente, los resultados de la investigación indican un buen futuro para la EDS como una posible alternativa o complemento a la hidrosulfuración convencional (HDS), debido a que este método opera en condiciones suaves y simples, sin alterar la estructura química de los compuestos en aceites combustibles (2). La posibilidad de regeneración y reciclaje de los líquidos iónicos (IL) para la extracción ha demostrado su potencial aplicación para la comercialización por lo que siguen siendo una clase de solventes ideales para obtener combustible líquido limpio.

La solubilidad mutua entre el IL basado en imidazolio y el combustible es un factor importante a considerar cuando se elige un solvente en un proceso de desulfuración extractiva debido a que valores altos de solubilidad mutua tiene dos influencias potenciales sobre el combustible. De acuerdo a (3) y (4), por un lado, la solubilidad del IL en la gasolina puede dar lugar a una contaminación por NOx mientras se intenta eliminar el SOx; por otro lado, la solubilidad de la gasolina en el IL conlleva a un probable cambio en la composición de la gasolina a causa de la extracción selectiva de algunos componentes específicos y por ende varía la calidad del combustible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

El líquido iónico tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM] [BF₄] (>98%) fue importado de Sigma-Aldrich, mientras que la gasolina fue muestreada de diferentes provincias del Ecuador a fin de obtener una muestra compuesta.

2.2. Diseño experimental

La desulfuración extractiva de los combustibles se investigó por medio de la variación de tres factores: la temperatura (X1, °C), la relación másica gasolina/IL (X2) y el número de etapas de extracción (X3). Cada variable en dos niveles de máximo y mínimo (25 y 35 °C), (1:1 y 3:1), (1 y 3) respectivamente, elegidos de acuerdo a experimentos preliminares y revisiones bibliográficas. El diseño experimental es de tipo factorial 2³ con una repetición.

2.3. Solubilidad de la gasolina en el líquido iónico

El método gravimétrico utilizado para determinar la solubilidad de la gasolina en el IL fue el siguiente. Primero, se mezcló una proporción de IL y gasolina, para esto se añadió la gasolina gravimétricamente de acuerdo a la diferencia de masa entre el matraz vacío y el líquido iónico añadido, a fin de cumplir con la proporción másica definida entre 1:1 y 3:1, la temperatura se mantiene constante en 25°C y 35°C, la agitación magnética a 1000 rpm se realizó a una hora y la decantación durante 24 horas para asegurar una separación completa de las fases. En segundo lugar, la gasolina desulfurada de la fase de refinado se separó cuidadosamente con una pipeta Pasteur de la fase del extracto; finalmente, el matraz y el IL saturado se pesaron en una balanza con una precisión de 0.001. La solubilidad fue definida a una relación másica de uno entre gasolina y el IL a las temperaturas de 25, 30, 35 y 40°C. Para cada prueba hubo una repetición y el resultado fue el promedio de los dos experimentos; la solubilidad de la gasolina en el IL se calculó en porcentaje másico registrando la diferencia de masa de una cierta cantidad de IL saturada antes y después de la desulfuración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis ANOVA para el diseño factorial

Los tratamientos y las repeticiones experimentales del diseño factorial 2^3 con una réplica se realizaron de forma aleatoria. Los parámetros más significativos en el proceso por lotes de desulfuración extractiva con líquido iónico y su interacción en la respuesta (contenido de azufre en el refinado) se determinaron mediante un análisis de varianza, según se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del ANOVA para el diseño factorial propuesto en la desulfuración extractiva de la gasolina.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	26758	3822.6	13.86	0.001
Lineal	3	22379	7459.7	27.06	0
Temperatura (X₁)	1	152.4	152.4	0.55	0.478
Relación Gas/IL (X₂)	1	14708.8	14708.8	53.35	0
Nº etapas (X₃)	1	7517.8	7517.8	27.27	0.001
Interacciones de 2 términos	3	3297.9	1099.3	3.99	0.052
X₁X₂	1	474.6	474.6	1.72	0.226
X₁X₃	1	504.5	504.5	1.83	0.213
X₂X₃	1	2318.9	2318.9	8.41	0.02
Interacciones de 3 términos	1	1081.1	1081.1	3.92	0.083
X₁X₂X₃	1	1081.1	1081.1	3.92	0.083
Error	8	2205.8	275.7		
Total	15	28963.8			

El análisis de varianza del diseño mostró que dos parámetros fueron estadísticamente significativos para la respuesta del proceso: el número de etapas (X₃) y la relación gasolina/IL (X₂) siendo esta última la más efectiva, mientras que la interacción de estos mismos factores también fueron significantes. El otro factor, es decir, la temperatura de extracción (X₁) posee un efecto en la desulfuración extractiva con IL muy limitado, corroborando la información presentada por (5). Por otro lado, el valor F de $13.86 > F_{\text{crítico}}$ implica que el modelo de tres interacciones es significativo y su R^2 igual a 0.93, muestra que el modelo ajustado es aceptable.

Al diseño factorial se aplicó un optimizador de respuesta mediante la función “response desirability profiling” por medio de un software estadístico, para identificar la mejor combinación de valores predictores que minimicen la operación de desulfuración, como se muestra en la Fig. 1. El valor confirmado mediante el contenido de azufre en el refinado experimental a las mismas condiciones, la cual fue de 194.54 ppm conlleva a un error del 4.81% con respecto al valor predicho, comprobándose una vez más la validez del modelo, según se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de los parámetros optimizados aplicados a la desulfuración extractiva de gasolina con [BMIM][BF₄]

Parámetro	Valor
Temperatura	35 °C
Relación Gasolina/IL	1:1 m/m
Nº Etapas	3
S Total (Pronosticada)	204.37 ppm
S Total (Experimental)	194.54 ppm
Error	4.81%

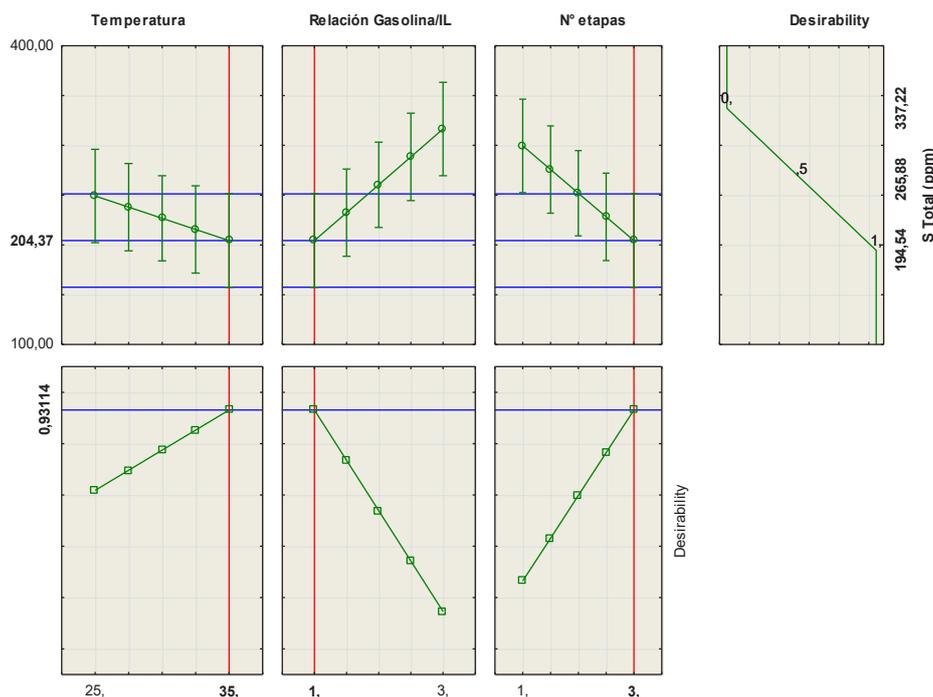


Figura 1. Perfiles de respuesta predictores de cada factor en la optimización del modelo ajustado.
Fuente: Statistica

3.2. Evaluación de las propiedades de la gasolina

La solubilidad de la gasolina en el [BMIM] [BF₄] determinados a diferentes temperaturas pero una misma relación másica de gasolina/IL de 1:1, se encuentran graficados en una curva de solubilidad a dichas condiciones, según se observa en la Fig. 2 y fueron calculados de la siguiente manera:

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{m_{\text{extr}} - m_{\text{IL}}}{m_{\text{extr}}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde m_{IL} es la masa en gramos del IL añadido y m_{extr} es la masa en gramos de la fase del extracto medido después de separar totalmente la fase del refinado.

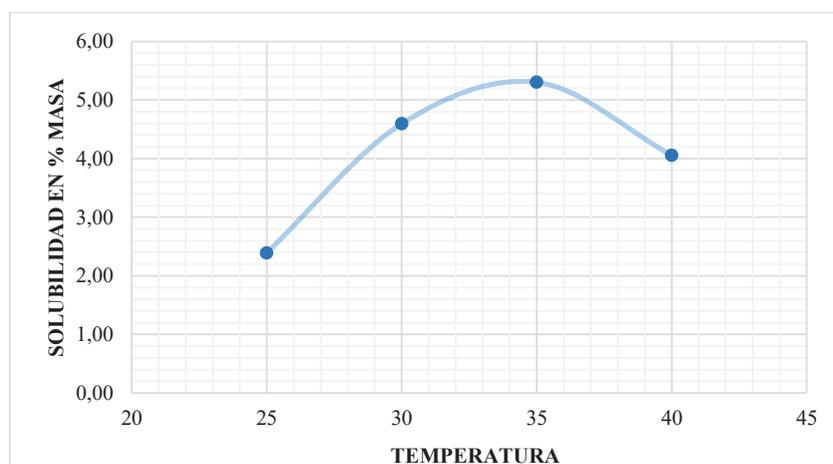


Figura 2. Curva de solubilidad de la gasolina en [BMIM] [BF₄] a una relación másica 1:1

La más baja solubilidad de la gasolina en [BMIM] [BF₄] obtenida fue de 2.39% en masa, a una temperatura de 25 °C, la misma que está relativamente cercano a valores de solubilidad de la gasolina en ILs bajo las mismas condiciones, donde (6) y (4) reportan un 1.12% para el [MMIM][DMP] y 1.97% para el [OPy][BF₄] respectivamente, y además, son mucho menores a otras solubilidades a 25 °C encontradas en literatura para diferentes IL tales como [BMIM] [N(CN)₂] y [EMIM][N(CN)₂] de 6.66 y 5.64% respectivamente reportado por (3) y de 20.6% para el [BMIM][DBP], reportado por (6). La curva de solubilidad de la gasolina en [BMIM] [BF₄] nos indica que, la solubilidad se incrementa conforme aumenta la temperatura de extracción hasta los 35 °C a una solubilidad de 5.3%, a partir de la cual disminuye conforme se aumenta la temperatura, sugiriendo que una mayor extracción de compuestos aromáticos, no necesariamente sulfurados, se obtendrá a los 35 °C. Esta disminución en la solubilidad a partir los 35 °C puede explicarse debido a la disminución del volumen de la gasolina por evaporación de los compuestos más volátiles al aumentar la temperatura de extracción, lo que produce la disminución de solutos a extraerse por el IL o debido a la degradación del IL.

Otra de las propiedades evaluadas fue la densidad de la gasolina desulfurada que a pesar que está por debajo del valor alimentado, aún sigue dentro de los rangos típicos de densidad para la gasolina de 0.720 a 0.740 g cm⁻³ de acuerdo a (7). Adicionalmente, para (8) esta propiedad tiene una importancia limitada como indicador de calidad del combustible, a menos que esté relacionado con otras propiedades del combustible tales como la gravedad API y el calor de combustión o valor calorífico superior (HHV, higher heating value), que pueden ser correlacionados matemáticamente por las siguientes ecuaciones 2 y 3 respectivamente, presentadas a continuación (9), mientras que los valores de estas propiedades antes y después de la desulfuración son presentadas en la Tabla 3.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{s.g.}} - 131.5 \quad (2)$$

$$\text{HHV} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{KJ}} \right) = 42612 + 93(^{\circ}\text{API} - 10) \quad (3)$$

Tabla 3. Propiedades calculadas para la gasolina antes y después de la desulfuración extractiva.

Propiedad	Antes desulfuración	Después desulfuración
Densidad (g cm ⁻³)	0.7356	0.731
Gravedad específica	0.7356	0.731
°API	60.86	62.07
HHV (MJ Kg ⁻¹)	47.34	47.45

El HHV de la gasolina inicial fue de 47.34 MJ Kg⁻¹, mientras que la gasolina desulfurada presenta un valor de 47.45 MJ Kg⁻¹, las cuales son valores caloríficos aproximados al HHV de 47.3 MJ Kg⁻¹ presentado en bibliografía para muestras de gasolina presentadas por (7). Con la disminución de la densidad de la gasolina, el valor calorífico estimado aumentó ligeramente. Esto se debe a que, en términos de peso, la proporción de carbono/hidrógeno (C/H) aumenta a medida que aumenta la gravedad específica y por ende, HHV disminuye (8), en otras palabras, el aumento de HHV en la gasolina desulfurada se debe a que la desulfuración extractiva es selectiva para compuestos aromáticos por lo que, su composición en cuanto a la relación C/H disminuye por deficiencia en aromáticos y presencia de compuestos de menor relación C/H tales como parafinas y naftenos no extraídos (7).

3.3. Análisis de la factibilidad económica

Un análisis de factibilidad económica es necesario para evaluar si el método propuesto puede ser implementado a una desulfuración de combustibles a escala industrial y presentado en la Tabla 4. Para ello, en este trabajo se calculó costo total unitario de producción de una gasolina desulfurada para cada uno de los tratamientos del diseño factorial ejecutada, tomando en cuenta una operación industrial automatizada.

Tabla 4. Costo total unitario de gasolina desulfurada por tratamiento del diseño factorial.

Temp. (°C)	Gas/IL	N° etapas	%Eficiencia	CTU (USD/Kg)	CTU (USD/gal)
25	1	1	16.22	2681.3	7466.4
35	1	1	13.15	2680.93	7465.2
25	3	1	4.01	893.91	2489.1
35	3	1	4.15	892.91	2486.4
25	1	3	27.75	8005.47	22291.6
35	1	3	40.73	7998.26	22271.6
25	3	3	11.11	2642.33	7357.7
35	3	3	8.23	2680.59	7464.2

El costo de producción más bajo de gasolina desulfurada es de 7357.7 dólares por galón de gasolina (USD/galón) con una eficiencia de desulfuración de 11.11% a condiciones de 25 °C, relación másica gasolina/IL 3:1 y tres etapas de extracción que sin embargo, no es la mejor condición encontrada durante la optimización del diseño experimental de 35 °C, relación másica gasolina/IL 1:1 y tres etapas de extracción, condicional a la cual se obtiene una eficiencia del 40.73% a un costo de 22271.6 USD/galón de gasolina, a pesar de que, el costo más alto es de 22291.6 USD/galón de gasolina a una eficiencia del 27.75%.

Los costos de producción presentados en la Tabla 4 tienen precios realmente elevados en comparación a los encontrados en bibliografía: 3 centavos por galón de gasolina (ctvs/galón) a una eficiencia de 33.33% por el método de desulfuración convencional (10); 9 ctvs/galón de gasolina por HDS, 27 ctvs/galón por extracción liquido-liquido más destilación, 11 ctvs/galón por adsorción más destilación y 4 ctvs/galón por desulfuración oxidativa con ultrasonido, todos los métodos a una eficiencia del 84% (11). A pesar de los bajos costos de energía de la operación, los altos precios del [BMIM] [BF₄] y de los ILs en general son elevados, lo que produce costos altos de producción.

Para una extracción liquido-liquido, el reúso y la regeneración del solvente, en especial de los líquidos iónicos, es de vital importancia en aspectos económicos y ambientales. El análisis económico del proceso de reúso del [BMIM] [BF₄] no se realizó debido a la deficiente remoción de azufre. Por otro lado, el análisis de factibilidad económica para el proceso de regeneración y reciclaje del solvente son detalladas en la Tabla 5 (12).

Tabla 5. Costo total unitario de gasolina desulfurada por ciclo de regeneración.

Ciclos de Regeneración	% Eficiencia	Costo Regeneración USD/Kg IL	Costo Total de Desulfuración USD/galón
0	14.72	0	7466.45
1	13.33	2.455	8.52
2	13.09	2.609	8.95
3	9.15	2.713	9.29
4	6.15	2.868	9.72
5	14.18	36.592	103.93
6	14.10	37.542	106.32

La Tabla 5 muestra que existe una disminución considerable de hasta un 99.89% en el costo total de desulfuración de gasolina empleando IL regenerado, considerando que el costo total abarca los costos de regeneración más desulfuración extractiva. Los costos de regeneración y desulfuración aumentan conforme el número de ciclos de regeneración debido a las pérdidas de masa que existe durante el proceso, propias de la operación. Los mejores costos de operación de 8.52 y 8.95 USD/galón de gasolina van acorde a las mejores eficiencias de desulfuración de 13.33 y 13.09% respectivamente, conforme a los dos ciclos de regeneración con lavados con agua a las que se concluyó existe factibilidad técnica. Además, se puede apreciar en la misma Tabla 5 para los ciclos 5 y 6, los costos de regeneración con éter dietílico como solvente de re-extracción, así como sus respectivos costos de desulfuración, los cuales, a pesar de que tienen un costo superior a los costos de regeneración con agua, disminuyen en aproximadamente un 98.6% con relación al proceso de desulfuración sin IL regenerado; adicionalmente poseen una mejor eficiencia en desulfuración de 14.1%. Estos datos económicos avalan la factibilidad técnica de un proceso de regeneración del [BMIM] [BF₄] saturado con éter dietílico por cada dos ciclos de regeneración con agua.

3.4. Análisis de la factibilidad ambiental

En la actualidad, uno de los aspectos más importantes es la implementación de procesos amigables con el medio ambiente, es por este motivo que resulta indispensable un análisis de la factibilidad ambiental de la desulfuración extractiva con líquidos iónicos como solventes de extracción, en especial del [BMIM] [BF₄]. Para ello se realizó una comparación de la información ecológica de las MSDS de los principales solventes orgánicos propuestos para una desulfuración extractiva versus el IL empleado en esta investigación. Estos solventes fueron: [BMIM] [BF₄], acetonitrilo, furfural, n,n-dimetilacetamida, n,n-dimetilformamida y sulfolano.

De acuerdo a la información recopilada, el [BMIM] [BF₄] no presenta riesgos de toxicidad en especies acuáticas tales como peces, dafnias y otros invertebrados acuáticos en comparación a los otros solventes convencionales. En cuanto a persistencia y degradabilidad, la N, N-Dimetilacetamida posee el mayor tiempo de degradabilidad. Los demás solventes son fácilmente biodegradables. Al igual que los solventes convencionales el IL [BMIM] [BF₄] no presenta riesgo de bioacumulación. A pesar de todas las ventajas antes mencionadas, se recomienda evitar la descarga del IL en el ambiente.

Finalmente, al utilizar los líquidos iónicos que contienen átomos de halógeno tales como los aniones [BF₄] y [PF₆], se forman fácilmente humos blancos de HF o precipitados de hidrato, lo que conduce a problemas medioambientales. Es por ello que se evaluó cualitativamente mediante observación, la ausencia de estos humos blanquecinos después del proceso de regeneración con agua. Los resultados son presentados en la Tabla 6 (12).

Tabla 6. Evaluación de la formación de HF por formación de humos blancos después del proceso de regeneración

Mezcla	Descripción	Foto
IL puro	Transparente Sin presencia de humos	
IL + H ₂ O	Transparente Sin presencia de humos	

IL + compuestos extraídos

Amarillento
Sin presencia de humosIL + compuestos extraídos + H₂OAmarillento oscuro
Sin presencia de humos

Por visualización de las imágenes de la Tabla 6, la regeneración del [BMIM] [BF₄] a 60 mbar y 115 °C no producen la formación de humos blancos o precipitados que indiquen la presencia de la hidrólisis del HF, aunque se aprecia un cambio en color del IL regenerado cuando este contiene los compuestos extraídos, lo que significa que el IL contiene trazas de impurezas descompuestas debido las altas condiciones a las que fue sometido.

4. CONCLUSIONES

El diseño factorial completo 2³ con una réplica demostró que los parámetros más significativos en el proceso por lotes de desulfuración extractiva de la gasolina son la relación gasolina/líquido iónico y número de etapas, mientras que temperatura a pesar de no ser significativa, un aumento de este parámetro, disminuye la concentración de azufre en el refinado.

La densidad de la gasolina a una temperatura de 20 °C (0.7356 g.cm⁻³) disminuye después del proceso de extracción (0.731 g cm⁻³) pero aún está dentro de los rangos típicos de densidad para la gasolina de 0.720 a 0.740 g cm⁻³. Con la disminución de la densidad de la gasolina, el valor calorífico aumenta ligeramente de 47.34 a 47.45 MJ kg⁻¹, valor calorífico aproximado al HHV de 47.3 MJ kg⁻¹ presentado en bibliografía, demostrando que esta propiedad no se ve afectada por la desulfuración extractiva con [BMIM] [BF₄].

Las solubilidad de la gasolina en [BMIM] [BF₄] a una relación másica gasolina/IL de 1:1 y temperatura de 25°C fue del 2.39% en masa, e incrementa conforme aumenta la temperatura de extracción hasta los 35°C a una solubilidad de 5.3%, los mismos que son valores bajos de solubilidad de la gasolina en ILs, según revisión bibliográfica. Lo que conlleva a una menor pérdida en la cantidad de combustible y por ende a un mejor rendimiento.

El menor costo de producción de gasolina desulfurada es de 73577 dólares por galón de gasolina (USD/galón) con una eficiencia de desulfuración de 11.11% a condiciones de 25°C, una relación másica gasolina/IL de 3:1 y tres etapas de extracción, sin embargo, con una eficiencia del 40.73% correspondiente a la mejores condiciones encontradas durante el diseño experimental, se obtiene un costo de 22271.6 USD/galón de gasolina. A pesar de ello, estos costos tienen precios realmente elevados en comparación a los encontrados en bibliografía debido a los altos precios del [BMIM] [BF₄], lo que produce costos elevados de producción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Politécnica Nacional por las facilidades prestadas para el análisis de azufre de la gasolina en el Laboratorio de Petróleos de la Facultad de Ingeniería Química.

REFERENCIAS

1. Meyers, R. Manual de Procesos de Refinación de Petróleo (3a ed.). Colombia: The McGraw-Hill Interamericana Editores; 2004.
2. Abro, R., Abdeltawab, A. A., Al-Deyab, S. S., Yu, G., Qazi, A. B., Gao, S., et al. 2014. A review of extractive desulfurization of fuel oils using ionic liquids. *Rsc Advances*. 4: 35302-35317.
3. Asumana C., Haque R., Yu L., Wu X., Chen X. 2013. Desulfurization of Real Fuel Oils by Extraction with Ionic Liquids Desulfurization of Real Fuel Oils by Extraction with Ionic Liquids. *Sep. Sci. Technol.* 48:2582–2588.
4. Gao H., Guo C., Xing J., Liu H.. 2012. Deep Desulfurization of Diesel Oil with Extraction Using Pyridinium-Based Ionic Liquids Deep Desulfurization of Diesel Oil with Extraction Using Pyridinium-Based Ionic Liquids. *Sep. Sci. Technol.* 47: 325–330.
5. Nejad, N. F., & Beigi, A. M. 2015. Efficient desulfurization of gasoline fuel using ionic liquid extraction as a complementary process to adsorptive desulfurization. *Petroleum Science*. 12: 330-339.
6. Nie Y., Li C., Sun A., Meng H., Wang Z.. 2006. Extractive Desulfurization of Gasoline Using Imidazolium-Based Phosphoric Ionic Liquids. *Energy Fuels*. 20: 2083–2087.
7. Demirbas, A., & Al-Ghamdi, K. 2015. Relationships between specific gravities and higher heating values of petroleum components. *Petroleum Science and Technology*. 33: 732-740.
8. Gildo, P. J., Dugos, N., Roces, S., & Wan, M. W. 2018. Optimized ultrasound-assisted oxidative desulfurization process of simulated fuels over activated carbon-supported phosphotungstic acid. 156: 03045.
9. Annamalai, K., Puri, I. K. Combustion science and engineering. CRC press; 2006.
10. McFarland, B. L., Boron, D. J., Deever, W., Meyer, J. A., Johnson, A. R., & Atlas, R. M. 1998. Biocatalytic sulfur removal from fuels: applicability for producing low sulfur gasoline. *Critical reviews in microbiology*. 24: 99-147.
11. Anderson, K., Atkins, M. P., Borges, P., Chan, Z. P., Rafeen, M. S., Sebran, N. H., et al. 2017. Economic analysis of ultrasound-assisted oxidative desulfurization. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12: 305-311.
12. Valenzuela Chanatasig C. Extracción de azufre de la gasolina comercializada en el Ecuador con tetrafluoroborato de 1-Butil-3-Metilimidazolio [BMIM][BF₄] como solvente de extracción [tesis pregrado]. Latacunga: ESPE-L; 2018.

Recuperación de thinner de los procesos de pintura automotriz por medio de un tanque destilador

Recovery of thinner from automotive paint processes by means of a distiller tank

O. Arteaga Mazón ⁽¹⁾; *M. Quinga Morales⁽¹⁾; M. Ramos Flores ⁽¹⁾

(1) Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador

*Correspondencia. Tel.: 0982159334, E-mail: olga.arteaga@esPOCH.edu.ec (O. Arteaga)

RESUMEN

La siguiente revisión bibliográfica presenta el proceso de recuperación del thinner (percloroetileno) por medio del proceso de destilación utilizando un tanque de ebullición, con el fin de aprovechar al máximo esta materia prima que es usada en la mezcla de la formación de la pintura. El ahorro de esta sustancia da como el resultado un mejor cuidado sobre el medio ambiente que rodea a las industrias que trabajan con la misma, así como beneficios económicos al poder ahorrar presupuesto en la compra de una gran cantidad materia prima que será al final desechada en parte. El avance tecnológico de la industria en sus procesos y el aprovechamiento óptimo de los recursos que utilizan para cumplir sus cometidos impulsan esta necesidad de estar reciclando cualquier material o sustancia que es usada en sus diversos procesos. Los beneficios económicos sobre las utilidades de una empresa dedicada a esta actividad se pueden ver aumentada debido al ahorro económico en materias primas lo que significa un crecimiento a largo plazo que beneficiaría no solo a las altas esferas jerárquicas sino a los trabajadores de bajo nivel. El aporte es entonces tanto en el área económica de una industria, así como en el área de preservación del medio ambiente, ambas cada vez más exigentes en el mundo de la producción industrial y de servicios.

Palabras clave: destilar, thinner, percloroetileno, ebullición, reciclaje.

ABSTRACT

The following bibliographic review presents the recovery process of the thinner (perchloroethylene) by means of the distillation process using a boiling tank, in order to make the most of this raw material that is used in the mixture of paint formation. The saving of this substance gives as a result a better care about the environment that surrounds the industries that work with it as well as economic benefits to be able to save budget in the purchase of a large amount raw material that will be ultimately discarded in part. The technological advance of the industry in its processes and the optimal use of the resources they use to fulfill their tasks promote this need to be recycling any material or substance that is used in its various processes. The economic benefits on the profits of a company dedicated to this activity can be increased due to the economic savings in raw materials which means a long-term growth that would benefit not only the upper echelons but also the low-level workers. The contribution is then both in the economic area of an industry as well as in the area of preservation of the environment, both increasingly demanding in the world of industrial production and services.

Key words: distill, thinner, perchlorethylene, boiling, recycling

1. INTRODUCCIÓN

El uso de percloroetileno (thinner) en diversas industrias, y de manera específica en la industria automotriz en el área de pintura, es de un gran uso debido a su capacidad como diluyente, dándole ciertas características a la pintura usada en automóviles de tal manera que cumpla su función de manera óptima. Esto permite también el ahorro de la sustancia principal para la mezcla de la pintura, siendo así el percloroetileno una sustancia importante para la labor de pintura de un automóvil. [2]

Estas sustancias como el percloroetileno tienen características volátiles, lo cual significan en la propagación de gases procedentes de las mismas las cuales pueden causar efectos nocivos sobre la salud de los seres humanos. Siendo así necesario el uso de mascarillas para la protección contra tales gases. También los residuos que quedan del proceso de pintado sobre los vehículos pueden llegar a generar los mismos gases (o peores) que serán liberados en el ambiente con sus respectivos efectos sobre el medio ambiente y de este a seres humanos que vivan cerca a estas industrias. [8]

De la importancia del percloroetileno y del efecto que produce los residuos del proceso de pintura en la industria automotriz surge la necesidad de buscar la manera de tanto eliminar o aprovechar dichos residuos, así como poder reutilizar el thinner que está presente en los restos de pintura que se desperdició en un proceso de pintado.[1]

El proceso para la recuperación de esta sustancia de procesos industriales es por medio de la operación de la destilación, la cual permite la separación de dos elementos (binarios) o más (multicomponentes), a partir de un equilibrio de estados líquido – vapor. La separación por destilación se logra aprovechando sus distintas volatilidades. [3]

Con tal conocimiento se ha creado maquinas que puedan realizar el proceso de destilación adecuado para lograr la recuperación del percloroetileno en los procesos de pintado, esto a través del proceso de destilación simple, la cual está en relación de los distintos grados de ebullición de los elementos que conforman el compuesto para pintar. [4] Para lo cual igual se necesitan las instalaciones adecuadas para que la maquina pueda cumplir con su fin de manera efectiva y no cause efectos secundarios sobre la producción de la industria o afecte la salud de los trabajadores que es uno de los fines que igual se buscan.

Importancia del problema

El avance de la industria a lo largo de los años se ha debido a una optimización en la producción y en el uso de las materias primas que se ha de utilizar para un proceso, por lo cual el desperdicio de cualquier material al final de cualquier proceso de producción ya no es visto meramente como un residuo sino como un costo económico para la empresa [5]. El control cada vez mayor sobre cada etapa de la producción, una cada vez mejor organización en el área de bodegas y almacenaje ha dado una consciencia a las industrias de valorar toda materia prima o material usado en una producción. Donde el ahorro de estos materiales constituye el ahorro económico para la empresa que vista a largo plazo se puede tomar en cuenta como un beneficio para la misma.

El avance una conciencia social y publica respecto al calentamiento global y la contaminación mundial por parte de las industrias, dio lugar también a la necesidad de causar el mínimo impacto sobre el medio ambiente. Desde este punto de vista, tomando en cuenta los materiales que por lo general son usados en

la industria automotriz para el área de pintura, el desperdicio o generación de residuos de los materiales usados para pintar significan futuros daños sobre el medio ambiente pues por lo general estos subproductos no son despachados de manera adecuada sino en los cauces de ríos, alcantarillados, etc. Donde con el tiempo terminaran afectado a la fauna y flora que los rodee o peor aún a la vida humana. [6]

Ambos factores dichos anteriormente pueden ser resueltos por medio de la reutilización de los residuos del proceso de pintado de automóviles, esto por medio de máquinas adecuadas que permitan realizar un destilado sobre los residuos con el fin de separar el thinner, una de las materias primas usadas para la mezcla y preparación de las pinturas. De este modo el desperdicio de materias primas se ve reducido, así como el impacto ambiental que se pueda producir al desechar tales residuos. [7]

Lo económico también tiene su razón de ser para la utilización de dichas máquinas, pues el presupuesto para la compra de materias primas se ve reducido lo que significa una mayor utilidad para la empresa. Esto acompañado de una optimización en los tiempos y cantidades usadas de materia prima en los procesos de pintado significan un ahorro aun mayor de dinero, complementándose así con la tarea de recuperación de thinner [9]. Todo esto en conjunto puede llegar a generar una producción óptima y eficiente.

Así el uso de máquinas destiladoras a gran escala en la industria automotriz y en cualquiera que trabaje con sustancias similares puede ser como se ha indicado de gran beneficio, mientras que ignorar tal oportunidad supone el constante desperdicio de materiales y el causar daño sobre el medio ambiente y aún más sobre la salud de seres humanos que trabajen directa o indirectamente con dichas sustancias [10].

2. METODOLOGÍA

El proceso de destilación se logra por medio un tanque destilador con los elementos adecuados para una destilación simple. En primer lugar, se cuenta con un recipiente donde se halla los residuos del proceso de pintura automotriz, desde aquí la sustancia pasa al tanque de destilación controlado por válvulas reguladoras que permiten el pase de un recipiente a otro, entre los cuales se encuentran filtros que evitan que pasen partículas ajenas a la sustancia a ser destilada.

Ya en el tanque de ebullición o destilación la sustancia residual se le someterá a un proceso de calentamiento por medio de resistencias eléctricas, esto permite elevar la temperatura al interior del tanque y alcanzar el punto de ebullición del thinner, de esta manera los gases generados del calentamiento pertenecerán únicamente al thinner separándolo de las otras sustancias que formaba parte en un inicio. Este gas se transfiere a un condensador, y posteriormente el thinner en estado líquido pasará a otro recipiente donde podrá usarse para su almacenaje, logrando así la recuperación deseada.

Las consideraciones para tener en cuenta durante el proceso tendrán que ver principalmente que ver con la temperatura a la que se encuentran la sustancia mezclada en un inicio, la que vaya adquiriendo durante el proceso y la que se obtenga al final de esta. La calidad del producto que se logre recuperar ira decreciendo en valor conforme se vaya obteniendo el producto tras la destilación, siendo así más puro al iniciar el ciclo, por lo cual se ha de aprovechar las cantidades iniciales y las finales tendrán que pasar talvez otra vez al proceso de destilación según la calidad que se logre observar en la misma [13].

El material considerado para el tanque de destilación es acero inoxidable puesto que sus características anticorrosivas y resistencia, lo hacen ideal para la sustancia residual que ha de albergar. La tubería para usar es PVC y controlando el paso de las sustancias en ellas por medio de válvulas antirretorno para el correcto flujo de los productos resultante y las sustancias entrantes. Entre estos dos elementos se encuentran filtros primarios que purificarán de agentes ajenos al proceso de destilación. El condensador también juega un papel importante pues se vuelve el foco frío o sumidero que permitirá tratar con el producto resultante de la destilación para poder almacenarlo en estado líquido. En el tanque las resistencias eléctricas son adecuadas para que por medio de una corriente eléctrica controlada y puesta al amperaje necesario pueda producir la temperatura de ebullición que permita la separación de los elementos por medio de la evaporación de aquel que tiene menor punto de ebullición, en este caso el thinner.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En pruebas realizadas con máquinas para destilación, se llegó a la conclusión de que el método de destilación simple era el más indicado para el cometido esperado de lograr recuperar el percloroetileno, teniendo cuidado de los puntos de ebullición de las sustancias que forman la mezcla. Tales procesos pueden llegar a tener una duración de 4 horas aproximadamente.

El thinner recuperado puede alcanzar altos estándares de pureza, esto permite un ahorro económico, ya que se puede mezclar nuevamente con pintura y repetir el proceso, además de que se lo puede usar para tareas de limpieza de recipientes, rociadores y herramientas usadas en las tareas de pintura.

El beneficio económico se presenta en industrias o empresas que han empezado a aplicar este sistema de recuperación, puesto que se ha visto el ahorro en la compra de materia prima para los procesos de pintado, las cantidades solicitadas en un inicio se ven reducidas y la optimización de recursos crea una mayor consciencia en los trabajadores que valoran los productos utilizados durante el proceso de pintado [16].

En el área ambiental, la contaminación provocada por los residuos resultantes del proceso de pintura es cada vez menores con la implementación de esta tecnología. Especialmente ayuda en la protección de los ríos y lagos, donde se vierten aguas contaminadas con desechos industriales, evitando así efectos nocivos sobre la salud de la población que depende de las aguas de estas locaciones para su consumo.

4. CONCLUSIONES

La necesidad de optimizar la producción y los recursos de una industria hacen factible buscar cualquier medio por el cual se pueda aprovechar al máximo con las materias primas necesarias para la producción, puesto que esto significará el uso reducido de insumos, buscando un beneficio económico y un menor impacto al medio ambiente.

El avance tecnológico ha permitido que esta optimización sea posible para la industria automotriz, que en los últimos años ha cambiado la perspectiva de producción por el cambio climático y la conservación del medio ambiente. ya sea de manera directa (producción) o indirecta (productos). Por lo que cualquier forma de poder mitigar los efectos nocivos resultado de los desechos que produce su industria es de gran ayuda para el futuro de dichas empresas y la población.

Este avance puede ser de utilidad no solo a grandes industrias automotrices como se ha dicho, sino que, aplicándolo de manera correcta, puede ser útil para cualquier empresa de largo o mediano alcance, o incluso una microempresa puesto que el proceso a realizar para la recuperación no es complicado ni necesita de un gran conocimiento técnico y los materiales necesarios puede ser accesibles en un sentido económico. La consciencia por el cuidado del medio ambiente y de la optimización de los procesos en la industria causara que estas innovaciones vayan tomando mayor presencia en los campos industriales y de producción.

REFERENCIAS

- [1] Rodríguez Guevara, B. P. (2015). Diseño de un Sistema de destilación para la recuperación de Percloroetileno en el lavado de Poliuretano de la empresa la Fortaleza Ltda. (Bachelor's tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- [2] Robalino Carrasco, D. F. (2012). Diseño de un Sistema de Destilación para la Purificación del Thinner de los Residuos de Pintura Automotriz en Multiservicios San Andrés (Bachelor's tesis).
- [3] Brito, H., Borja, D., Moreno, N., Parada, M., Robalino, P., Mendoza, M., & Andrade, E. (2015).
- [4] RECUPERACIÓN DE PERCLORETIENO EN INDUCALSA. European Scientific Journal, ESJ, 11(32).
- [5] Hoyos, A., & Eduardo, W. (2015). Diseño de un sistema para la recuperación de Percloroetileno mediante el Método de destilación en INDUCALSA (Bachelor's tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- [6] Torres, B., & Alejandro, H. (2015). Regeneración de solventes usados en la Industria Flexográfica (Bachelor's tesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería Industrial.).
- [7] Naula Ochoa, A. M. (2018). Diagnóstico y propuesta del manejo de aceites automotrices residuales en el cantón Nabón (Bachelor's tesis, Universidad del Azuay).
- [8] DE, O. G. P. L. A. (2010). "ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE.
- [9] Vásquez, A. M. O., & Cuervo, C. G. R. (2015). Descripción de la jerarquía de controles frente al peligro químico, por exposición a compuestos orgánicos volátiles generados por procesos de pintura en el sector industrial. Investigación en Enfermería: Imagen y Desarrollo, 17(1).
- [10] Caballero Biosca, F., Folch i Sancho, A., & Rodríguez i Escales, P. F. (2011). Prevención, seguimiento y evaluación de la descontaminación de percloroetileno en suelo y aguas subterráneas en un terreno industrial.
- [11] Medina Carrillo, V. V., & Sánchez Salinas, M. A. (2013). Diseño y construcción de un equipo de destilación para la purificación del aceite usado procedente de vehículos (Bachelor's tesis).

- [12] REYES LUJAN, S. E. R. G. I. O. (1993). NORMA Oficial Mexicana NOM-054-ECOL-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993.
- [13] VELAZQUEZ, L. V. D., BONILLA, D. M. G., ROMERO, V. P., & PUPO, M. I. T. DIAGNOSTICO AMBIENTAL DEL SECTOR DE LAVANDERIAS EN EL DISTRITO CAPITAL.
- [14] Cegarra Sánchez, J. (1971). Empleo de disolventes en la industria textil de tinturas y acabados.
- [15] Álvarez, G., & del Cisne, L. (2016). Minimización de desechos peligrosos generados en los talleres de servicio automotriz de las agencias concesionarias de Quito.
- [16] Yubailli, A., & Isabel, S. (2013). Diseño y construcción de una torre de destilación con rectificación para la purificación de Thinner usado procedente de las mecánicas de automóviles (Bachelor's tesis).
- [17] Edgar, L., Ramírez, S., Carlos, A., Sánchez, P., & Pajuelo, R. A. Identificación del plomo, benceno y tolueno en trabajadores que manipulan lubricantes y brindan servicios automotrices. *Ciencia e Investigación*, 5(1), 7-14.
- [18] NASSAR, J. A. DISEÑO DE UNA GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL PARA RESIDUOS PELIGROSOS EN LA COMPAÑÍA COLOMBIANA AUTOMOTRIZ SA (MAZDA).
- [19] Chico Proaño, A. G. (2012). Estudio del comportamiento de sistemas de pintura automotriz de base poliuretano en las condiciones atmosféricas de la ciudad de esmeraldas (Bachelor's tesis, QUITO, 2012.).
- [20] Maleza, C., & Robinzon, A. (2018). Proyecto de ordenanza municipal que regule la contaminación al medio ambiente, causado por los talleres de pintura automotriz e industrial en el cantón Santo Domingo (Bachelor's tesis).

Análisis estructural a cargas de impacto posterior por alcance de un bus interprovincial mediante el método de elementos finitos.

(Structural analysis of an interprovincial bus subjected to a rear impact by reach,)

D. Cuasapud-Puente ^{(1)*}, E. Chamba-Monar ⁽²⁾, B. Briceño-Martínez ⁽³⁾, A. Cárdenas-Yáñez⁽⁴⁾.

1, 2, 3, 4. Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK. Quito, Ecuador

Autor de correspondencia: 0999750755, dcuasapud.mdm@uisek.edu.ec (D. Cuasapud)

RESUMEN

En el presente estudio se efectúa un análisis de una estructura de un bus interprovincial sometido a impacto posterior por alcance, utilizando el método de elementos finitos, para lo cual se desarrolla una metodología de simulación, con ello se pretende determinar el comportamiento estructural de la carrocería con el fin de evaluar el desempeño de la misma, cuando se encuentra sometida a este tipo de evento. Para proyectar geoméricamente la estructura del bus, se utiliza la norma NTE INEN 1323:2009 y se aplica el método LRFD, para determinar la resistencia estructural estática de la carrocería. Para el ensayo de impacto se utilizó el software LS-DYNA, teniendo en cuenta las propiedades del material y la aplicación de la dinámica explícita. En el proceso de simulación se establecieron las condiciones de borde, para el análisis dinámico a través del método de elementos finitos. El proceso de validación de los resultados obtenidos, están en relación al parámetro del reloj de arena (Hourglass) a partir de los cuales se realizó la validación de datos de este estudio y por consiguiente la validación de la estructura en estudio.

PALABRAS CLAVE: Impacto posterior, estructura de bus, análisis estructural, elemento finito, combinación de cargas.

ABSTRACT

The present study focuses on analyzing a structure of an interprovincial bus subjected to a rear impact by reach, and to develop a simulation methodology, with the purpose of determining the structural behavior of the body in order to evaluate the performance of the same, when it is subjected to this type of event. In order to carry out the simulation, the properties by which the body was constructed. In the simulation process LS-Dyna software was used, and in which the edge conditions were established to perform the analysis. The data obtained in the different load combinations according to the NTE INEN 1323: 2009 standard and based on the LRFD method, allow to determine the static structural resistance of the body, the dynamic analysis is established through the finite element method, the balance of energies, and the hourglass energy from which the data validation of this study was carried out and therefore the validation of the structure under study.

KEY WORDS: Rear impact, bus structure, structural analysis, finite element, load combination.

1. Introducción

En el mundo de la industria automotriz, el desarrollo del transporte público está a cargo de las empresas carroceras. Las cuales buscan producir unidades que brinden seguridad y mayor confort. Para lograr este fin se ha logrado avances en el diseño asistido por computadora, el ensamblaje automatizado, que produzcan unidades que cumplan con las normativas de calidad y producción. Para producir estructuras para el transporte público más seguras en países como China, India, Japón y países de la Unión Europea se cuenta con polígonos de pruebas para realizar ensayos de las estructuras y de esa manera evaluar su resistencia cuando estas son sometidas a choques (Bone, Castillo y Sandoval, 2015).

La industria carrocera en el país presenta un desarrollo en cuanto a diseño, montaje y fabricación de estructuras para transporte público, se cuenta con una normativa para la homologación de carrocerías, sin embargo no se cuenta con una normativa que permita evaluar las carrocerías al momento de sufrir un impacto o choque. De acuerdo un reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), realizado en el 2013 ubico a Ecuador como el segundo país en muertes por accidentes de tránsito en Latinoamérica.

Una gran cantidad de estos siniestros se producen en los transportes de servicio urbano e interprovincial. Las estadísticas presentadas por los gobiernos autónomos de Loja, Quito, Manta, Ibarra y Guayaquil, basadas en informaciones, son empleadas por la Agencia Nacional De Tránsito, indicando el porcentaje de siniestros acumulado hasta diciembre de 2015, donde por choque posterior presentan 11.39% del total de accidentes a nivel nacional, que representan 4068 accidentes siendo después del choque lateral, con el 28.37% los principales tipos de accidentes de tránsito. El porcentaje de buses que participan en este tipo de siniestros constituyen un promedio anual de 7.08% (Agencia Nacional de Tránsito, 2015). Por tanto el diseño de carrocerías de autobuses juega un papel muy importante en cuanto a la seguridad del conductor y los pasajeros en un accidente, por lo que en este tipo de eventos, la estructura de los buses se constituye en la más importante y en la mayor parte de casos, la única forma de protección (Manjarrez y Santillán, 2016). En la actualidad, en el país para la construcción de carrocerías es indispensable el cumplimiento de normas y reglamentos emitidos por el servicio ecuatoriano de normalización INEN, donde se establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías (Alcoser y Morales, 2017).

Por tanto es importante tener en cuenta el diseño del vehículo, su construcción y mantenimiento, ya que indudablemente desempeñan un rol importante cuando existe un choque y las consecuencias que este produce. Con el afán de reducir las tasas de mortalidad los fabricantes de automóviles trabajan intensamente con el fin de incorporar nuevas tecnologías para aumentar la seguridad en caso de un impacto. Estas tecnologías permitirán proveer una mayor protección a los ocupantes del vehículo (Cazzola, Alcalá y Aparicio, 2013).

En la industria automotriz, se desarrolla el transporte público, mediante estudios acerca del comportamiento de una carrocería al someterle a carga con la ayuda de sistemas computarizados. Países como Colombia, Brasil, Perú han visto una oportunidad de realizar el diseño y el modelamiento utilizando herramientas CAE y CAD (Parra et al., 2007).

Para mejorar los diseños en las estructuras de los buses, es importante tener en cuenta el comportamiento de la misma después de iniciada la colisión, para considerar las deformaciones y desplazamientos que experimenta. Para este fin se han realizado varias investigaciones concernientes al análisis estructural elasto-plástico, utilizando el método de elementos finitos.

La ingeniería asistida es muy utilizada en el campo de la industria automotriz, debido a los altos índices de accidentes y a la necesidad que tienen los fabricantes de ofrecer vehículos que brinden seguridad a los ocupantes en caso de que el autobús se involucre en un choque, y para lograr este fin se requieren programas informáticos con paquete de simulación, que posibiliten realizar un estudio virtual, antes de la construcción del prototipo de comprobación (Conde, 2015).

2. Materiales Y Métodos

En el presente proyecto se utilizará un enfoque CAD-MEF propuesto que está basado en cuatro fases principales secuenciales. La “primera fase” comprende la proyección de la geometría en el ambiente CAD, para el diseño de la carrocería del bus se toma en cuenta las especificaciones de la normativa INEN. Se realiza la revisión de normativa para realizar el Crash Test. En la “segunda fase” se modela en 3D los componentes que conforman el diseño de estructura para un bus interprovincial. La “tercera fase” se procede a realizar los ensayos, donde se discretiza o subdividen en elementos independientes creando un modelo matemático, se sigue el procedimiento convencional del análisis computacional (Introducción Ansys Mechanical, 2015), se tiene el preprocesamiento importación del modelo CAD, asignación de materiales, definición del solver, definición de condiciones de borde, cargas y restricciones, tamaño de la malla, son datos que el software necesita para simular aceleraciones, fuerzas, presiones y otras propiedades físicas que serán resueltos por MEF cuyos resultados serán valores de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, factores de seguridad entre otros datos y permitirán el análisis de los puntos más críticos (Argüello, 2017).

La “cuarta fase” se presenta el análisis dinámico de la estructura usando software LS-DYNA y de esta forma evaluar el diseño de la parte posterior de la superestructura de un bus interprovincial, la cual va a sufrir el choque posterior.

2.1 Datos de entrada para proyección de geometría.

La normativa para el diseño, montaje y construcción de la carrocería es la INEN NTE 1323:2009, la cual tiene en cuenta las especificaciones para los espacios de supervivencia; para proyectar la geometría de la carrocería. Se consideran además las dimensiones de la NTE INEN 1668 Primera revisión, que presentan los aspectos a tener en cuenta al proyectar la estructura. Los materiales de la estructura del bus deben ser perfiles y tubería estructural protegido contra la corrosión de acuerdo a la normativa NTE INEN 2415 y la NTE INEN 1623.

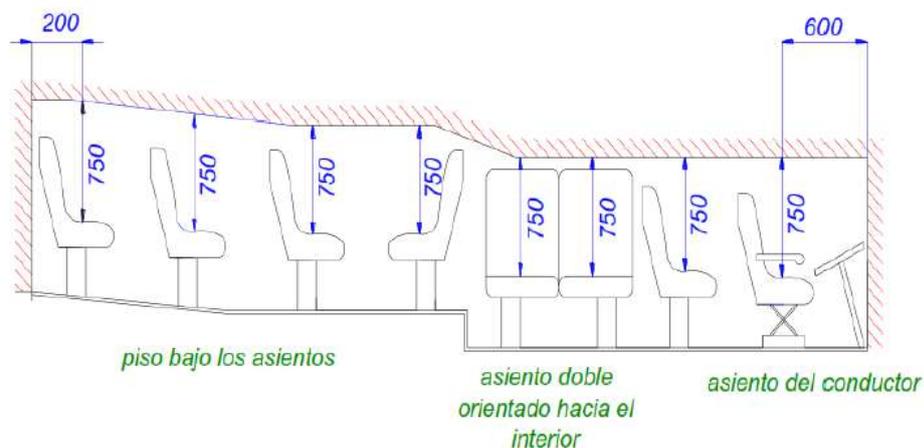


Figura 1. Vista longitudinal del espacio de supervivencia. Fuente: NTE INEN 1323:2009

2.2 Parámetros de ensayo

De acuerdo a la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, 2011), se establece la velocidad con la cual se va a realizar el ensayo. Se contempla el utilizar las normas NHTSA, 2012, donde se establece la velocidad de 53 Km/h (13.88 m/s; 1.388e+004 mm/s), para realizar el estudio.

La proyección de la geometría en 3D se realiza en el software Siemens NX Unigraphics (Siemens PML, 2015), para diseño y análisis de elementos finitos. Teniendo en cuenta las especificaciones de la normativa INEN NTE 1323:2009, se efectuó la proyección del modelo (figura 2).

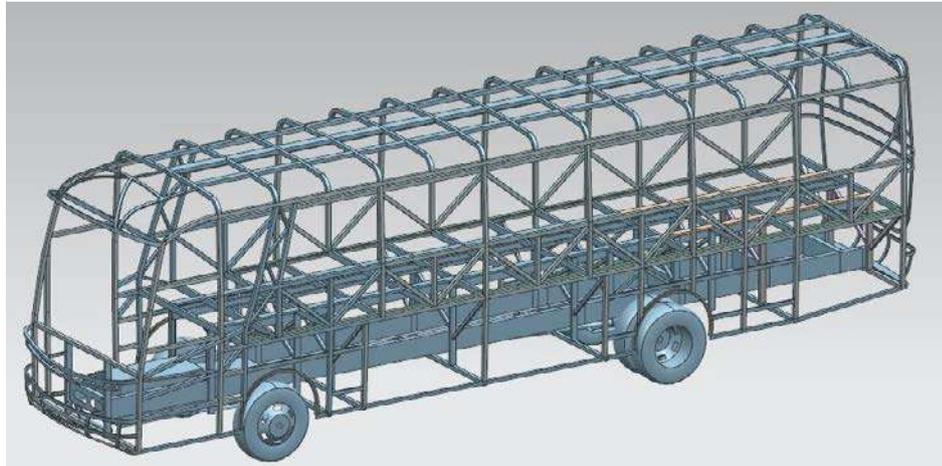


Figura 2. Carrocería de bus en 3 dimensiones.

2.3 Generación de malla para análisis MEF

En el pre procesamiento se debe definir el mallado (mallado de superficie, mallado de sólido, herramientas para edición de mallado) y aplicaciones especiales.

La generación de la malla es de vital importancia. Una de las razones es que la malla superficial muestra un efecto sobre la precisión de las soluciones numéricas (esta parte por encontrarse relacionada con las condiciones de frontera) y la convergencia en simulaciones numéricas basadas en elementos (o contornos) finitos. La calidad de la malla es importante en la precisión de los resultados. Se va a utilizar una Malla 2D tipo superficie, tamaño 30 mm, Se obtuvieron un total de 310244 elementos, de acuerdo al tamaño de la malla.

Se extruye cada perfil, a modo de superficie, teniendo en cuenta las dimensiones como es la longitud y geometría requerida para cada elemento. Así se proyecta el modelo CAD, y mediante el comando “compartir topología” se produce la unión de los elementos en condiciones a tope.

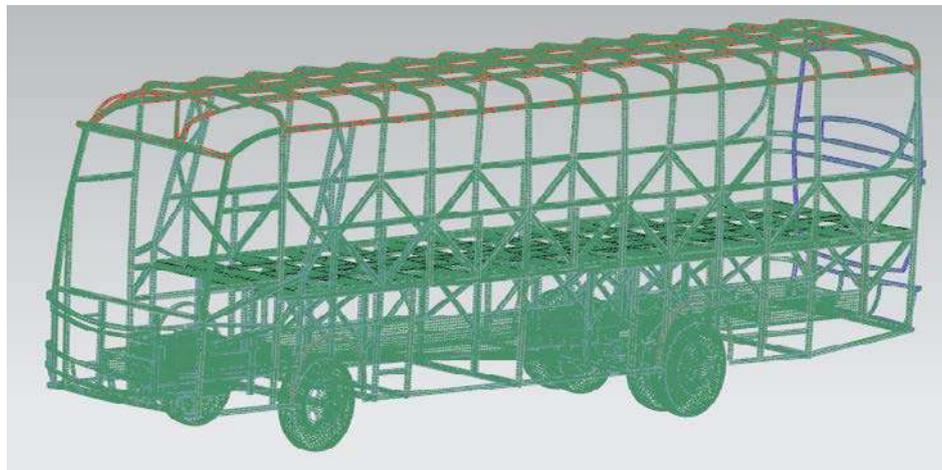


Figura 3. Modelo generado en el software y mallado

2.4 Cargas aplicadas a la carrocería de un bus.

Cuando se diseña una estructura para transporte público, esta debe ser homologada de acuerdo a la especificado INEN NTE 1323:2009. Uno de los métodos que estipula esta normativa es el diseño considerando factores de seguridad por resistencia de materiales, método LRFD (*Load Resistance Factor Desing*). (NTE INEN 1323, Ecuador, 2009). Este método permite determinar la resistencia de la estructura que va ser sometida a combinaciones de carga para evaluar la su resistencia estática.

2.5 Modelos matemáticos para el análisis de impacto posterior por alcance

Para el desarrollo de modelos matemáticos y su resolución para análisis de impactos es importante conocer e identificar las leyes y principios matemáticos y físicos que presenta es tipo de fenómeno físico.

A continuación se presenta una tabla con los valores de velocidad, tiempo y masa para el cálculo de la fuerza de choque usando la teoría del impulso y cantidad de movimiento.

Tabla 1. Datos para el cálculo de la fuerza de choque

Concepto	Valor
Velocidad inicial del bus interprovincial	Cero
Velocidad de la barrera móvil	53±3 Km/h
Tiempo de contacto en el choque	20 ms
Masa del bus (Carga estructura)	5085.03 Kg (ml)
Masa de la barrera móvil	1500

Por ser un choque totalmente inelástico las masas se suman:

$$VR = \frac{m_1 v_{01} + m_2 v_{02}}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$VR = 38.61 \frac{\text{Km}}{\text{H}}$$

Entonces se puede calcular la fuerza necesaria para producir este movimiento del bus interprovincial:

$$I = \Delta P = P_f - P_0 \quad (2)$$

$$P = mV \quad (3)$$

$$I = \Delta P = m V_f - mV_0 \quad (4)$$

$$I = \Delta P = 5085,3 \left(38.61 \frac{\text{Km}}{\text{H}} - 0 \right)$$

$$I = 54539,84 \text{ Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (5)$$

$$F = 1090796,8 \text{ N}$$

$$F_i = \frac{F}{4}$$

$$F_i = 272699,2 \text{ N}$$

Tomando la muestra de una viga, se puede determinar el esfuerzo normal por compresión al cual está sometida la viga así como su deformación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

El área corresponde a la sección de un tubo hueco de 50 x 50 x 2:

$$A = 392 \text{ mm}^2$$

Por tanto el esfuerzo al que está sometida la barra es:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{272699,2}{392}$$

$$\sigma = 695,66 \text{ MPa}$$

Ensayos

Se realizan los ensayos para determinar la resistencia estática y dinámica de la estructura

Las condiciones de los ensayos, se especifican en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de ensayo

Criterio	NHTSA
Velocidad	53 Km/h
Barrera movil	
Tiempo	0,50 ms
Material	024-Piece Wire_Linear_Plasticity

Se especifican las cargas a analizar en el estudio, que pueden ser debido a desplazamientos, rotaciones, fuerzas, momentos velocidades, aceleraciones, restricciones de movimiento, de desplazamiento grados de libertad de los acoplamientos, se determina el tipo de control de arena, tiempo de terminación.

3. Resultados

Los resultados que se muestran a continuación están basados en el análisis cuasi-estático, que permite determinar la validación de la estructura.

Para la validación de la estructura se aplica la combinación de cargas estáticas estipuladas en el método LRFD NTE INEN 1323:2009. Las cargas estáticas se asignan a la carrocería acorde a las especificaciones establecidas en la norma.

Resultados obtenidos en base a las combinaciones de cargas según la Norma NTE INEN 1323:2009.

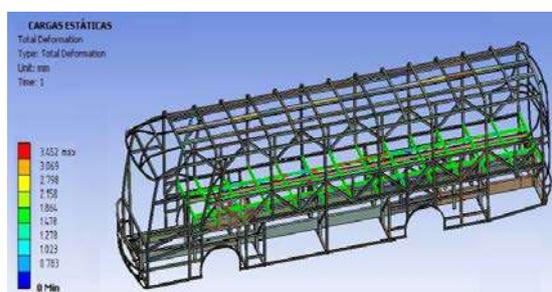
Basados en el método LRFD NTE INEN 1323:2009 se presentan a continuación los valores de las combinaciones de cargas para el análisis cuasi-estático. Este método se basa en los conceptos de estado límite, mismo que describe una condición en la que la estructura, o alguna parte de ella, deja de cumplir su función. La norma establece que las cargas combinadas, según el método LRFD, deben alcanzar una deformación de todos los componentes de la estructura de la carrocería iguales o menores a 1/240 veces su longitud (NTEINEN 1323:2009 apartado 5.1.4)

En la tabla 3 a continuación se presenta los valores de las cargas para la combinación.

Tabla 3. Valores de cargas para las combinaciones

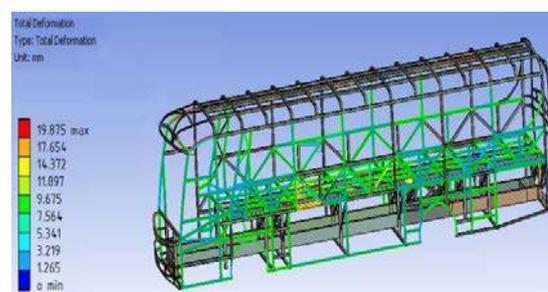
Tipo de carga	Ref. Norma	Valor
Carga muerta (M)	NTE INEN 1323:2009	96399.86 N
Carga viva (V)	NTE INEN 1323:2009	42829,67 N
Carga de giro (G)	NTE INEN 1323:2009	25217,14 N
Carga de frenado (F)	NTE INEN 1323:2009	56486.45 N
Carga de aceleración brusca (Ab)	NTE INEN 1323:2009	56486.45 N
Carga de resistencia aerodinámica (Raf)	NTE INEN 1323:2009	2139.03 N

Caso 1 (1.4 M + V)



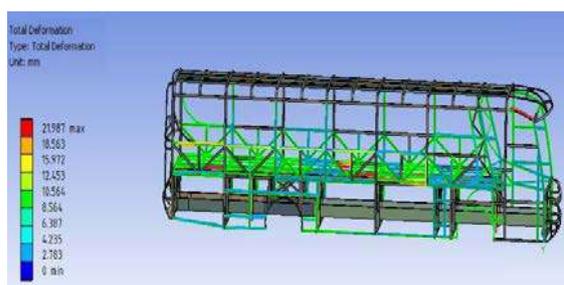
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
40.60	3.452	positivo

Caso 2 (1.2 M + 1.6 V + 0.5 G)



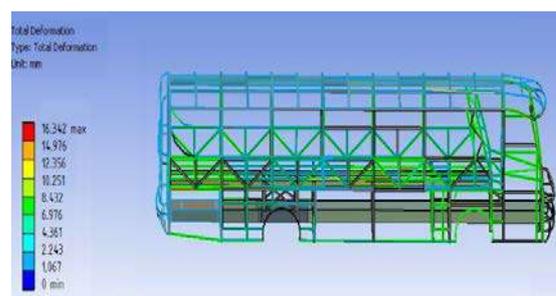
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
46.31	19.87	positivo

Caso 3 (1.2 M + 0.5 V + 1.6 G)



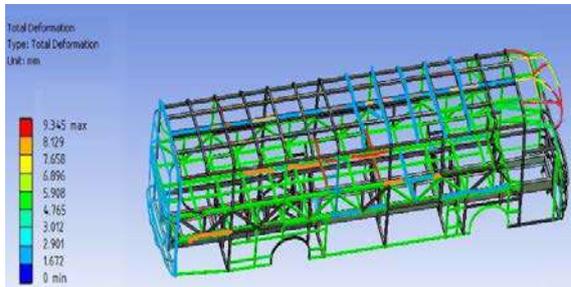
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
46.31	21.98	positivo

Caso 4 (1.2 M + 1.6 F + 0.8 Raf)



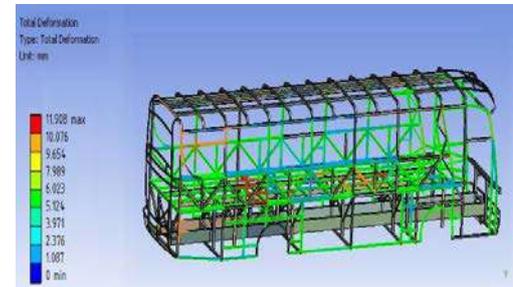
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
47.32	16.34	positivo

Caso 5 (1.2 M + 0.5 V + 0.5 F + 1.3 Raf)



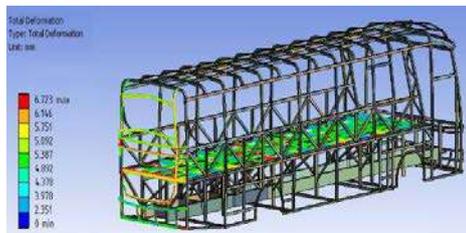
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
47.32	9.34	positivo

Caso 6 (1.2 M + 1.5 Ab + 0.5 V)



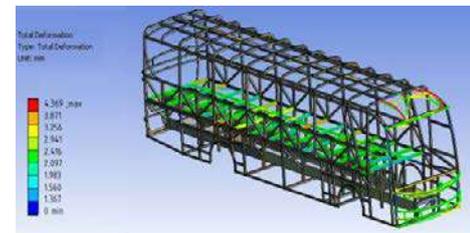
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
46.32	11.90	positivo

Caso 7 (0.9 M – 1.3 Raf)



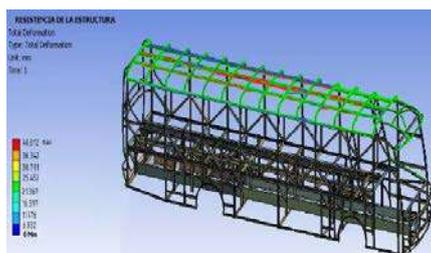
Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
42.16	6.72	positivo

Caso 8 (0.9 M + 1.3 Raf)



Restricción no pasar del 1/240 Log Total Def. max. (mm)	Def. Obtenida (mm)	Deja libre zona de supervivencia
42.16	4.36	positivo

Caso 9



Masa distribuida sobre el techo de la carrocería

Figura 4. Simulaciones obtenidas aplicando las cargas de método LRFD NTE INEN 1323:2009

Los resultados obtenidos de la carrocería modelada tomo los valores especificados en la normativa TE INEN 1323:2009 y basados en el método LRFD cumple con el objeto de resistir las cargas estáticas que se presentan en este tipo de método. La valoración de la máxima deformación de la estructura se verifica comparando las deformaciones producidas en cada combinación ejecutada en la estructura (Verdezoto, 2015)

Análisis dinámico

Se presenta a continuación la evaluación y representación de resultados del análisis dinámico de la carrocería. Los resultados expresados mediante gráficos y curvas que permiten analizar y evaluar los resultados logrados en el pos procesado, serán extraídos utilizando el pos procesador LS Prepost 3.2 nativo de LS DYNA.

Los datos que se exponen a continuación resultaron de la simulación, así como del cálculo entre la energía interna y el hourglass, con el fin de validar el estudio.

Para el control de los modos de reloj de arena en el estudio estructural es la formulación Flanagan Belytschko Stiffness. El coeficiente de reloj de arena para el control Hourglass generalmente oscilará entre 0.1 (predeterminado) y 1.0. Para material elástico, se utiliza el coeficiente 1.0. En este estudio se utilizó el modo de control de reloj de arena por defecto en LS-DYNA es de 0,1; valor utilizado para producir el efecto de inflexibilidad elástica en la simulación.

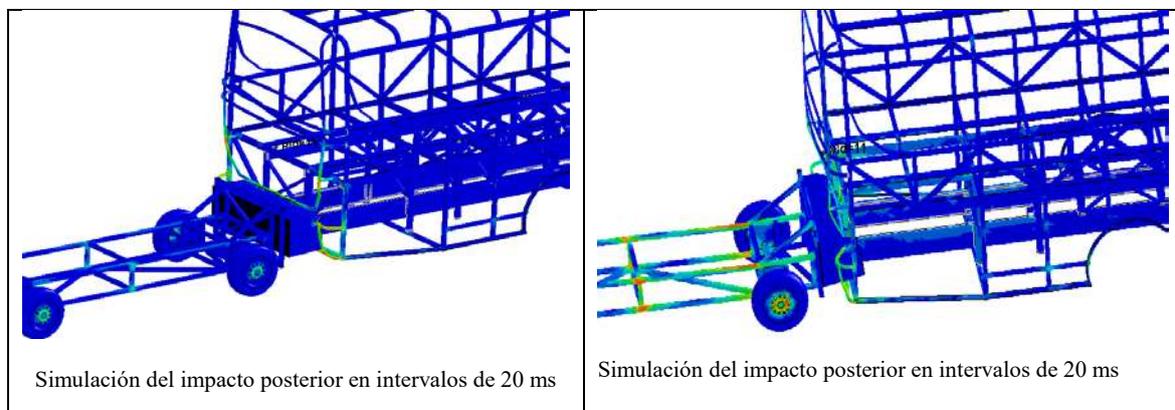


Figura 5. Simulación del impacto en la parte posterior de la carrocería

Se establece la deformación de la estructura de la carrocería producida después del impacto posterior, en la Figura 6, se observa que el desplazamiento direccional en el eje z (dirección del impacto) presenta un valor máximo de 372,197 mm. Se observa la deformación producida por el impacto posterior siendo los más afectados los que conforman el parante posterior y el guardachoque.

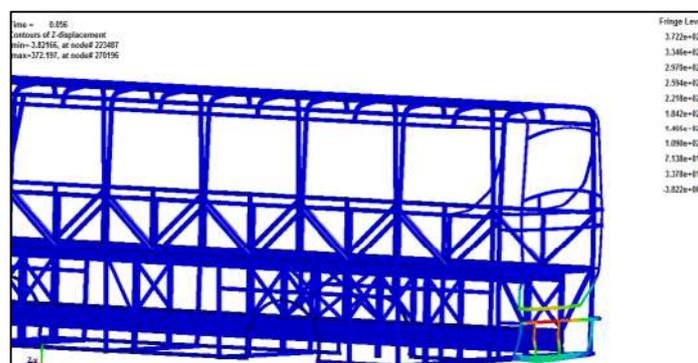


Figura 6. Deformación direccional de la estructura en el eje Z

Para establecer el comportamiento de los elementos críticos de la carrocería, para este estudio, la parte del voladizo posterior, se eligen cuatro elementos de la zona del impacto o zona crítica, para establecer el comportamiento de los mismos se considera el esfuerzo de Von Mises y el desplazamiento como parámetros de evaluación. Los elementos discretos seleccionados en la zona crítica por deformación son: 270196, 270001, 270071, 27246.

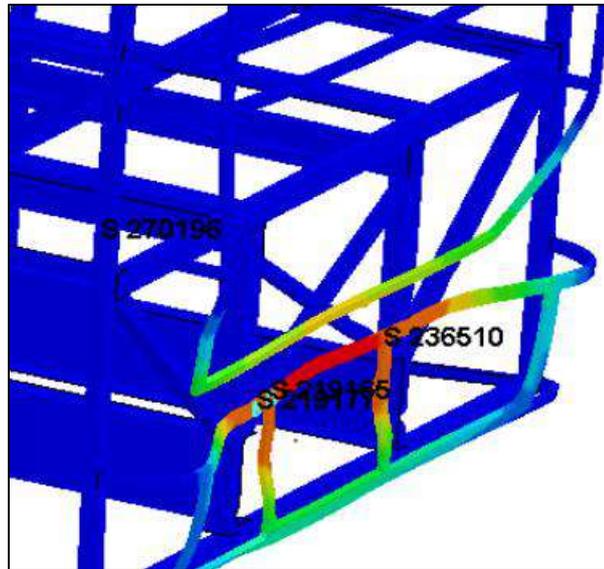


Figura 7. Elementos críticos del voladizo posterior

La Figura 7 muestra que en el intervalo de tiempo de 50 ms después de iniciado el impacto, el comportamiento de los cuatro elementos es similar; en el intervalo de tiempo de 20 a 100ms los valores de los esfuerzos se elevan de tal manera que en los elementos 270196, 270001, 270071, 27246 el esfuerzo es mayor a la resistencia última del material (430 MPa); además se puede observar que los elementos experimentan fluctuaciones después de la zona proporcional, debido a la variación de las fuerzas internas que se producen en cada elemento en el transcurso del tiempo de impacto

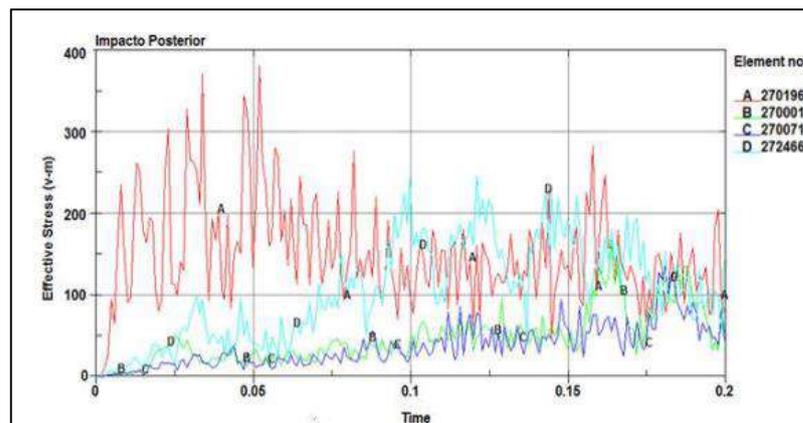


Figura 7. Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises en los elementos seleccionados

En la gráfica se aprecia el esfuerzo y deformación del elemento crítico 270196, se puede determinar que el límite de resistencia a la cedencia (S_y) se alcanza cuando el elemento se ha deformado 300mm a los 7 ms de iniciado la colisión; el elemento sufre un colapso en la zona plástica por máxima concentración de esfuerzos debido a que supera el S_y (302.68 MPa)

Finalizado el proceso de datos en LS DYNA, se procede a ingresar los archivos LS-DYNA Keyword File (archivos K) y LS-DYNA Binary Plot (D3plot) generados al postprocesador LS Pre-Post 3.2 para la representación e interpretación de los resultados

Validación del estudio virtual

Al realizar el análisis en dinámica explícita con elementos de integración reducidos, siempre es importante determinar si los efectos de hourglassing han degradado significativamente los resultados. Como norma general, la energía hourglassing no debe superar el 10% de la energía interna (LIVEMORE ,2014). Se obtuvo las curvas de energía como se indica en la figura 7

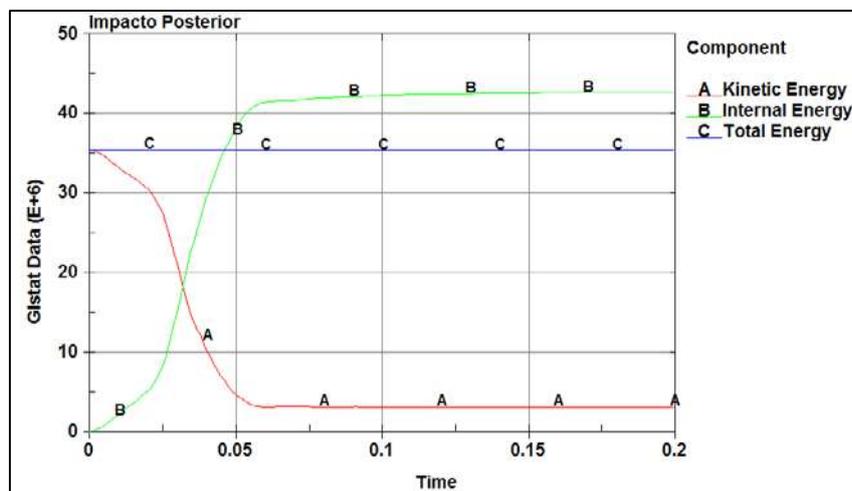


Figura 7. Curvas de energía

Se procede al cálculo de la relación entre la energía interna por deformación vs la energía Hourglass (Alcoser y Morales, 2017).

$$H = \frac{\text{Hourglass}}{\text{Energía}_{int}} \quad (7)$$

$$H = \frac{0.33 * 10^6 \text{ Nmm}}{42 * 10^6 \text{ Nmm}} * 100\%$$

$$H = 0.78 \%$$

$$H < 10\%$$

Rooppakhun (2015), indica que su estudio de análisis estructural de una estructura de un bus sometido a impacto frontal, produjo una gráfica similar a la obtenida en este estudio y mediante la cual su estudio queda validado.

El valor obtenido de H es menor al 10% por lo tanto el análisis es válido para las condiciones establecidas en la simulación (Pattaramon, Supakit y Burawich, 2015).

Discusión

Supakit Rooppakhun, et al (2013) realiza un análisis estructural de un bus sometido impacto frontal donde se presenta el colapso de los elementos estructurales que se encuentran en la zona de mayor concentración de esfuerzos, transcurridos los 0.025 s. de ocurrido el impacto.

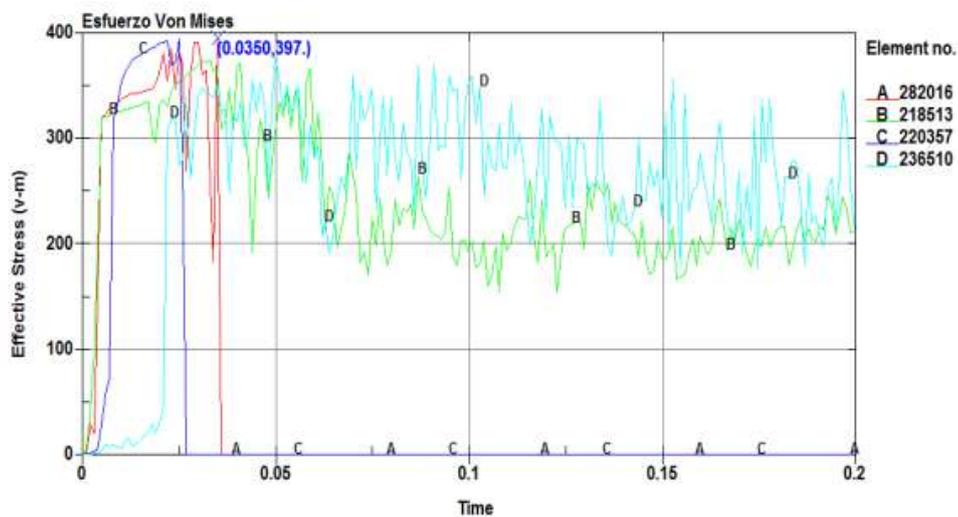


Figura 8. Diagrama del esfuerzo de Von Mises en la estructura

Se analiza el comportamiento del elemento más crítico, para este caso el elemento número 282016. En el diagrama se observa que este elemento crítico supera el límite de resistencia a la cedencia (S_y), el elemento colapsa en la zona plástica por máxima concentración de esfuerzos, debido a que supera el valor S_y ; el esfuerzo producido en el elemento es mayor que el esfuerzo último del material que de acuerdo a los valores obtenidos en los ensayos físicos posee un valor de 302.68 MPa.

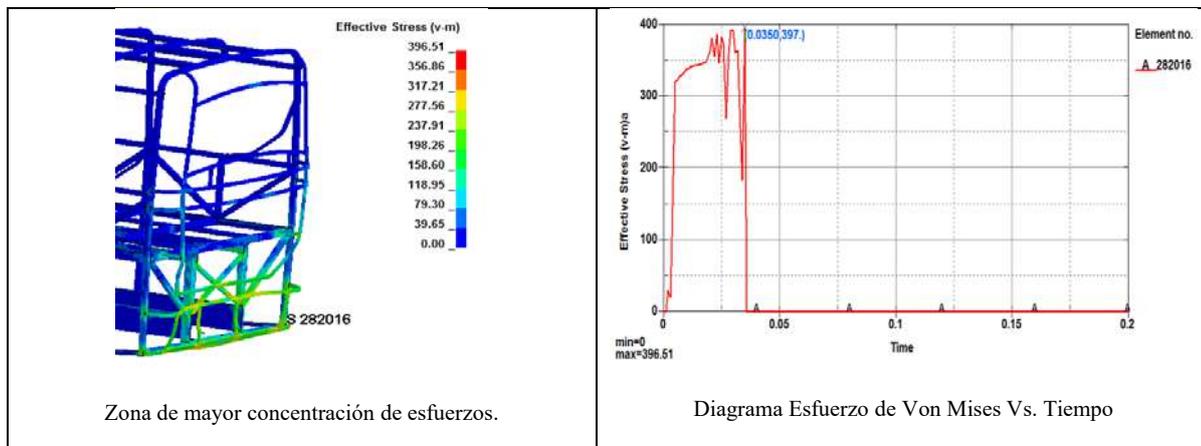


Figura 7. Zona de impacto y diagrama de esfuerzos vs tiempo

El diagrama Esfuerzo de Von Mises vs el tiempo, indica un comportamiento lógico y similar del fenómeno del elemento de muestra, por lo que se elimina la posibilidad de dispersión de datos por defectos de malla (Esmeraldas, 2016). El elemento colapsa cuando alcanza un esfuerzo máximo de 397 MPa a los 0.035s de transcurrido el evento de impacto.

De acuerdo a Hernández (2016), un método efectivo para determinar si la zona de supervivencia es afectada o invadida por algún elemento estructural es tomando dos elementos de muestra; uno correspondiente a la zona del impacto (218413) y el otro correspondiente al espacio de supervivencia (133451).

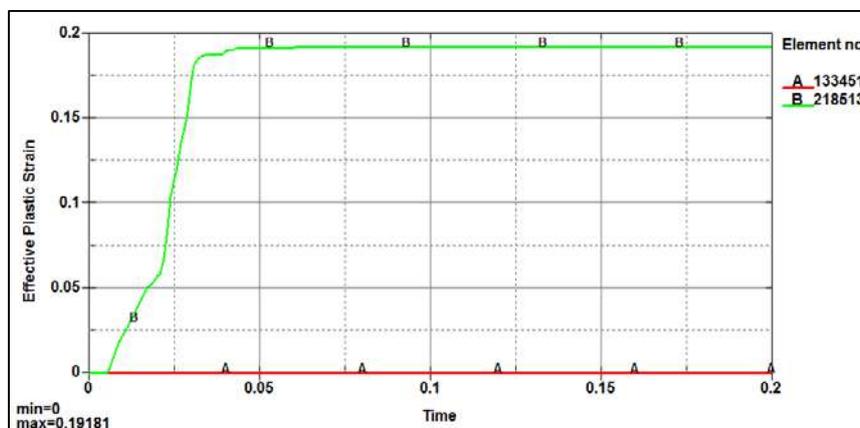


Figura 8. Diagrama Deformación Plástica Efectiva Vs. Tiempo

La figura 8 muestra el diagrama deformación plástica efectiva vs tiempo, donde se observa que el valor correspondiente al elemento de la zona de supervivencia se mantiene en un valor constante de 0 (cero), mientras que el elemento de la zona del impacto muestra un cambio, esto implica que el espacio de supervivencia no ha sido afectado por otros elementos estructurales.

Conclusiones

La estructura del bus interprovincial ensayada cumple con los requisitos de diseño para satisfacer la norma NTE INEN 1323:2009, ya que los valores de los parámetros obtenidos de deformación no sobrepasaron los valores máximos de deformación que indica la norma.

En el análisis del impacto posterior, mediante la simulación por MEF, el habitáculo de la carrocería no resulta invadida por ningún miembro estructural.

El control de arena (Hourglass), se utiliza para evitar trabados de la malla y esto afectaría los resultados. La relación entre el Hourglass y la energía interna deben ser menores al 10%, siendo de este valor el estudio será validado.

El refinamiento realizado en la malla con diferentes tipos de tamaño, genera una calidad aceptable, siendo el valor del Angulo Skewnesse, el que está dentro del límite de validación.

El balance de energía permitió verificar la precisión de los resultados de la simulación, ya que se verificó si la energía total permaneció constante durante el período de tiempo de la simulación.

Referencias

AGENCIA NACIONAL DE TRANSITO “Estadísticas de transporte terrestre y seguridad vial” 2015. Recuperado: <http://www.ant.gob.ec/index.php/noticias/estadisticas#.Vir5EqxZER> (febrero, 2015)

Alcoser y Morales (2017) *Diseño y construcción de los anclajes de asientos de un bus interprovincial bajo las condiciones de impacto frontal y lateral en la empresa Metalmecánica Pillappa*. Escuela Politécnica de Chimborazo

Argüello, O (2017) *Análisis mediante elementos finitos de la estructura un remolque análisis mediante elementos finitos de la estructura un remolque*. Universidad Internacional Sek

Bone, I., Castillo, G. y Sandoval, C (2015) Análisis de responsabilidad social en las empresas de transporte público interprovincial del Ecuador, caso “cooperativa de transportes Occidentales”. Universidad Politécnica Salesiana.

Cazzola, G., Alcalá, E. y Aparicio, F (2013). *Study of the bending response of metal foam-filled beams applied to enhance the rollover behavior of coach structures*. International Journal of crashworthiness.

Arroba Arroba, C. (2013). *Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobús interprovincial marca Miral Infiniti en chasis Hino Ak sometida a volcadura, mediante los programas Ansys Ls-Dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Diseño Mecánico.

Conde, J. (2015) *Simulación de ensayos de choque en vehículos: validación*. Universidad Carlos III de Madrid.

Finite Element Modeling in Fleet Safety Studies. NHTSA *Mass-Size-Safety Symposium*, 2011

Introduction to ANSYS Mechanical. ANSYS, Inc., 2015

Manjarrés Arias, F. J., & Santillán Mariño, E. R. (2016). *Análisis Estructural a cargas de impacto frontal de un bus tipo Interprovincial mediante el Método de Elementos Finitos*. Escuela Politécnica Nacional

Finitos. Quito, 2016. Normativa INEN NTE 1323:2009

Pattaramon, Supakit y Burawich, (2015). *Improvement of Crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact*

Parra, J., Ríos, R., Mantilla, D., & Rojas, R. (2007). *Estudio del comportamiento bajo carga de un chasis para transporte de pasajeros por medio de la tecnología de elementos finitos en la empresa Equitel Cumandes S.A.*

Rooppakhun, S., & Bua-Ngam, S. (2013). *Finite Element Analysis of High-Decker Bus Frontal Impact Based on ECE-Regulation No. 29*. Paper presented at the Advanced Materials Research.

Verdezoto Carrera, J. (2015) *Diseño de una carrocería de un bus interprovincial en conformidad con el instituto ecuatoriano de normalización (norma inen 1323:2009) y validación mediante mecánica computacional*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Sangolquí. Carrera de Ingeniería Mecánica.

Cuasapud, D. (2018) *Análisis estructural a cargas de impacto posterior por alcance de un bus interprovincial mediante el método de elementos finitos*. Universidad Internacional SEK

Máquinas de desgaste acelerado para homologación de maquinaria agrícola para aspas de motocultor.

(Accelerated wear machines for homologation of agricultural machinery for motocultor blades.)

V. Bravo Morocho ^{(1)*}, M. Castillo Cárdenas ⁽²⁾, P. Abarca Pérez ⁽³⁾, E. Sánchez Carrión ⁽⁴⁾, P. Montúfar Paz ⁽⁵⁾.

(1), (2), (3), (4), (5), Carrera de Ingeniería Automotriz. Facultad de Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. EC060155.

*Correspondencia. Tel.: 0984274866, E-mail: victor.bravo@esPOCH.edu.ec (V, Bravo Morocho)

RESUMEN

El presente trabajo ataca el problema de baja fiabilidad de las aspas del motocultor YTO DF-15L; iniciando con la fabricación de una máquina de desgaste acelerado según especificaciones de la norma ASTM G-65, para establecer requerimientos mínimos de homologación de herramientas de mecanización agrícola, en aspectos como: dureza superficial, composición del material, absorción de energía por unidad de área al impacto, geometría óptima de la herramienta para soportar eficientemente cargas de trabajo en campo. Dichas metas fueron alcanzadas con una serie de ensayos (destructivos y no destructivos) a las aspas, simulación en software CAD/CAE para determinar los factores de su baja fiabilidad y atacar el problema, entre las soluciones previas están: tratamientos térmicos y agrandamiento de la sección transversal (solución final). El diseño, construcción, calibración y validación de una máquina de desgaste acelerado según Norma ASTM G-65, se realizó para determinar la tasa de desgaste de las aspas, para finalmente tratar los requerimientos de propiedades mecánicas mínimas que deberían tener las aspas para construirse en Ecuador y/o importarse.

Palabras clave: Aspas, Motocultor, Desgaste, Homologación, Normas.

ABSTRACT

The present work attacks the problem of low reliability of the blades of YTO DF-15L motocultor, it starting with the manufacture of an accelerated wear machine according to specifications of ASTM G-65 standard, to establish minimum homologation requirements of agricultural mechanization tools, in aspects such as: surface hardness, composition of the material, absorption of energy per unit area at impact essay, optimal geometry of the tool to efficiently support workloads in the field. These goals were achieved with a series of tests (destructive and non-destructive) to the blades, simulation in software CAD/CAE to determine the factors of its low reliability and attack the problem, among the previous solutions are: thermal treatments and enlargement of the cross section (final solution). The design, construction, calibration and validation of an accelerated wear machine according to ASTM G-65, was carried out to determine the blades wear rate, to finally deal with the minimum mechanical properties requirements that the blades should have to be built in Ecuador and / or imported.

Key words: Blade, Motocultor, Wear, Homologation, Mechanization, Norms.

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador no existe un procedimiento establecido que norme las especificaciones de conformidad para la importación y la fabricación nacional de herramientas de labranza agrícola. El instituto encargado de la materia, INEN solamente expide normas en otras categorías relacionadas (seguridad, simbología, ergonomía, etc.) pero no específicas en el tema de los requisitos fundamentales para validar la calidad del equipo, por ejemplo: propiedades mecánicas de los materiales, composición química,

dureza y volumen perdido. Las carencias de dichos documentos normativos han hecho que instituciones públicas y privadas como también personas naturales adquieran equipos agrícolas atraídos por la accesibilidad de los precios, pero sin sopesar la calidad, stock de repuestos y servicios para el equipo adquirido. La falta de calidad ha hecho que los equipos queden inutilizados desde su primer día de uso como es la rotura de las aspas del tren de labranza, tal es el caso de estudio de los motocultores modelo YTO DF-15L, sumado a ello la nula presencia de la firma en el país. El presente trabajo se orienta al diseño y construcción de una máquina de desgaste acelerado para homologación de maquinaria agrícola específicamente motocultores. Se desarrolla un caso de estudio en el motocultor modelo citado para concluir con un procedimiento genérico de homologación, que podría ser adoptado por el INEN.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los diferentes materiales y métodos que se utilizó para diseñar y construir una máquina de desgaste acelerado, así como también el caso de estudio de la baja fiabilidad de las aspas del motocultor y el proceso sugerido de homologación se basan en una serie de normas tanto nacionales como internacionales que permiten seguir un procedimiento estandarizado para adquirir resultados fiables y comparables con otras investigaciones relacionadas siendo los principales materiales:

1. Aspas del motocultor YTO DF-15L.
2. Software de dibujo y simulación.
3. Equipos para medición de dureza, composición química y pérdida de material.

El diseño del equipo es dirigido por la norma ASTM G-65, en cuanto a la arquitectura total sería difícil cambiar uno u otro componente ya que cada uno cumple una función específica en la máquina de desgaste.

2.1. Cálculo de la fuerza normal (FN)

Esta fuerza es la resultante de aplicar la carga P de 130N en el soporte de brazo de palanca del equipo como se puede ver a continuación en la Figura 1.

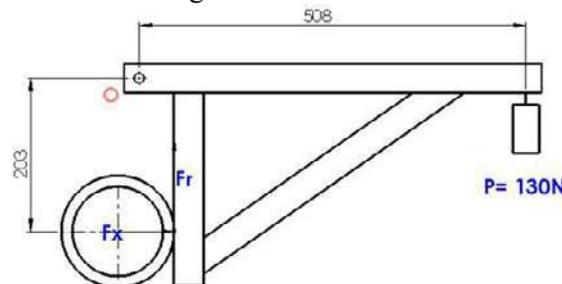


Figura 1. Soporte brazo palanca según del equipo.

Por lo tanto:

$$\sum M_0 = 0 \quad (1)$$

$$P(0,508m) - F_x(0,203m) = 0$$

$$F_x = (130N \cdot 0,503m) / 0,203m = 325N$$

2.2. Cálculo de la fuerza de rozamiento (FR)

Esta fuerza se opone al movimiento del disco giratorio y está dada por:

$$FR = \mu \cdot N \quad (2)$$

Donde, μ es el coeficiente de fricción entre la goma y el material de la probeta el cual es cercano al valor de 0,3 y N es la fuerza normal obtenida en el inciso anterior.

El valor del coeficiente de fricción entre caucho y acero se toma de la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Coeficiente de fricción entre dos materiales

Material de la banda de rodadura	Material base	Coefficiente de rozamiento
Acero forjado	Acero	0.019
Hierro fundido	Acero	0.021
Caucho duro	Acero	0.303
Poliuretano	Acero	0.03-0.057*
Nylon	Acero	0.027
Fenólicos	Acero	0.026

El poliuretano tiene un rango de valores de coeficientes dependiendo del material poli específico seleccionado

Por lo tanto:

$$FR = 0.3 \cdot (325 \text{ N}) \Rightarrow FR = 97,5 \text{ N}$$

Siendo estos los valores principales para el diseño y cálculo de esfuerzos sobre la máquina y la probeta; los valores del peso del abrasivo y del moto-reductor se los obtuvo en una balanza siendo 490 y 147 N respectivamente.

Por tanto, la máquina de desgaste acelerado según norma se puede visualizar en la Figura 2 a continuación:

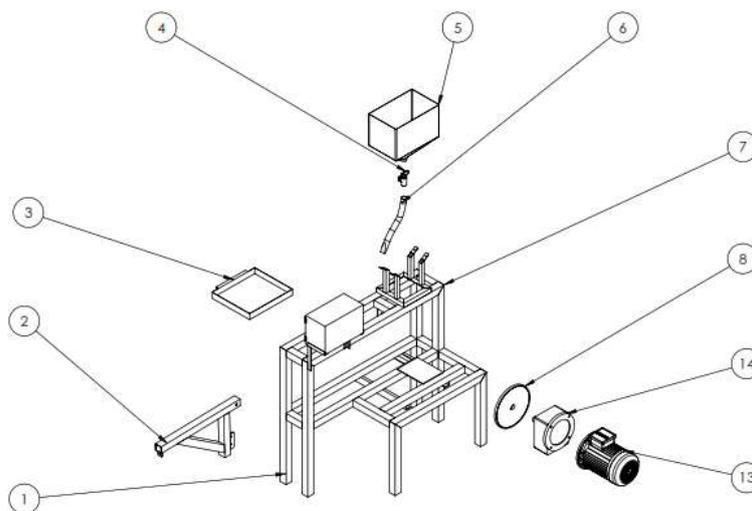


Figura 2. Equipo de desgaste acelerado

Dónde: 1 bastidor, 2 brazo palanca, 3 recolector de abrasivo, 4 llave de paso de abrasivo, 5 tolva, 6 boquilla de abrasivo, 7 soporte de tolva, 8 disco abrasivo, 13 motor de 1 Hp y 3600 rpm, 14 caja de reducción de $i=18$.

Seguidamente se diseñó la geometría de la estructura en un programa CAD, para insertar posteriormente las cargas y simular los esfuerzos de trabajo, siendo el perfil constructivo cuadrado de 2Plgx2mm de espesor. Se ingresan las cargas obtenidas, al pesar la tolva llena de abrasivo y del moto-reductor, siendo de 490N y 100N respectivamente como se observa en la Figura 3 a continuación. El tipo de empotramiento es fijo con 0 grados de libertad.

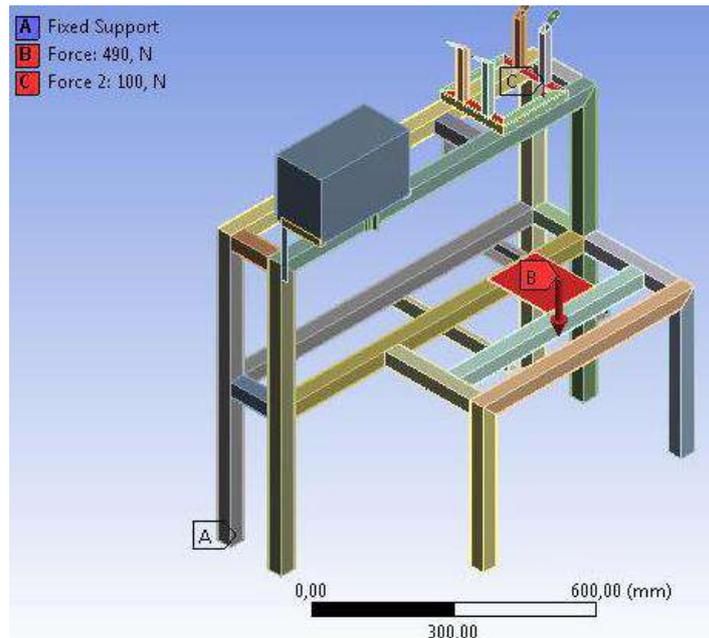


Figura 3. Aplicación de cargas sobre el bastidor.

2.3. Caso de estudio

Las propuestas de solución para el Caso de estudio de las aspas del motocultor YTO DF-15L han de ser viables desde el punto de vista económico y tecnológico.

A priori se ha pensado que la calidad del material del aspa, su dureza, su composición química y sus propiedades mecánicas inherentes son un factor preponderante en este estudio, por lo cual se llevan a cabo los ensayos de microscopía, dureza, espectrometría, tasa de desgaste e impacto.

Otro factor que incide en la problemática recae en los errores de fabricación (discontinuidad, porosidad, rechupes, etc.), para lo cual se realizaron ensayos de tintas penetrantes, y ultrasonido.

Un tercer factor es el diseño de la geometría del aspa, ya que comparando el aspa en estudio versus otras existentes en el mercado y usadas en la misma labor (procedencia colombiana, italiana y ecuatoriana), las segundas tienen un área en sección transversal en la relación 2,5:1. Para descartar el tercer factor se ha de modelar en CAD el aspa y luego someterla a ensayos virtuales aplicando vectores de carga tanto en magnitud, dirección, sentido y punto de acción lo más cercano a la realidad posible. Con los resultados de los ensayos se indaga y pondera cuál de los factores es el principal y/o principales para en función de ello proponer una solución tecnológicamente viable.

Ensayo Metalográfico: Realizado bajo la norma INEN NTE 1481, a las aspas de procedencia Colombia, Italia, China y Ecuador. Ensayo de impacto: Realizado en concordancia con la norma NTE INEN 5718 y ASTM D6110. Ensayo de desgaste acelerado: realizado bajo la norma ASTM G-65. Los resultados de desgaste vienen expresados en la ecuación 2, a continuación:

$$V_p = (P_i - P_f) / d * 1000 \quad (3)$$

Donde:

V_p = volumen perdido en mm³

P_i = peso inicial de la probeta en gramos (antes del ensayo de desgaste abrasivo)

P_f = peso final de la probeta en gramos (después del ensayo de desgaste abrasivo)

d = densidad del material.

2.4. Modelación y simulación de las aspas del motocultor

Es de vital importancia conocer algunos parámetros para lo simulación como:

- Resistencia específica del suelo en su condición más severa, en este caso suelo franco arcilloso con dos años de descanso y es de: 3768,50 kPa. [3].
- Fuerza media de arrastre de la máquina automotriz en su barra de tiro, cuyo valor es: 2758 N (dato del fabricante). [3]
- Material del aspa, que en este caso es un acero AISI 1030 y sus propiedades específicas, como se muestra en la Tabla 2, a continuación:

Tabla 2. Propiedades del acero AISI 1030

Propiedades físicas	Valor
Densidad	7.85 g/cc
Propiedades mecánicas	
Dureza, Brinell	149
Resistencia última a la tracción	525 MPa
Resistencia a la fluencia	345 MPa
Porcentaje de elongación	32 %
Módulo de elasticidad	206 GPa
Razón de Poisson	0.29

Fuente: ASKELAND (1998).

Los valores de las cargas a las que están sujetas las cuchillas se determinan como sigue:

Se emplea un método experimental diseñado por los autores el cual se basa en ubicar la cuchilla a una máxima penetración al suelo mediante un eje que pivota sobre dos elementos de sujeción. Luego se une un cable metálico con un dinamómetro conectado en serie, para finalmente tirar del cable y romper el suelo, obteniendo así la resistencia del suelo al rompimiento por el aspa, como se muestra en la Figura 4, a continuación:

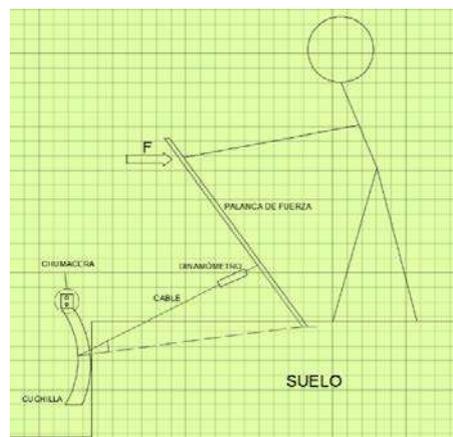


Figura 4. Bosquejado del método experimental.

Los resultados del ensayo son: 83.5 kgf para suelo franco y 84 kgf para suelo franco arenoso, la velocidad del rompimiento del suelo es de 0.38 m/s

La fuerza de tracción para una cuchilla viene dada por:

$$F = \mu * S \quad (4)$$

Donde,

F = Fuerza de tracción

μ = Resistencia específica del suelo

S = área de la cuchilla.

Velocidades netas del motocultor: La velocidad utilizada para el análisis será con primera marcha, se trabajará con esta velocidad porque es la recomendable para este tipo de suelo.

Velocidad 1ra marcha= 1.6 km/h

Cálculo del área: Para el análisis se debe tomar en cuenta el área de la cuchilla como indica la Figura 5, siendo:



Figura 5. Modelado del aspa en CAD

Seguidamente se puede aplicar la siguiente ecuación para obtener el área de contacto:

$$S=L \cdot A \quad (5)$$

Donde,

S1 = Área de contacto longitudinal de la cuchilla con el suelo.

S2 = Área de contacto transversal de la cuchilla con el suelo.

L = Longitud de la cuchilla o profundidad de trabajo.

A1 = Ancho de la cuchilla longitudinal

A2 = Ancho de la cuchilla transversal

Por lo tanto, la resistencia específica del suelo es,

$$S1=L \cdot A1 \quad \Rightarrow \quad S1=19\text{cm} \cdot 4\text{cm}$$

$$S1=76\text{cm}^2 \quad \Rightarrow \quad S2=L \cdot A2$$

$$S2=19\text{cm} \cdot 0,3\text{cm} \quad \Rightarrow \quad S2=5.7\text{cm}^2$$

Por lo tanto:

$$u=F/S=722.38\text{N} / (157.7\text{cm}^2)$$

$$u=4.58\text{N}/\text{cm}^2$$

Suelos en Chimborazo: Los suelos con mayor relevancia para el cultivo en la ciudad de Riobamba, son el suelo tipo franco y el tipo franco arenoso [3], en el cual se basará este análisis de fuerzas, para lo cual se tiene lo siguiente:

Análisis para suelo franco: Para encontrar la fuerza de tracción utilizada por la cuchilla se tomó en cuenta la siguiente fórmula. [6]

$$u=u_0+\lambda \cdot v^2 \quad (6)$$

Donde:

U0= Resistencia estática del terreno.

λ = Parámetro dependiente del tipo de suelo

v= Velocidad lineal de trabajo en Km/h

Resistencia específica del suelo: Para esto se tomó como referencia la resistencia general del suelo franco siendo: $\mu=3+0.020v^2$ [3], y particularizando para este proyecto se tiene:

$$u=u_0+0.020v^2 \Rightarrow 4.58=u_0+0.020*1.4^2$$

$$u_0=4.58-0.0392 \Rightarrow u_0=4.5\text{N/cm}^2$$

Con la resistencia específica del terreno estática se procede al cálculo de la fuerza de tracción con la velocidad que normalmente utiliza el motocultor en primera marcha siendo de 1.4Km/h, en el momento de trabajo del terreno para lo cual se tiene.

$$u=4.5+0.0512$$

$$F=(4.5\text{N/cm}^2+0.0512)*157.7\text{cm}^2$$

$$F=717.7\text{N}$$

Para el análisis en suelo Franco Arenoso se tiene lo siguiente:

$$u=u_0+0.013v^2 \Rightarrow 4.58=u_0+0.013*1.4^2$$

$$u_0=4.58-0.02548 \Rightarrow u_0=4.6\text{N/cm}^2$$

La fuerza de tracción en suelo franco arenoso es entonces:

$$u=4.6\text{N/cm}^2+0.03328$$

$$F=(4.6\text{N/cm}^2+0.03328)*157.7\text{cm}^2$$

$$F=730.7\text{N}$$

Obteniendo así una fuerza de tracción de la cuchilla para suelo franco de 717.7 N y para suelo franco arenoso de 730.7 N. valores que servirán para ingresar en el software de simulación como sigue en la Figura 6

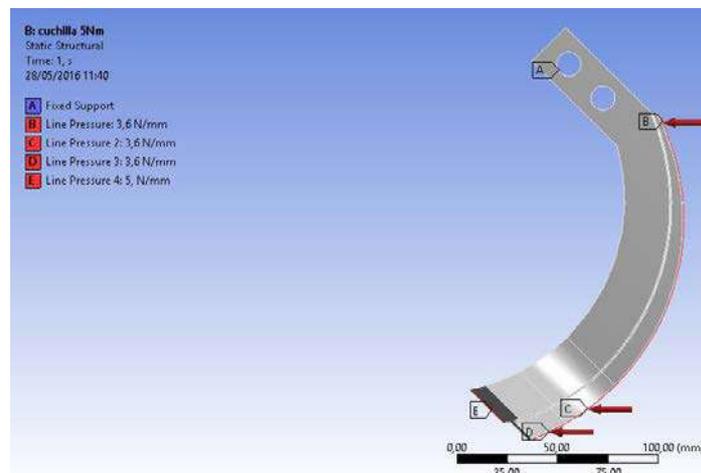


Figura 6. Ingreso de las cargas sobre el aspa

2.5. Normativas y homologación de aspas en Ecuador

Luego de realizar un exhaustivo análisis en busca de procesos de homologación o al menos normativas para maquinaria agrícola en el país, tanto en el ministerio del ramo o con el Instituto de Normalización no se encontró documento específico y/o explícito alguno con la temática, el INEN cuenta con algunas normativas derivadas íntegramente de las normas ISO, pero no específicamente de aperos de los requerimientos mínimos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha construido una máquina de desgaste acelerado empleando la norma ASTM G-65 como se visualiza en la Figura 7 a continuación, con las siguientes características:

- Cortina de abrasivo uniforme y constante con un caudal de 310 ± 10 g/min.
- El disco de abrasión gira a 192 rpm estando dentro del rango permisible (200 ± 10 rpm)
- El diámetro del disco de abrasión es de 9 pulgadas acorde a la norma.
- La dureza del recubrimiento de caucho del disco de abrasión es Shore A-60, estando dentro del rango permisible por la norma.
- El abrasivo fue secado a 1000C por una hora en un horno y tamizada según ensayo AFS50, con una abertura de malla de 0.297 mm.



Figura 7. Equipo construido según norma ASTM G-65

3.1. Caso de estudio: falla por fractura de las aspas del motocultor YTO DF-151

- Resultados metalográficos

La microestructura del material del aspa original de motocultor es de tipo ferrítico-perlítico. Se observa una distribución no-homogénea de carbono que se evidencia por zonas de granos acumulados. El tamaño de grano es G8.

Las aspas ecuatorianas reflejan martensita.

Las aspas de procedencia Italia refleja ferrita-perlita con un tamaño de grano G10.

Las aspas de procedencia Colombia refleja martensita revenida.

- Resultados de ensayos de dureza

Cuchillas chinas: $47,9 \pm 1,57$ HRC,

Cuchillas colombianas: $47 \pm 1,57$ HRC,

Cuchillas italianas: $45,2 \pm 1,57$ HRC,

Cuchillas ecuatorianas: $35 \pm 1,57$ HRC.

- Resultados de ensayo de espectrometría

La composición química de las muestras se visualiza en la tabla 3 a continuación:

Tabla 3. Composición química de las aspas

	China	Colombiana	Italiana	Ecuatoriana
C. (%)	0,29	0,23	0,20	0,49

Cr. (%)	0,06	0,35	0,44	0,01
Mn. (%)	0,96	1,18	1,37	0,448

- Resultados de ensayo de impacto

Los valores para este ensayo se resumen en la Tabla 4 a continuación mostrada:

Tabla 4. Absorción de energía por mm² de las muestras

Aspa	Valor K (J/mm ²)
China	0,24
Colombiana	0,61
Italiana	0,42
Ecuatoriana	0,24

Siendo las aspas de procedencia colombiana con menor tasa de desgaste.

- Resultados de desgaste acelerado

Los valores de desgaste en mm³ para cada una de las aspas se resume en la Tabla 5 a continuación:

Tabla 5. Volumen perdido promedio de las muestras

Aspa	Valor Vp (mm ³)
China	108,64
Colombiana	71,47
Italiana	96,87
Ecuatoriana	123,25

Es importante mencionar que las aspas de procedencia Colombia tienen la menor tasa de desgaste seguida de la italiana luego la china y finalmente la ecuatoriana o artesanal con una tasa de desgaste promedio de 123,25 mm³ siendo este valor muy alto para herramientas agrícolas.

- Resultados de las simulaciones a las aspas

Al analizar las cargas y los esfuerzos se llega a determinar que efectivamente la zona de fractura del aspa coincide con la simulación en el software de elementos finitos, tal como se puede observar en la Figura 8, donde además se muestra un aspa rota con una captura de pantalla del análisis:

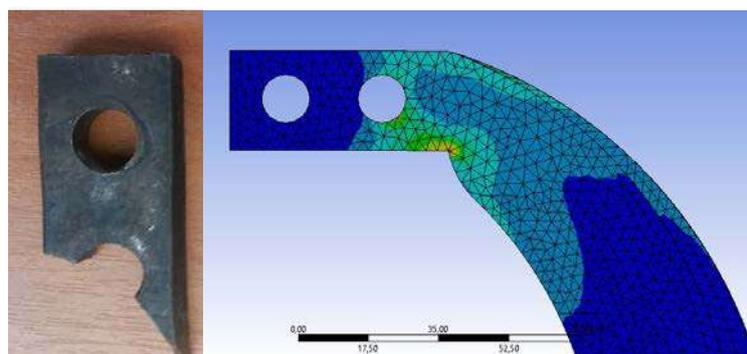


Figura 8. Comparación de la falla real y simulada

De la simulación se puede decir que hay dos razones principales para que el aspa llegue a fracturarse:

- La sujeción actúa como concentradores de esfuerzos
- La sección transversal del aspa es muy reducida.

3.2. Discusión

Los ensayos de dureza indican que existe una tendencia de los fabricantes a superar ligeramente al rango internacionalmente aceptado de dureza para herramental de maquinaria agrícola “los requerimientos básicos de un implemento agrícola para suelo normal son 38-45 HRC y alta resistencia a la abrasión ” [2], [3], como se puede observar las aspas chinas presentan una dureza media de 47,9 HRC; las aspas colombianas 47 HRC, las aspas italianas 45,2 HRC, siendo estos tres grupos quienes se encuentran cercanas más no así las aspas ecuatorianas que presentan 35HRC.

El ensayo de espectrometría es analizado a partir de la previa selección de tres elementos químicos fundamentales en el herramental agrícola como son: carbono, cromo y manganeso.

Carbono. - de los cuatro grupos experimentales, las aspas chinas, colombianas e italianas presentan una cantidad cercana de carbono 0,29%; 0,23% y 0,2% respectivamente; estando el grupo de aspas ecuatorianas lejos de este grupo al presentar 0,49%.

Cromo. - en este ítem se evidencia que las cuchillas chinas presentan una pobre presencia de este metal en su composición (0,06%) lo mismo para las aspas ecuatorianas 0,01%, de las cifras anteriores se puede deducir que, en concordancia con la teoría expuesta, las propiedades que dota el cromo a las herramientas agrícolas deben ser nulas en este grupo de aspas: en efecto 6 aspas chinas de cada 10 se rompen en las primeras horas de trabajo, determinando a priori una relación directa entre el porcentaje de cromo en el herramental y la duración de su vida útil. Las aspas italianas tienen un incremento considerable de este metal llegando a su concentración más alta de 0,44%, siendo las aspas colombianas las segundas en proporción con un 0,35%, es necesario indicar que para estos dos grupos de aspas no se ha presentado ningún problema de fracturas.

Con el análisis de los dos grupos anteriores se relaciona una vez más la presencia de cromo en un porcentaje importante $\approx 0,4\%$ (media entre 0,35 y 0,44) incremental la vida útil del aspa.

Manganeso: los porcentajes varían y van desde 0,45% para las aspas ecuatorianas; 0,96% para las muestras chinas; 1,18% presentan las aspas colombianas y finalmente 1,37% las herramientas italianas, se puede observar que a mayor presencia de manganeso se tiene una mayor vida útil de las aspas siendo el umbral mínimo de porcentaje de 1,18% que para cuestiones de redondeo numérico se lo puede generalizar en $\approx 1,2\%$.

En los ensayos de impacto realizados a las probetas se evidencian dos valores medios iguales en el valor de k (J/mm^2) para las aspas ecuatorianas y chinas, es decir que en promedio las dos muestras absorben la misma cantidad de energía por unidad de área antes de llegar a romperse cuyo valor es $0,24 J/mm^2$; el aspa italiana presenta un valor de $0,42 J/mm^2$, mientras que el aspa colombiana presenta un índice de $0,61 J/mm^2$. De las cifras anteriores se puede decir que el ensayo de impacto ayuda a corroborar que la presencia de Cromo y Manganeso en las aspas dota a éstas de propiedades fundamentales para el herramental agrícola, como es incrementar: la resistencia a la tensión, dureza, resistencia al desgaste, el límite elástico, y lo más importante en este ensayo como su nombre mismo lo indica la presencia de cromo específicamente aumenta la resistencia al impacto (tenacidad). Los ensayos de desgaste acelerado muestran diferentes tasas de volumen de material perdido en el ensayo, para el grupo chino se tienen un valor medio de $108,64 mm^3$; para las muestras colombianas un sensible valor menor de $71,47 mm^3$; un valor de $96,87 mm^3$ para las muestras italianas y finalmente una alta tasa media de $123,25 mm^3$ para las aspas ecuatorianas. De la información anterior se puede verificar que a mayor presencia específica de cromo y manganeso también es mayor la resistencia al desgaste del herramental. Las aspas que posean en su composición química un valor mínimo aproximado a $0,4\%$ de Cromo y $1,2\%$ de Manganeso serán las que presenten una mayor vida útil como consecuencia de fortalecer las propiedades

inherentes a estos metales como son: aumentar la resistencia a la tensión y al desgaste, incrementa el límite elástico, mejora la tenacidad y específicamente incrementa la resistencia al impacto en el caso del cromo y ayuda en la ductilidad y a estructurar el material en grano más fino exclusivamente el manganeso, por consiguiente es insustituible la presencia de estos elementos químicos (y su porcentaje) en la composición de aspas para motocultores. Las aspas chinas, colombianas, e italianas fueron diseñadas en cuanto a su material para cumplir la función específica de labrar el suelo, muestra de ello es su tendencia a presentar un valor de dureza entre 45,2 y 47,9 HRC mientras que las aspas ecuatorianas tienen una dureza lejana de 35 HRC que sin embargo está en el umbral estándar de dureza, la razón puede encontrarse en que el material de que fueron fabricadas las aspas artesanales fue acero reciclado de resortes de ballesta automotriz que obviamente tiene una composición totalmente distinta de los otros tres grupos, aquello se evidencia también en los resultados de espectrometría y desgaste.

En un contexto macro, se puede encontrar dos publicaciones relacionadas directamente con la presente investigación y a las cuales se las cita en algunas ocasiones: “Caracterización de desgaste y propiedades metalúrgicas para el desarrollo de acero de calidad agrícola adecuado en condiciones específicas del suelo” (A. Bhakat, A. Mishra), su trabajo delimita y concuerda con la presente investigación en encontrar un rango mínimo de dureza para el herramental agrícola el mismo que oscila entre 38-45 HRC para la investigación extranjera y siendo un valor medio de dureza de las aspas presentes en el Ecuador de 43,8 HRC; en la misma publicación se recomienda que además del rango de dureza mínimo para grado agrícola, éste material ha de presentar “alta resistencia a la abrasión”, en este apartado se ha generalizado que para dotar de esta propiedad específica al material se ha de tener como pre-requisito la presencia de cromo en un 0,4% y de manganeso en un 1,2% en la composición total del material. El presente trabajo es inédito en el país en cuanto a estudio de factores que inciden en la fiabilidad de aspas o literatura relacionada para motocultores tanto en un espectro general como específico para el modelo YTO DF 151, la única documentación relacionada en pocos aspectos es la Norma NTE INEN ISO 5718. A continuación, se presenta la Figura 9, donde se puede observar los resultados de Volumen Perdido Promedio (VPM), Dureza y Absorción de energía de las diferentes muestras de aspas que se comercializan en Ecuador.

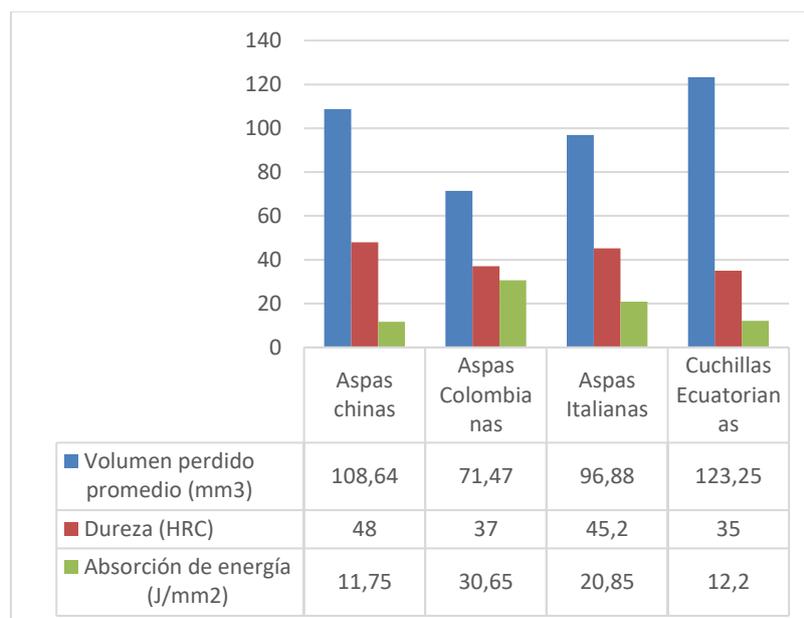


Figura 9. Resultados de los ensayos más relevantes.

Se llega a determinar que las causas del bajo índice de fiabilidad de las aspas originales (chinas) del motocultor YTO DF 151 son dos: Primero la insuficiente sección transversal del aspa en la región cercana a los agujeros de sujeción, los mismos que actuaron como concentradores de esfuerzos y en segunda instancia el ensayo de espectrometría indica que hay una pobre presencia de cromo y manganeso en las aspas: 0,06 y 0,96% respectivamente, muy lejos del valor referencial recomendado 0,4 y 1,2% para cada uno.

3.3. Solución al caso específico de estudio

Dotar al aspa de una mayor sección transversal a través del método de añadidura de material el mismo que consiste en soldar en la zona de fractura una varilla de acero A36 y recubrirlo con cordón de soldadura de arco tradicional con electrodo 6011 como se puede ver en la Figura 10, los resultados han sido excelentes dando un total de roturas de 0, pero hay que considerar que las aspas se van desgastando rápidamente lo que lleva a prevenir que en un corto tiempo de vida útil se llegará al límite de desgaste.



Figura 10. Aspas añadidas material

La homologación de la maquinaria agrícola conlleva algunas etapas, unas que son aplicables y otras que no, todo depende de la clase de maquinaria agrícola, la envergadura, el trabajo específico y su potencia.

El procedimiento para la adquisición de maquinaria agrícola específicamente aspas es:

- Realizar un ensayo de dureza: mínimo 40 HRC.
- Ensayo metalográfico al elemento de trabajo agrícola (aspas).
- Ensayo de desgaste acelerado según la NORMA ASTM G-65 y verificar que la tasa de desgaste esté cercana a: 80 mm³
- Realizar un ensayo de flexión si aplica la norma y verificar que en la zona flexionada no presente grietas visibles.
- Practicar un ensayo de impacto como requerimiento mínimo en su índice K (Energía sobre área) se ha de tener mínimo 0,5 J/mm².

4. CONCLUSIONES

Se analizó las cuchillas del motocultor en estudio determinando propiedades inherentes al material como: caracterización metalográfica (ferrítico-perlítico), tamaño de grano G8, resultados generales de espectrometría (acero AISI 1030), dureza de 47,5 HRC y tasa de desgaste de 126mm³, con un factor de absorción de energía de 0.235 J/mm²; considerándose que la tasa de desgaste acelerado no reúne los requisitos mínimos para estar dentro de la categoría de material agrícola.

Se determinó la solución para la ruptura de las aspas, a través de añadidura de material por soldadura en la parte más crítica del material (geometría) indicada por el software ya que por otros tipos de tratamientos superficiales y térmicos no resulta factible.

El equipo construido según la Norma ASTM G-65, tiene las siguientes características: el flujo de abrasivo es 310 g/min, la velocidad de rotación del disco abrasivo es 192 rpm, y la dureza del recubrimiento de caucho del disco de abrasión es Shore A60, cumpliendo todos los parámetros de construcción de la norma.

Se realizaron ensayos de desgaste acelerado a diferentes muestras de cuchillas cuyo promedio es: para las cuchillas de procedencia china (108.64 mm³), italiana (71.47 mm³), colombiana (96.89 mm³) y de fabricación nacional (artesanal o material alternativo 123.25 mm³), pudiendo observarse que la tasa de desgaste de las aspas chinas es excesivamente grande para un material de aplicaciones agrícolas.

Los ensayos y los valores mínimos para homologar aspas de motocultores en Ecuador son: metalografía, de desgaste acelerado (con un valor ≤ 100 mm³), dureza (entre 38 y 45 HRC), flexión (ángulo menor a 45°) e impacto (≥ 0.5 J/mm²).

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesionales que hicieron posible este trabajo investigativo, en especial al Dr Alfredo Valarezo, Ing. Mario Pastor, Ing. Segundo Sagñay, Grupo de Investigación GDP y docentes técnicos que aportaron con sus conocimientos.

REFERENCIAS

1. Cañavate, O. Las máquinas agrícolas y su aplicación. 7° ed. Madrid: Mundiprensa; 2012
2. Perez, Gonzales, Toro. 2010. Desgaste abrasivo de cuchillas de arado rotativo en un suelo franco arenoso. DYNA. 77: 105 – 114.
3. ASTM: Standard test method for measuring abrasion using the dry Sand/Rubber wheel apparatus. 2016. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/G65.htm>
4. Hamilton. Rolling resistance and industrial wheels. 2014. Disponible en: <http://www.hamiltoncaster.com/Portals/0/blog/White%20Paper%20Rolling%20Resistance.pdf>
5. Cunalata C. Cuantificación de carbono total almacenado en suelos de paramos en las comunidades Shobol-Chimborazo. 2012. Chimborazo.
6. Cañavate, O. Tractores. Técnica y seguridad. 2° ed. Madrid: Mundiprensa: 2014.
7. Allauca A. Morejón H. Estudio de los factores que inciden en la baja fiabilidad del elemento de labranza de un motocultor YTO DF-15L. Chimborazo – ESPOCH. 2016

Análisis del impacto del sistema de aire acondicionado automotriz sobre el consumo energético y las emisiones de CO₂ en trayectos extraurbanos

(Analysis of the automotive air conditioning system impact on the energy consumption and CO₂ emissions in extra-urban journeys)

Daniela C. Vásquez-Núñez^{(1)*}, Jorge Payá⁽¹⁾, José González-Maciá⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

* Correspondencia. Tel: +34 602088266, E-mail: davas197@gmail.com (D. C. Vásquez-Núñez)

RESUMEN

El sistema de aire acondicionado automotriz tiene como objetivo mantener el interior del vehículo en condiciones de confort térmico controlando la temperatura y humedad del aire interior. Sin embargo, su funcionamiento impone una carga extra al motor del vehículo y consecuentemente incrementa el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. El presente artículo estudia el impacto del sistema de aire acondicionado automotriz sobre el consumo energético y las emisiones de CO₂ en trayectos extra-urbanos. Se emplea un modelo de cálculo que integra tres sub-modelos, (1) un modelo térmico dinámico de la cabina de un autobús, el cual considera diferentes ganancias térmicas y la variación de las condiciones ambientales a lo largo del trayecto; (2) un modelo detallado del equipo de aire acondicionado automotriz, que calcula las prestaciones del equipo en función de las condiciones de operación (temperaturas de evaporación y condensación, velocidad del compresor), y (3) un modelo para estimar el consumo energético y las emisiones de CO₂ producidas durante el trayecto. En el estudio se considera un autobús de 50 pasajeros que realiza el trayecto Guayaquil-Manta. Los resultados muestran que, a una velocidad del compresor de 1500 rpm, el autobús consume 7.4 litros de combustible (diésel) y emite 19.7 kg de CO₂ debido al funcionamiento del sistema de aire acondicionado.

Palabras clave: aire acondicionado, cargas térmicas, modelo dinámico, consumo de energía, emisiones de CO₂, autobús.

ABSTRACT

The automotive air conditioning system aims to maintain the interior of the vehicle in thermal comfort conditions by controlling the temperature and humidity of the indoor air. However, its operation imposes an extra load on the vehicle's engine and consequently increases fuel consumption and greenhouse gas emissions. This paper studies the impact of the automotive air conditioning system on energy consumption and CO₂ emissions in extra-urban journeys. A calculation model that integrates three sub-models is used, (1) a dynamic thermal model of a bus cabin, which considers different thermal gains and the variation of environmental conditions along the route; (2) a detailed model of the automotive air conditioning equipment, which calculates the performance of the system as a function of the operating conditions (evaporation and condensation temperatures, compressor speed), and (3) a model for estimating energy consumption and the CO₂ emissions produced during the journey. The study considers a 50-passenger bus that travels the Guayaquil-Manta route. The results show that, at a compressor speed of 1500 rpm, the bus consumes 7.4 liters of fuel (diesel) and emits 19.7 kg of CO₂ due to the operation of the air conditioning system.

Keywords: air conditioning, thermal loads, dynamic model, energy consumption, CO₂ emissions, bus.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de aire acondicionado (A/C) es uno de los equipos auxiliares más importantes de los vehículos. Este sistema es el responsable del confort térmico de los pasajeros, el cual mantiene la temperatura del aire interior del vehículo y su humedad relativa en niveles adecuados para los pasajeros. Sin embargo, el funcionamiento del sistema A/C incrementa el consumo de energía en los vehículos y consecuentemente las emisiones de gases de efecto invernadero.

El consumo energético del sistema A/C depende principalmente de dos factores, la demanda térmica y la eficiencia del sistema. La demanda térmica de un vehículo depende de las condiciones ambientales (temperatura ambiente, humedad del aire y radiación solar), las ganancias por ocupación (número de pasajeros), infiltraciones, equipos auxiliares, la temperatura interior deseada y en menor medida, de otros factores como la velocidad del aire y los ciclos de conducción. Por otro lado, la eficiencia del sistema A/C depende del diseño y dimensionamiento de los componentes del ciclo de compresión de vapor (intercambiadores de calor, compresor, dispositivo de expansión, etc.).

Con el objetivo estimar el consumo de energía del sistema A/C se han realizado varios estudios que se han enfocado en el modelado térmico de la cabina de vehículos para determinar la demanda de refrigeración. Otros estudios se han centrado en el modelado del sistema A/C para evaluar su eficiencia. Lambert et al. [1] informó que el compresor mecánico del sistema A/C incrementa el consumo de combustible del vehículo en un 12- 17% en vehículos medianos (sedan y SUV). Khayym et al. [2] presentó un sistema de gestión de energía coordinado para reducir el consumo de energía del sistema de aire acondicionado de un vehículo, manteniendo el confort térmico. Para ello desarrolló un modelo de la cabina de un vehículo considerando diferentes cargas térmicas, incluyendo el calor emitido por el motor del vehículo. El modelo de la cabina fue utilizado para calcular la demanda frigorífica que posteriormente se utilizó para estimar el consumo del sistema A/C. He et al. [3] desarrolló un modelo predictivo para el control del equipo A/C. Utilizó el método de balance de calor para determinar la demanda frigorífica, y un modelo simplificado para el cálculo del consumo del sistema A/C que consiste en un funcional dependiente de la potencia del compresor a una velocidad determinada y de la temperatura de confort en el interior de la cabina. Dullinger et al. [4], acopló un modelo térmico de la cabina de un vehículo y un modelo estacionario del sistema A/C para calcular su consumo de energía. Las prestaciones del sistema fueron ingresadas directamente al modelo en función de las condiciones de trabajo (temperatura de evaporación y condensación, velocidad del compresor), sin embargo, no se desarrolló un modelo del ciclo de compresión de vapor utilizado con la descripción de sus componentes. Mastrullo et al. [5] presentó un modelo simplificado de la cabina de un vehículo para simular la evolución de la temperatura dentro de la cabina y un modelo de bomba de calor reversible con el compresor funcionando a dos frecuencias, para determinar el consumo de energía y el Total Equivalente del Impacto en el Calentamiento (TEWI siglas en inglés) respectivo al variar el refrigerante del sistema.

No obstante, tras la revisión de literatura, los trabajos previos no consideran un modelo detallado del sistema A/C acoplado a un modelo transitorio de la cabina de un vehículo para evaluar el consumo energético del sistema A/C y estimar las emisiones de CO₂ consecuencia de su funcionamiento. En el presente artículo se analiza el impacto del sistema de aire acondicionado automotriz sobre el consumo energético del vehículo y las emisiones de CO₂, cuando el vehículo recorre un trayecto determinado entre dos ciudades. Para ello se ha utilizado una metodología de cálculo que considera un modelo térmico transitorio de la cabina de un vehículo y un modelo detallado del sistema A/C. La metodología utilizada toma en cuenta la variación de las condiciones ambientales dentro del trayecto extraurbano en función del tiempo, la posición y la orientación del vehículo. Los resultados muestran la variación de la demanda térmica, la capacidad frigorífica del sistema y el coeficiente de funcionamiento (COP) a lo largo del trayecto Guayaquil-Manta. Finalmente se muestra la estimación de las emisiones de CO₂ y los litros de combustible debido al funcionamiento del sistema A/C.

2. METODOLOGÍA

En el presente estudio se utilizó un modelo de cálculo del consumo energético y las emisiones de CO₂ del sistema A/C de vehículos según la referencia [6]. El modelo consta de tres submodelos. El submodelo 1 es un modelo térmico dinámico de un vehículo [7], el submodelo 2 es un modelo detallado de un sistema A/C automotriz y el

submodelo 3 calcula el consumo energético y las emisiones de CO₂. La Figura. 1 muestra las variables de entrada del modelo general y la interacción entre los tres submodelos antes mencionados.

Las entradas del modelo son las características geométricas y constructivas del vehículo, el número de pasajeros, el trayecto que va a recorrer el vehículo (ciudad de origen y destino) y las condiciones de confort, las cuales, según ASHRAE [8], deben asegurar en el interior de la cabina del vehículo una temperatura interior entre 16 °C a 27 °C y una humedad relativa entre el 30% al 70% [9].

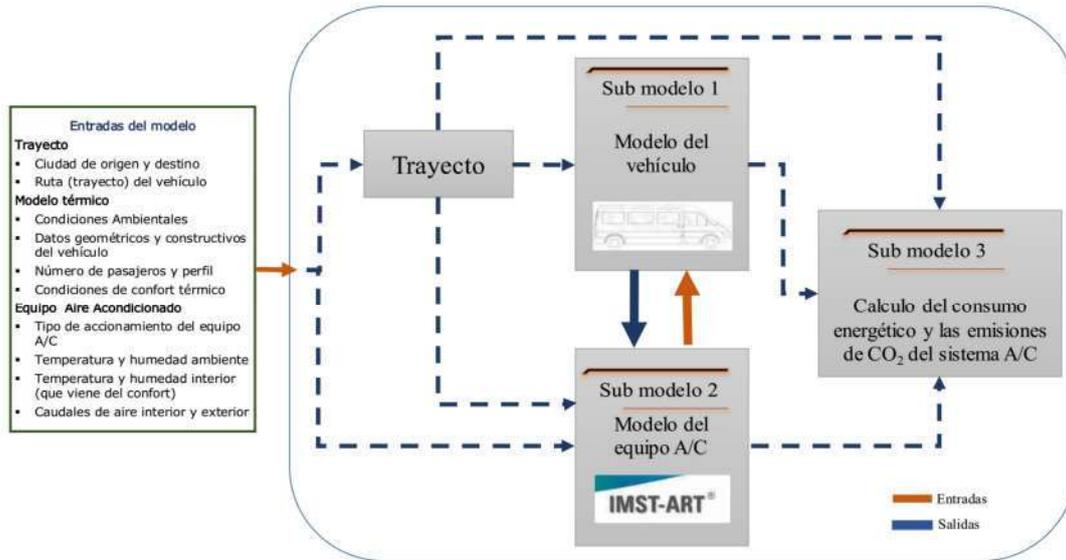


Figura. 1. Esquema general del modelo de cálculo consumo energético y emisiones de CO₂ del sistema A/C de vehículos.

El modelo térmico del vehículo (**submodelo 1**) calcula la demanda de refrigeración para mantener el interior de la cabina en condiciones de confort térmico de acuerdo a la temperatura de consigna establecida. El modelo considera diferentes ganancias térmicas debidas a la radiación solar directa, radiación solar difusa, radiación reflejada, temperatura ambiente, infiltraciones, equipos auxiliares y la carga térmica emitida por las personas en el interior del vehículo. Además, considera los cambios de dirección que el vehículo toma a lo largo de un trayecto debido a que estos cambios afectan la incidencia de la radiación solar sobre cada una de las superficies del vehículo [7]. Este modelo fue implementado en el programa Trnsys [10], y es capaz de predecir la evolución de la temperatura del aire interior del vehículo con una desviación máxima de ± 1.5 K [7].

A lo largo del trayecto la temperatura ambiente y la incidencia de la radiación solar sobre las superficies del vehículo varían dependiendo de la dirección y la posición del vehículo. El modelo calcula la radiación solar global, directa, difusa y reflejada que incide sobre cada superficie en función de su acimut a lo largo del trayecto. El acimut es el ángulo que se forma entre el plano perpendicular a la superficie del vehículo y el eje sur.

Para determinar la dirección del vehículo a lo largo del trayecto, se utilizaron las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) del vehículo durante el trayecto entre el lugar de origen y destino. Debido a que las coordenadas UTM del vehículo son infinitas durante un recorrido, se seleccionan los puntos en los cuales el vehículo tiene cambios significativos de dirección, de tal forma que se divide el trayecto en varios tramos. Posteriormente se calcula la dirección del vehículo en cada tramo utilizando las ecuaciones de cálculo de distancia entre dos puntos y su ángulo con respecto a un eje de referencia.

Para la estimación de la temperatura y la radiación solar que inciden sobre las superficies de la cabina del vehículo durante un trayecto, se utilizó un archivo de datos meteorológicos TMY2 (Typical Meteorological Year) de la

ciudad de origen y de destino. Los datos climatológicos se interpolan en función de la posición del vehículo durante el trayecto.

El modelo del sistema A/C (**submodelo 2**) se implementó en el programa IMST-ART®, el cual fue desarrollado por el Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia [11]. El sistema A/C es un ciclo de compresión de vapor usado para enfriar y deshumidificar el aire de un habitáculo, el cual consta básicamente de cuatro componentes, compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. Se utilizaron datos de catálogo para modelar los diferentes componentes del equipo. El compresor utilizado para el caso de estudio es un compresor de pistones de velocidad variable, de 550 cm³ de cilindrada, el rango de velocidades de trabajo es de 500 a 3500 rpm. El fluido refrigerante utilizado es R-134a. Se consideró un intercambiador de tubos y aletas para el condensador y evaporador. El modelo detallado sistema de aire acondicionado proporciona los mapas de prestaciones del equipo para diferentes condiciones de trabajo (temperaturas, caudales y humedad de los focos frío y caliente, régimen de giro del compresor).

El **submodelo 3** integra el modelo térmico del vehículo con el modelo detallado del sistema A/C para calcular la capacidad frigorífica, el consumo energético y el COP del sistema en cada paso de tiempo a lo largo del trayecto. Las entradas del submodelo 3 son la demanda frigorífica, la humedad relativa del aire interior, la temperatura del aire ambiente (temperatura del fluido secundario que pasa a través del condensador), la temperatura del aire interior de la cabina (temperatura del fluido secundario que pasa a través del evaporador), ver Figura. 1. En un vehículo convencional, con motor de combustión interna, el compresor del sistema A/C es accionado mediante un sistema de transmisión por bandas o correas desde el cigüeñal del motor a través de una polea electromagnética. Por lo que la velocidad del compresor del sistema A/C está determinada por la velocidad a la que gira el motor de combustión interna.

Debido a que la capacidad frigorífica producida por el sistema A/C puede ser mayor a la demanda de refrigeración necesaria para mantener la cabina del vehículo en condiciones de confort térmico, se calculó el factor de encendido del equipo A/C para que la capacidad frigorífica se ajuste a la demanda, de modo que se pueda determinar el consumo real del equipo de A/C. El factor de encendido se define mediante la Ec. (1), donde \dot{Q}_c = capacidad frigorífica [kW], F_{ON} = factor de encendido.

$$F_{ON} = \frac{\dot{Q}_{c,demanda}}{\dot{Q}_c} \quad (1)$$

El consumo medio del compresor en los ciclos de encendido-apagado se calcula con la Ec. (2), donde \dot{E}_m = consumo medio [kW]; \dot{E} = consumo instantáneo [kW]. El COP del sistema se define mediante la Ec. (3).

$$\dot{E}_m = F_{ON} \dot{E} \quad (2)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{E}} \quad (3)$$

La energía consumida por el sistema el sistema A/C se calcula con le Ec. (4), donde E = energía consumida por compresor durante el trayecto [kWh].

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \dot{E}_m dt \quad (4)$$

Para analizar las emisiones de CO₂ producidas por el sistema A/C de un vehículo, se debe considerar la energía consumida por el compresor del sistema A/C y toda la cadena de transformación energética hasta la fuente primaria de energía (combustible). En un vehículo convencional, la cadena de transformación de energía comienza en el motor de combustión interna, el cual transforma la energía química del combustible en energía térmica, a partir de la cual se obtiene energía mecánica en el cigüeñal. Posteriormente, existen pérdidas en la transmisión mecánica en las bandas que conectan el cigüeñal del motor al compresor del sistema A/C. Por lo tanto, la energía total

consumida por el sistema A/C se calcula con la Ec. (5), donde E_{tot} =energía total [kWh]; η_{MCI} =eficiencia del motor de combustión interna; η_{trans} = eficiencia de la transmisión por bandas.

$$E_{tot} = \frac{E}{\eta_{MCI} * \eta_{trans}} \quad (5)$$

Una vez calculada la energía total del consumida por el sistema A/C, ésta se debe expresar en litros de combustible mediante la Ec. (6), donde P_c es el poder calorífico del combustible [kWh/kg]; ρ es la densidad [kg/m³].

$$l_{combustible} = \frac{E_{tot}}{1000 * P_c_{combustible} * \rho_{combustible}} \quad (6)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio se consideró un autobús de 50 pasajeros, las dimensiones del autobús, materiales (superficies opacas y transparentes) se han obtenido de acuerdo a la literatura estudiada y datos de fabricantes de autobuses ([12], [13]). La temperatura de consigna en el interior del vehículo es de 22 °C. En este estudio se consideraron tres velocidades de giro del compresor (1500, 2000, 2500 rpm), las cuales representan velocidades medias típicas de un compresor en un vehículo convencional según la literatura ([14], [15],[16]).

El autobús realiza el trayecto de Guayaquil a Manta. El recorrido inicia a las 13h00 desde Guayaquil y llega a Manta a las 16h20min a una velocidad media del vehículo de 60 Km/h. El día de simulación seleccionado es el 2 de enero. Una vez establecidas las ciudades de origen y destino, se determina la ruta del autobús a lo largo del viaje. La ruta Guayaquil - Manta se obtuvo de la base de datos de Google Maps [17], el cual se ha dividido en 11 tramos, considerando los puntos representativos en los cuales el vehículo cambia de dirección, como se observa en la Figura.

Para cada tramo del trayecto se calcula el acimut de cada superficie para estimar de la incidencia de la radiación solar sobre cada una de ellas. Además, se calculó la variación de las condiciones climáticas (radiación y temperatura) dependiendo de la posición geográfica del vehículo en cada tramo.

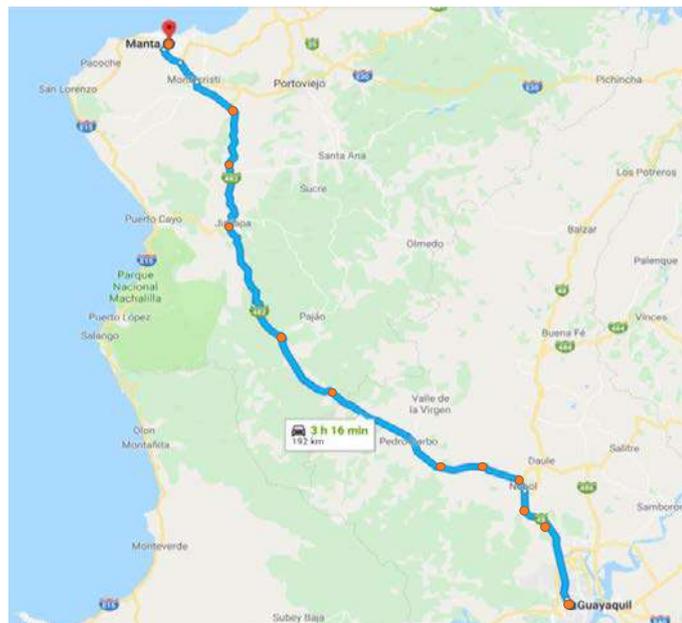


Figura. 2. Ruta Guayaquil – Manta [17].

La Figura. 3 muestra la variación de las condiciones climáticas (temperatura ambiente y radiación solar) que inciden sobre el autobús en función de la posición que éste toma durante el trayecto. Al inicio del trayecto la temperatura y radiación solar coinciden con los valores correspondientes a la ciudad de origen (Guayaquil), y a lo largo del trayecto los valores estimados se acercan a los correspondientes de la ciudad de destino (Manta).

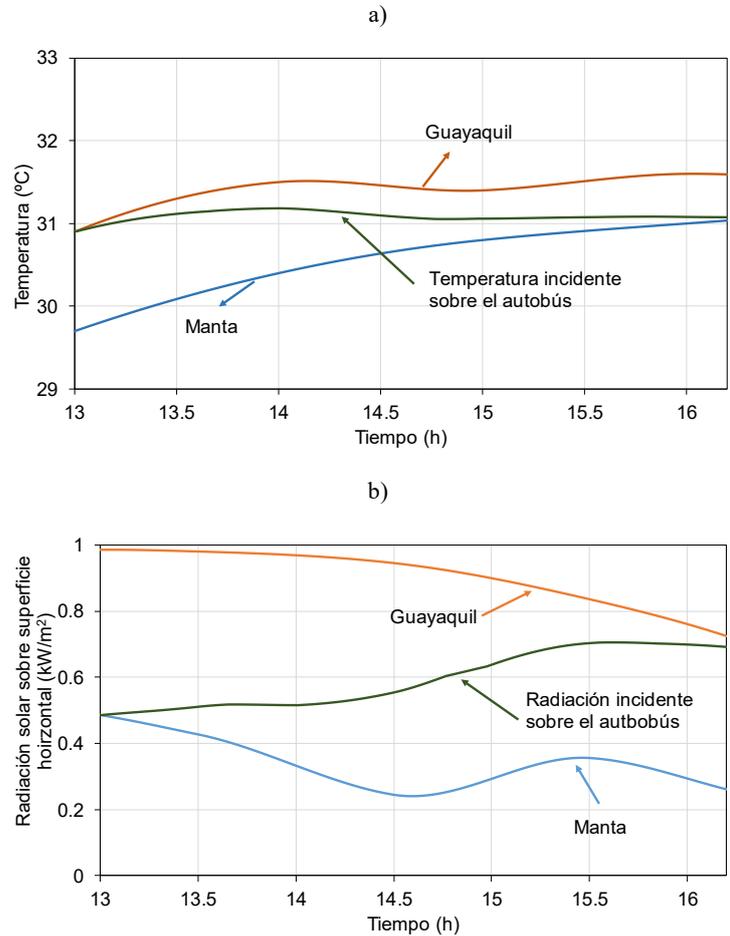


Figura. 3. Variación de las condiciones climáticas con la posición del vehículo dentro del trayecto Guayaquil-Manta. a) Temperatura ambiente. b) Radiación solar sobre superficie horizontal.

La Figura. 4 muestra los diferentes acimuts de las superficies verticales del autobús en cada tramo del trayecto Guayaquil-Manta. Los acimuts de las superficies tienen una diferencia de 90° debido a que son perpendiculares entre sí en el plano horizontal. El acimut tiene como referencia (0°) la dirección sur y los ángulos positivos van en sentido horario (90° Oeste, 180° Sur y 270° Este).

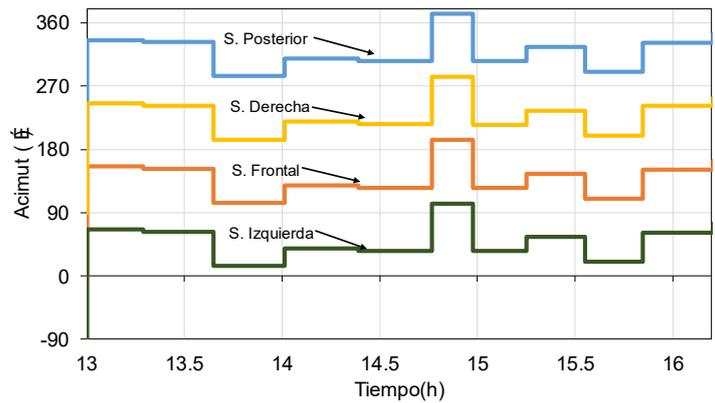


Figura. 4. Acimut de las superficies del vehículo durante el trayecto Guayaquil – Manta.

3.1. Demanda frigorífica del autobús en el trayecto Guayaquil-Manta

La Figura. 5 muestra la demanda de refrigeración a lo largo trayecto. La variación de la demanda frigorífica se debe principalmente a la variación de la radiación incidente sobre el autobús (ver Figura. 3b). La demanda frigorífica varía entre 12 kW y 15 kW durante el trayecto.

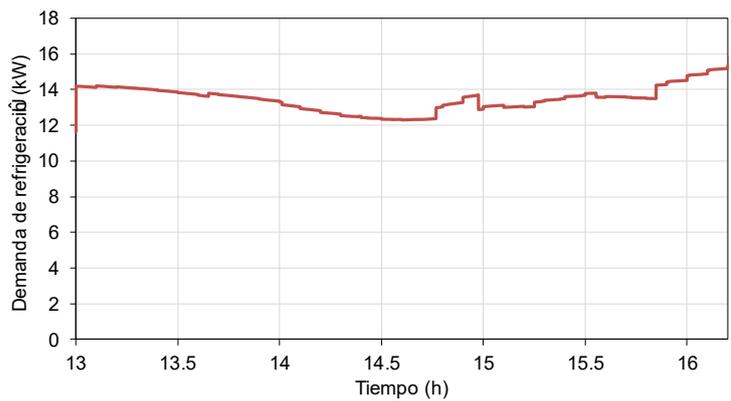


Figura. 5. Demanda de refrigeración del autobús durante el trayecto Guayaquil – Manta.

3.2. Estimación de la capacidad frigorífica del sistema de A/C.

Una vez que se determinó la demandan frigorífica en el sub-modelo 1, el sub modelo 2 calcula la capacidad frigorífica del sistema A/C, el consumo del compresor a lo largo del trayecto y el COP del sistema. Como se mencionó anteriormente, la capacidad frigorífica del sistema A/C se evaluó para tres regímenes de velocidades del compresor (1500, 2000, 2500 rpm). La Figura. 6 muestra la capacidad frigorífica que el equipo produce a varias revoluciones del compresor durante el trayecto. Se puede observar que la capacidad frigorífica es proporcional a la velocidad del compresor.

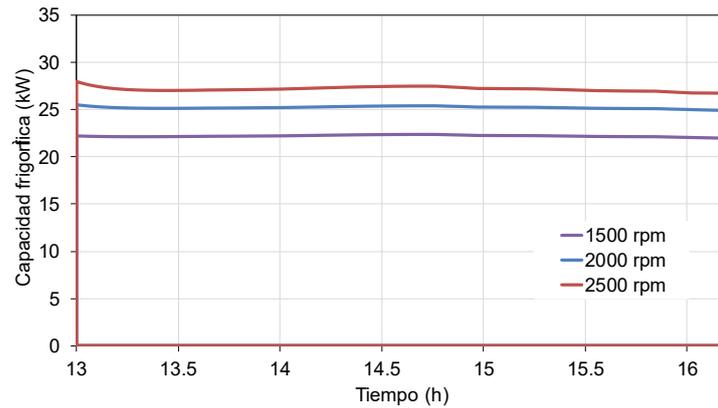


Figura. 6. Capacidad frigorífica del sistema A/C para varias velocidades del compresor (trayecto Guayaquil-Manta).

Al variar la velocidad del compresor del sistema A/C, se produce un reajuste en los parámetros de operación del sistema como el flujo másico de refrigerante, las presión y temperaturas del refrigerante en la entrada y salida de los elementos del sistema, lo cual produce un aumento de la capacidad frigorífica al aumentar la velocidad del compresor. La capacidad frigorífica varía entre 22 kW y 28 kW durante el trayecto dependiendo de la velocidad del compresor.

3.3. Cálculo del factor de encendido del sistema A/C

En la Figura. 7 se muestra el factor de encendido del sistema A/C durante el trayecto para las tres velocidades del compresor. El factor de encendido varía entre 0.6 y 1 durante el trayecto dependiendo de la velocidad del compresor.

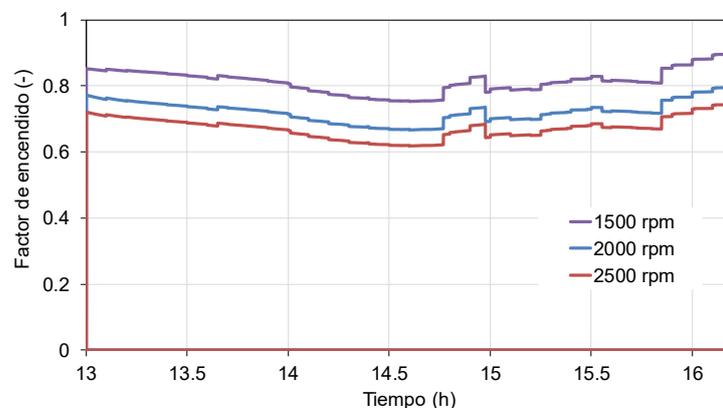


Figura. 7. Factor de encendido del equipo de A/C.

3.4. Cálculo del consumo energético medio del sistema A/C.

En la Figura. 8 se muestran los consumos medios del compresor durante el trayecto para distintas velocidades del compresor, siendo los consumos más altos los correspondientes a la mayor velocidad del compresor.

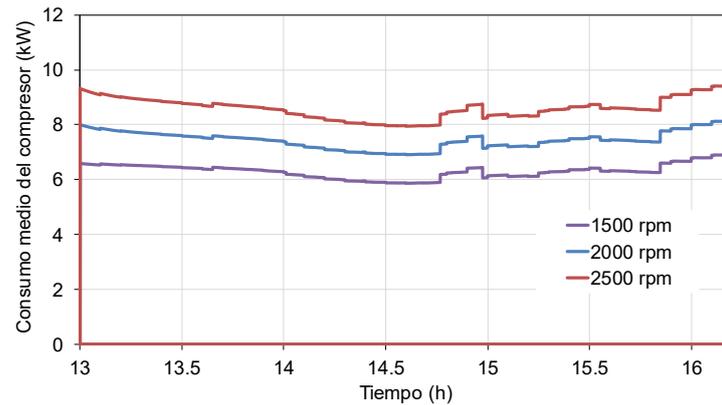


Figura. 8. Consumo medio del compresor para el trayecto de ida Guayaquil-Manta para distintas velocidades del compresor.

3.5. Coeficiente de funcionamiento del sistema (COP)

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** 9 muestra el COP del sistema A/C durante el trayecto Guayaquil-Manta para distintas velocidades del compresor. El incremento de consumo de energía para velocidades mayores del compresor representa una influencia negativa en el COP del sistema.

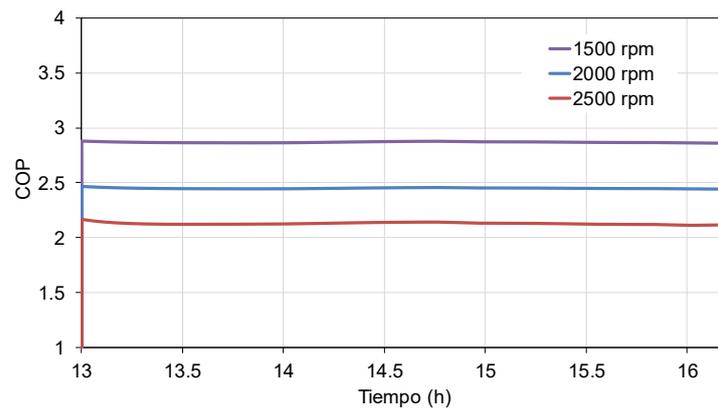


Figura. 9. Coeficiente de funcionamiento (COP) a distintas velocidades del compresor para el trayecto Guayaquil-Manta.

3.6. Flujo másico de condensado y humedad relativa en el interior de la cabina del vehículo.

A lo largo del trayecto, la carga latente se incrementa principalmente por las cargas por ocupación e infiltraciones del vehículo. Cuando el aire pasa a través del evaporador, el vapor de agua contenido en el aire es condensado, produciendo un efecto de deshumidificación del aire interior del vehículo. En la Figura. 10, se observa el caudal másico de condensado a diferentes velocidades del compresor producto de la deshumidificación del aire que pasa a través del evaporador. Al inicio del trayecto, el contenido de humedad del aire es elevado, lo cual produce un mayor flujo másico de condensado durante los primeros 15 minutos aproximadamente, a medida que el aire pasa a través del evaporador baja su humedad relativa (ver Figura. 11), produciendo a su vez un menor flujo másico de condensado.

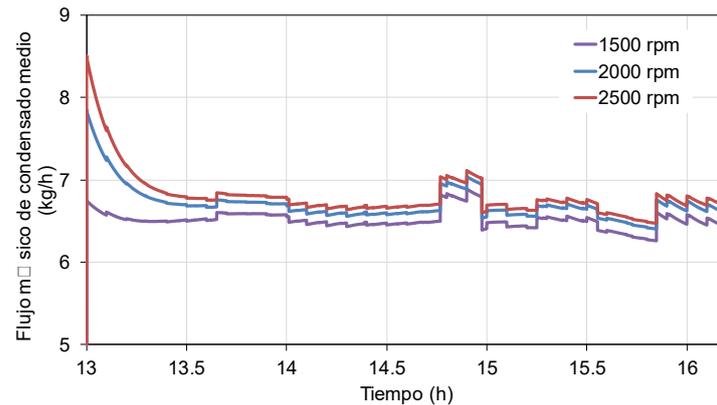


Figura. 10. Flujo másico de condensado a distintas velocidades del compresor para el trayecto Guayaquil-Manta.

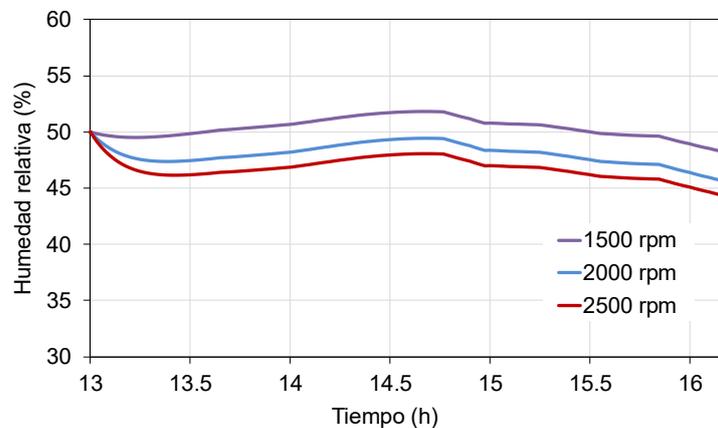


Figura. 11. Humedad relativa del aire interior del vehículo a distintas velocidades del compresor para el trayecto Guayaquil-Manta.

En la Figura. 11 se observa como varia la humedad relativa entre 45% y 55% durante todo el trayecto. La humedad relativa del aire interior durante el trayecto se mantiene dentro de las condiciones de confort establecidas anteriormente (entre 30% y 70%).

3.7. Cálculo de las emisiones de CO_2 producidas por el sistema A/C

Las emisiones de CO_2 producidas por el sistema A/C se calcularon considerando una eficiencia del motor del 30% [18], y una eficiencia de la transmisión por correas del 96% [19]. Posteriormente, la energía total consumida se transforma a su equivalente en litros de combustible, utilizando el factor 2.672 de kg CO_2 por cada litro de combustible según la referencia [20]. La Figura. muestra la energía total consumida, los litros de combustible y las emisiones de CO_2 para cada velocidad del compresor utilizada en el estudio.

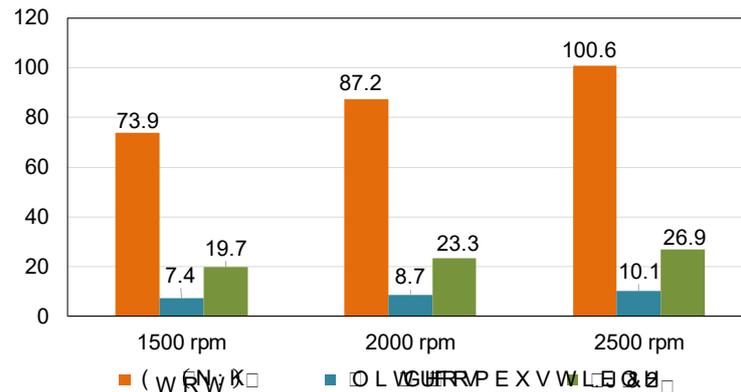


Figura. 12. Energía consumida y las emisiones producidas por el sistema A/C.

A una velocidad de 1500 rpm, el compresor consume 73.9 kWh durante el trayecto Guayaquil-Manta, lo que supone un consumo de 7.4 litros de combustible y una emisión de 19.7 kg de CO₂. Cuando el compresor trabaja a velocidades mayores, 2000 rpm y 2500 rpm, se produce un aumento de 1.3 y 2.7 Kg de CO₂ respectivamente. Por otro lado, el consumo de combustible incrementa un 18.3% y 36.5% cuando el compresor gira a 2000 rpm y 2500 rpm, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se analiza el impacto del sistema de aire acondicionado automotriz en el consumo energético y las emisiones de CO₂ cuando el vehículo recorre el trayecto Guayaquil-Manta. El modelo utilizado integra un modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo para determinar la demanda frigorífica y un modelo detallado del equipo A/C. El modelo térmico del vehículo toma en cuenta la influencia de las diferentes cargas térmicas y las condiciones climáticas durante el trayecto.

Los resultados muestran una importante influencia de la radiación solar en la demanda de refrigeración. Durante el trayecto Guayaquil – Manta, un autobús de 52 pasajeros consume 7.4 litros de combustible debido al funcionamiento del sistema A/C, cuando el compresor gira a 1500 rpm. Bajo estas condiciones, se emiten 19.7 kg de CO₂. El estudio muestra que el consumo energético y las emisiones de CO₂ incrementan a mayores velocidades de giro del compresor, pudiendo alcanzar un incremento del 36.5% del consumo de combustible y un incremento de 2.7 kg de CO₂ cuando el compresor gira a 2500 rpm.

AGRADECIMIENTOS

Daniela C. Vásconez-Núñez agradece el apoyo proporcionado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de Ecuador, bajo el programa CONVOCATORIA ABIERTA 2013-SEGUNDA FASE (Adjudicación N° 2014-AR3R7463).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen intereses particulares por parte de la entidad científica o financiadora que pudiesen afectar directa o indirectamente a los resultados obtenidos y presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Lambert and B. Jones. 2006. Automotive Adsorption Air Conditioner Powered by Exhaust Heat. Part 1: Conceptual and Embodiment Design. *SAGE Journals*.
- [2] H. Khayyam, A. Z. Kouzani, E. J. Hu, and S. Nahavandi. 2009. Coordinated energy management of vehicle air conditioning system. *Appl. Therm. Eng.* Vol. 31, no. 5, pp. 750–764, 2011.

- [3] H. He, M. Yan, C. Sun, J. Peng, M. Li, and H. Jia. 2018. Predictive air-conditioner control for electric buses with passenger amount variation forecast☆, *Appl. Energy*. Vol. 227, pp. 249–261.
- [4] C. Dullinger, W. Struckl, and M. Kozek. 2015. A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles, *Appl. Therm. Eng.* Vol. 78, pp. 616–629.
- [5] R. Mastrullo, A. W. Mauro, and C. 2016. Vellucci, Refrigerant Alternatives for High Speed Train A/C Systems: Energy Savings and Environmental Emissions Evaluation under Variable Ambient Conditions. *Energy Procedia*. Vol. 101, pp. 280–287.
- [6] Daniela C. Vásquez-Núñez. Desarrollo de un modelo para el cálculo del consumo de climatización en vehículos de pasajeros urbanos. Valencia; Universitat Politècnica de València. 2019.
- [7] D. C. Vásquez-Núñez, J. González-Maciá, J. M. Corberán, and J. Payá. 2018. Development and validation of a dynamic thermal model of a minibus using TRNSYS. *Int. J. Veh. Des.* Vol. 77, pp. 87–107.
- [8] ASHRAE, *2010 ASHRAE Handbook-Refrigeration*, vol. 30329, no. 404.
- [9] ASHRAE, *Principle of Heating ventilating and air conditioning*. John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [10] TRNSYS v. 16.1 (2007) A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- [11] Universitat Politècnica de València. 2010. Simulation Tool to Assist the Selection, Design and Optimization of Refrigeration Equipment and Components (IMST-ART). Valencia - España.
- [12] J. Pokorny, J. Fiser, and M. Jicha. 2013. Operational heat balance model with parameterized geometry for the prediction of car cabin heat loads. *Int. J. Vent.* Vol. 11, pp. 393–406.
- [13] IVECO. [Internet], Ficha técnica Autobús 12m. 2018. Available: <https://www.iveco.com/ivecobus/es-es/pages/home-page.aspx>.
- [14] T. J. Hendricks. 2001. Vehicle Transient Air Conditioning Analysis: Model Development & System Optimization Investigations, *Natl. Renew. Energy Lab*.
- [15] U. Pala and H. R. Oz. 2015. An investigation of thermal comfort inside a bus during heating period within a climatic chamber, *Appl. Ergon.*, vol. 48, pp. 164–176.
- [16] S. Soyly. 2014. The effects of urban driving conditions on the operating characteristics of conventional and hybrid electric city buses, *Appl. Energy*. Vol. 135, pp. 472–482.
- [17] Google Maps. 2018. [Internet]. Trayecto Guayaquil-Manta. Available: <https://www.google.com/maps/dir/Guayaquil,+Ecuador/Manta,+Ecuador/@-1.5946011,-80.6399255,9.5z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x902d13cbe855805f:0x8015a492f4fca473!2m2!1d-79.9223592!2d-2.1709979!1m5!1m1!1s0x902be6a9e440988b:0x9403b825a96f98ba!2m2!1d-80.7089101!2d-0.9676533!3e0>.
- [18] H. Khayyam *et al.* 2011. Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system, *Appl. Therm. Eng.* Vol. 31, pp. 3147–3160.
- [19] L. R. Breig, W.F.; Oliver, Energy loss and efficiency of power transmission belts, in *Third World Energy Engineering Congress*.
- [20] GOV.UK. 2018. [Internet] Reporting, Fuels conversion factors should be used for primary fuel sources combusted at a site or in an asset owned or controlled by the reporting organisation. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors>.



El 3er Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz y Desagregación Tecnológica, CONIADT 2019, junto con la 3ra Feria Empresarial Automotriz, se realizaron en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo los días 5 a 7 de junio de 2019.

El evento fue el escenario para la presentación de los resultados de investigación e innovación de más de 80 investigadores de Ecuador, Perú, Colombia, Chile, México, Cuba, España y Estados Unidos de Norteamérica, evidenciado en 25 ponencias del más alto nivel técnico y científico

ISBN: 978-9942-801-11-1

