EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Caracterización de un freno de corrientes de Eddy para simulación de fuerzas restrictivas en ciclo de prueba

Mariana Cardona Torres, Juan Camilo Mejía Hernández, Juan Esteban Tibaquirá Giraldo

Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia

Resumen

Cada año en el mundo ingresan nuevos vehículos al mercado mundial, en el 2022 se vendieron 74.8 millones de carros eléctricos y convencionales. Bajo un panorama mundial que busca la reducción de emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia energética del sector, se vuelve importante contar con un método objetivo de cuantificar el consumo y emisiones generadas por la operación de los vehículos. Para este propósito, agencias internacionales han creado protocolos de prueba para reproducir ciclos de conducción con cambios de velocidad estandarizados, como el WLTP y el americano FTP-75. En un dinamómetro de rodillos en condiciones de laboratorio es complejo reproducir todas las condiciones reales que afectan el desempeño del vehículo, con lo cual los resultados sobre el banco de prueba pueden diferir de los ocurridos en carretera. Tradicionalmente, el consumo de un vehículo es aproximado a través de un modelo de dinámica longitudinal que cuantifica las fuerzas que se oponen al movimiento, este incluye las fuerzas de inercia, de resistencia a la rodadura, de resistencia aerodinámica y del gradiente de inclinación. El movimiento del vehículo se genera a partir de que se puedan vencer estas fuerzas opositoras que no están presentes de manera natural en el laboratorio. En el dinamómetro de rodillos paralelos del Laboratorio de Pruebas Dinámicas y automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira se realizan ensayos donde el movimiento es generado desde el vehículo para evaluar el desempeño sin aplicar fuerzas restrictivas. El objetivo de la presente investigación es simular las fuerzas de oposición en un ciclo de prueba estándar con base al modelo de dinámica longitudinal a partir de la actuación del freno de corrientes de Eddy y un motor AC. Para ello, se caracterizó el freno junto con su sistema de control. Se utilizó una galga de peso ubicada a una distancia fija del eje para las mediciones. Primero, con el dinamómetro en estado estático, se determinó la relación entre la fuerza ejercida en el punto de la galga y el voltaje medido. Luego, se evaluó la respuesta de la galga ante diferentes fuerzas de frenado generadas por el vehículo, activando el freno de corrientes de Eddy desde 0 V y aumentando la tensión en incrementos de 0.1 V. Finalmente, el análisis de

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4747

estos resultados permitió mapear el voltaje de control para generar un par de torsión deseado sobre el eje del rodillo del dinamómetro.

Palabras clave: dinamómetro de rodillos; dinámica longitudinal; freno de corrientes de Eddy; caracterización del freno

Abstract

Every year, new vehicles enter the global market; in 2022, 74.8 million electric and conventional cars were sold. In a global context seeking to reduce polluting emissions and improve the sector's energy efficiency, it is becoming important to have an objective method for quantifying the consumption and emissions generated by vehicle operation. For this purpose, international agencies have created test protocols to reproduce driving cycles with standardized gear changes, such as the WLTP and the American FTP-75. Using a roller dynamometer under laboratory conditions is difficult to reproduce all the real-life conditions that affect vehicle performance, so test bench results may differ from those found on the road. Traditionally, vehicle fuel consumption is approximated using a longitudinal dynamics model that quantifies the forces opposing motion. This includes inertia, rolling resistance, aerodynamic drag, and inclination gradient. Vehicle motion is generated by overcoming these opposing forces, which are not naturally present in the laboratory. On the parallel roller dynamometer of the Dynamic and Automotive Testing Laboratory at the Technological University of Pereira, tests are performed where motion is generated from the vehicle to evaluate performance without applying restrictive forces. The objective of this investigation was to simulate the opposing forces in a standard test cycle based on the longitudinal dynamics model from the actuation of the eddy current brake and an AC motor. To this end, the brake and its control system were characterized. A weight gauge located at a fixed distance from the axle was used for the measurements. First, with the dynamometer in a static state, the relationship between the force exerted at the gauge point and the measured voltage was determined. Then, the gauge's response to different braking forces generated by the vehicle was evaluated, activating the eddy current brake from 0 V and increasing the voltage in 0.1 V increments. Finally, the analysis of these results allowed the control voltage to be mapped to generate a desired par torsor on the dynamometer roller shaft.

***Keywords**: Roller dynamometer; longitudinal dynamics; eddy current brake; brake characterization*

1. Introducción

Los dinamómetros de chasis, también conocido como dinamómetro de rodillos, son instrumentos que permiten realizar pruebas vehiculares en laboratorio bajo procedimientos estandarizados, como el WLTP definido en la norma GTR15 para vehículos livianos, la NBR6601, o el procedimiento FTP-75 definido por la EPA (Schmidt, 2015, Eckert, et al., 2017, Bielaczyc, et al., 2016). Estos procedimientos proporcionan directrices para medir y certificar las emisiones y consumo de combustible, para ello, cada protocolo maneja ciclos de conducción estándar que simula la secuencia de velocidades de un vehículo en ciudad o carretera. Además de su aplicación

en la industria automotriz, estos dispositivos son adecuados para la investigación académica, como lo demuestran múltiples estudios, ya que permiten controlar las condiciones experimentales y garantizar la reproducibilidad de los resultados (Lourenço, et al., 2022, Costa, et al., 2016, Costa, et al., 2014, Liu, et al., 2017, Wang, et al., 2016).

Eckert, et al. (2017) implementaron una metodología para modelar la inercia de los rodillos y estudiaron las fuerzas restrictivas inherentes del banco de prueba. Mediante los experimentos determinaron que la inercia total equivalente percibida en el banco de prueba fue de 34.87 $kg.m^2$ que corresponde a la masa de un vehículo de 871 kg. Esta inercia propia del dinamómetro surge a causa de las pérdidas mecánicas del sistema por rozamiento de partes móviles. Para la realización de pruebas se puede disponer de vehículos hasta de 3500 kg, en consecuencia, actuadores externos se suelen utilizar para compensar la inercia que debe percibir el motor del vehículo debido a su masa, además de otras fuerzas restrictivas que no están naturalmente presentes en laboratorio.

Un dinamómetro se acopla con actuadores como frenos de corriente de Foucault para añadir cargas de resistencia, y motores eléctricos que permiten reducir la carga sobre el vehículo. Esta configuración permite simular las condiciones de conducción reales que los vehículos suelen encontrar en la carretera, mejorando así la relevancia y el impacto de los hallazgos experimentales. El control de los actuadores permite gestionar la entrada y salida de potencia del sistema, al modificar la fuerza de tracción que debe generar el vehículo durante la reproducción de un ciclo de conducción. En consecuencia, la simulación de una carga sobre el dinamómetro se refleja en el punto de operación del motor, lo que afecta directamente al consumo de combustible y a las emisiones.

La fuerza restrictiva que se genera desde el Freno de Corrientes de Eddy (FCE) en un dinamómetro de chasis corresponde a la fuerza de tracción que lleva el vehículo, esta se puede obtener desde un modelo de dinámica longitudinal (Yavuz, et al., 2023). Además de considerar el modelo de dinámica para simular la fuerza restrictiva en el laboratorio, es necesario considerar las pérdidas inherentes del dinamómetro y el contacto de los rodillos con las llantas, que ya representan una carga constante al sistema dinamómetro-vehículo (Eckert, et al., 2017). En el entorno de laboratorio, el contacto entre los rodillos y las ruedas del vehículo origina una fuerza de resistencia a la rodadura, la cual varía según la configuración del dinamómetro. El dinamómetro de chasis discutido en este estudio está diseñado como un sistema de 4 rodillos gemelos distribuidos en 2 ejes, con un punto de contacto doble para la interacción neumático-rodillo. Esta fuerza adicional presente en un entorno de laboratorio se debe a la dispersión de energía debido a las deformaciones cíclicas del caucho; dado que cada rueda tiene doble contacto con los rodillos, esta fuerza aumenta (Eckert, et al., 2017).

En este artículo tiene como objetivo detallar los procedimientos realizados para la caracterización y control de un freno de corrientes de Eddy para simulación de fuerzas restrictivas en ciclo de prueba en un dinamómetro de chasis de doble rodillo. Esto se realiza para definir posibles correcciones que el actuador del banco pueda proporcionar, emulando condiciones específicas de resistencia a la rodadura.

2. Materiales y métodos

El dinamómetro de rodillos del Laboratorio de Pruebas Dinámicas y Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira es un banco de pruebas diseñado para vehículos livianos 4x2 con tracción delantera (FWD por sus siglas en inglés). Las llantas de tracción se ubican entre los rodillos paralelos como se muestra en la figura 1.

Como se muestra en el esquema, el dinamómetro de chasis está compuesto por cuatro rodillos divididos en dos parejas en paralelo, acoplados por un sistema de polea fijo y las llantas del vehículo. La velocidad del dinamómetro se mide mediante la conexión axial de un encoder que tiene una resolución de 360 pulsos por vuelta, la cual se calcula teniendo en cuenta el diámetro de los rodillos (*dc = 0.216 m*). En los extremos del eje del dinamómetro se encuentra acoplado el Freno de Corrientes de Eddy (FCE) y un Motor AC (450 VAC trifásico).

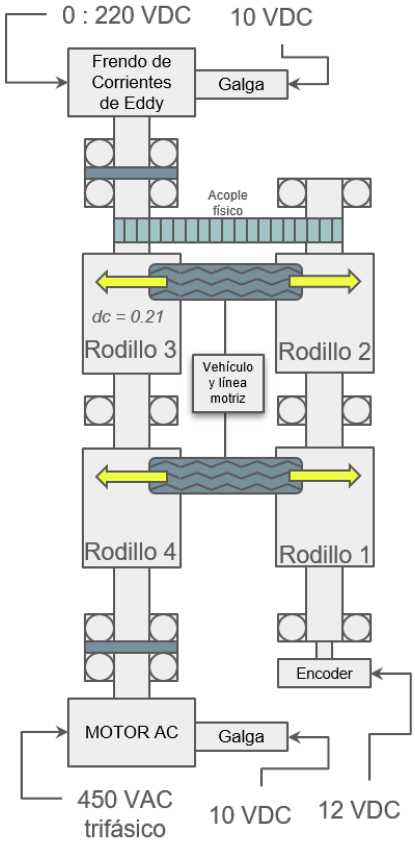

Figura 1. Diagrama del dinamómetro de chasis.

Un FCE también conocido como freno magnético, funciona mediante la inducción de corrientes en un conductor, las cuales crean un campo magnético que se opone al campo magnético de la fuente y a su vez genera una fuerza de frenado (Pelayo, 2024). El FCE, que se muestra en la figura 2, está dispuesto para generar cargas restrictivas al movimiento del rodillo, con una señal de control de 0 a 10VDC, la cual es amplificada a un rango de 0 a 220 VDC mediante una tarjeta de control de velocidad para motores DC KBIC/KBLC, equipado con escudo de aislamiento de señal SI-5.

Acoplado a la FCE a una distancia de 0.34 metros se encuentra una galga extensiométrica que permite conocer el par torsor que experimenta el eje del dinamómetro.

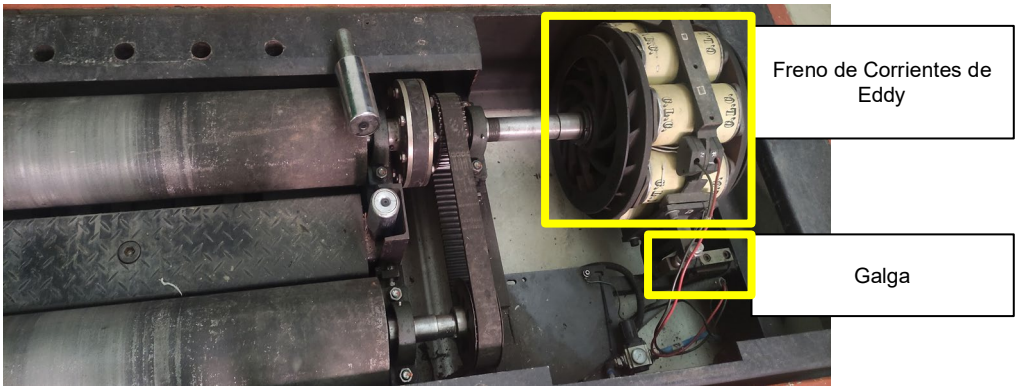

Figura 2. Freno de Corrientes de Eddy acoplado a dinamómetro de chasis en laboratorio.

3. Resultados

La galga permite conocer el par torsor al cual el eje se encuentra sometido debido a la fuerza de frenado del FCE, por lo cual se genera un marco experimental para caracterizar la galga que está acoplada al mismo. La galga está instrumentada con un puente de Wheatstone y la salida amplificada mediante una tarjeta Mcr-CUI-UI_DCI, lo cual permite tener una señal eléctrica correspondiente a la deformación a la que está sometida. Para la caracterización de la galga se ubicaron diferentes masas conocidas y se documentaron en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de la galga acoplada al FCE

Prueba N°	Masa [kg]	Tensión de salida [mV]
1	0.0	445.1
2	1.9	449.9
3	2.6	451.2
4	20.9	489.7
5	31.5	519.5
6	46.2	556.1
7	62.1	596.1
8	76.3	629.3
9	85.15	654.5

10	85.9	649.7
11	91	666.6

Los resultados permiten observar un comportamiento lineal entre la masa y el voltaje de salida del sistema de amplificación, lo cual permite llegar a la ecuación 1 que representa la relación entre el voltaje de salida del sistema de instrumentación y el par torsor en el eje del dinamómetro.

$$T_{eje} = (410.15\,(V_g - 0.4451) - 181.92) * g * f_{con} * d_{ga} \quad 1$$

Donde, T_{eje} es el par torsor en el eje del dinamómetro, V_g es el voltaje de salida de la galga en voltios, g es la gravedad, f_{con} es el factor de conversión de kilogramo-fuerza a newtons y d_{ga} es la distancia de la galga al centro del eje del dinamómetro. Usando los datos experimentales se determina la ecuación 1 tiene R^2 de 99.93%.

Una vez concluida la caracterización de la galga se procede con la del FCE, el cual permite generar un modelo matemático de control del mismo. El FCE es controlado mediante una señal de 0 a 10VDC. Esta señal de control tiene una relación directa con la fuerza de frenado del FCE, lo cual se analiza mediante el uso de tres vehículos diferentes que se identifican en la tabla 2 y en la figura 3 se muestra la disposición del laboratorio para la prueba.

Tabla 2. Vehículos usados en la caracterización del FCE.

Marca	Línea	Modelo	Cilindraje [cm³]
Chevrolet	Sail	2016	1400
Volkswagen	Gol	2015	1600
Renault	Oroch	2017	2000

La prueba experimental consiste en llevar el vehículo de prueba a una velocidad constante de 60 km/h durante 10 segundos y luego es frenado de manera controlada. El uso de 3 vehículos permite verificar la variabilidad de los resultados con 3 vehículos con características diferentes y la reproducibilidad de los experimentos.

Figura 3. Correlación entre el voltaje de control de FCE y el par torsor ejercido en el eje del dinamómetro.

Durante el proceso anterior se monitorea de manera constante la salida de tensión de la galga y se repite todo el proceso aumentando el voltaje de control del FCE en cada experimento con intervalos de 0.1 V. Cabe resaltar que, cada prueba se repitió tres veces y para cada vehículo el voltaje de control del FCE se aumenta progresivamente desde 0 VDC hasta que al vehículo le resulte imposible llegar a la velocidad establecida, ya que no es capaz de generar el par torsor necesario.

En cada prueba realizada se identifica la medición de voltaje que corresponde a la fuerza reactiva del momento de frenado percibido en la galga, este se lleva a su correspondiente valor de par torsor con la ecuación 1. Los resultados se pueden apreciar en la figura 4. Cabe destacar que el experimento se repite a diferentes velocidades de crucero, no obstante, los hallazgos indican que el par torsor medido es indiferente a las variaciones de este parámetro, mientras la fuerza ejercida por el FCE es constante en el tiempo. Por lo tanto, se selecciona una velocidad estable para todos los vehículos.

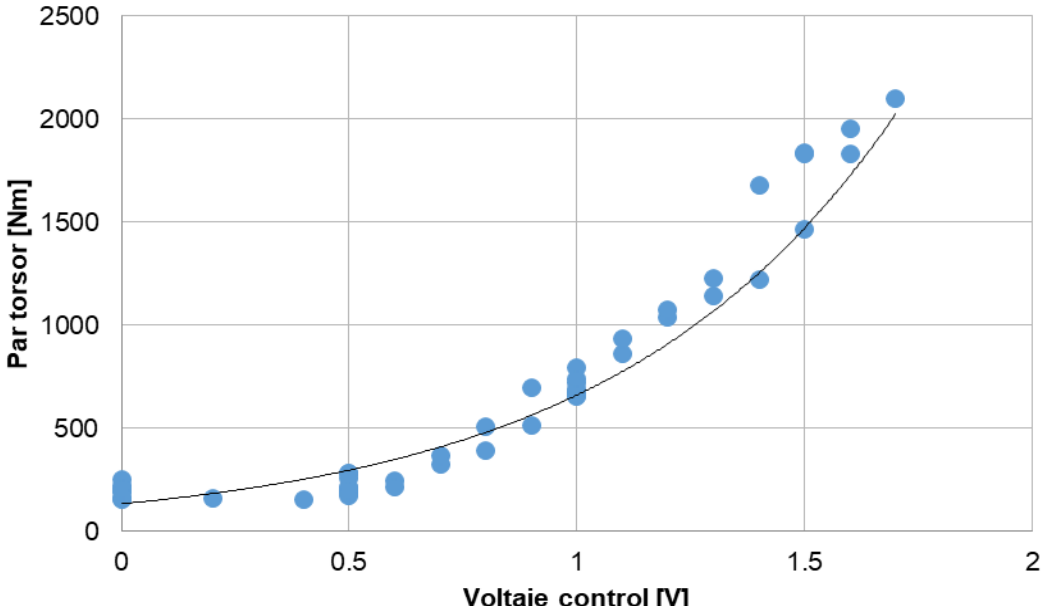

Figura 4. Correlación entre el voltaje de control de FCE y el par torsor ejercido en el eje del dinamómetro.

El aumento de la tensión de control del FCE genera una fuerza restrictiva al movimiento del rodillo que crece con un comportamiento exponencial y con una magnitud suficiente para que ninguno de los vehículos llegará a 60 km/h cuando se supera 1.7 V en el sistema de control. A partir de los resultados obtenidos se determina el voltaje de salida que deberá tener el sistema de control del freno para generar una fuerza deseada en el punto de contacto entre los neumáticos-rodillos. Ahora, este modelamiento se puede representar por la ecuación 2.

$$V_C = (\,0.55667 * ln(Fx * rc)\; - \;2.6412)\;\; 2$$

Donde Fx, es la fuerza de tracción total en newtons, V_C es el voltaje de control del FCE y rc es el radio de los rodillos. Los resultados indican que la ecuación 2 alcanza un R^2 de 89% y explica su valor por las diferencias en el marco experimental hechas por los conductores al momento de mantener la velocidad constante o en el frenado.

A continuación, se realiza un análisis de las fuerzas a las cuales el vehículo está expuesto en un entorno real. Para esto se plantea el análisis de cuerpo libre para dinámica longitudinal de vehículos, cuyo diagrama se muestra en la figura 5. (Yavuz, et al., 2023)

Su correlación se puede explicar usando la ecuación 3.

$$F_t = F_r \;+\; F_s \;+\; F_i \;+\; F_{ae}\;\; 3$$

Dónde, F_t Fuerza en rueda, F_r es la fuerza de resistencia a la rodadura, F_s es la componente longitudinal fuerza de gravedad F_g, F_i es la fuerza de inercia y F_{ae} es la fuerza de arrastre aerodinámico. (Soica, et al., 2020, Zhang, 2024)

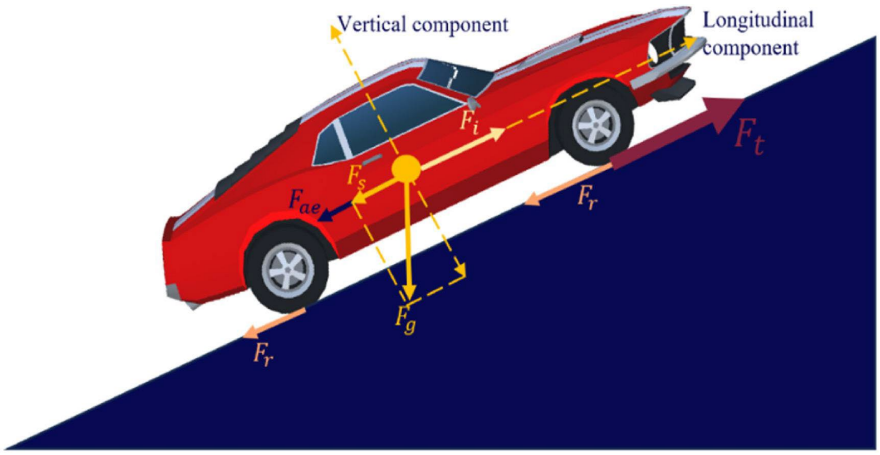

Figura 5. Fuerzas a las cuales está expuesto un vehículo en un ambiente real. (Zhang, 2024)

La ecuación 3 evalúa la fuerza de tracción F_t que debe producir un vehículo en las ruedas para generar el movimiento deseado. Las componentes de esta fuerza dependen en gran medida de la velocidad que lleva el vehículo, además de factores ambientales y los parámetros conocidos del vehículo. Se aplica este modelo matemático para simular el ciclo de conducción FTP-75, con lo cual se determina la fuerza de tracción que debería experimentar un vehículo en condiciones reales. A

partir de esta fuerza, se determina el par torsor final en el eje de los rodillos que se muestra en la figura 6 en contraste con el ciclo de conducción usado.

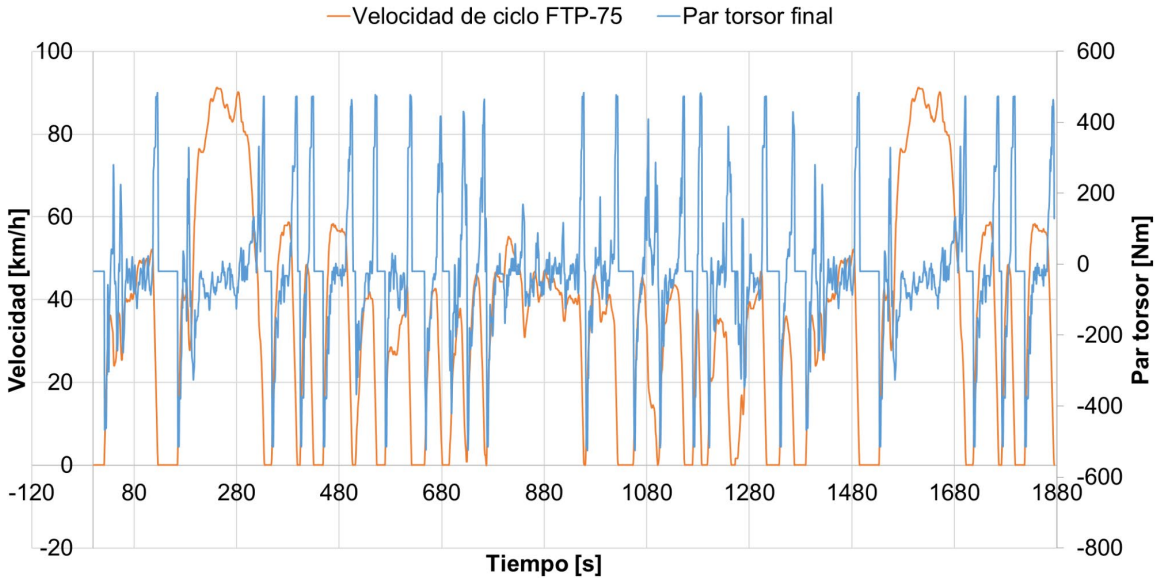

Figura 6. Ciclo de conducción FTP-75 vs. par torsor final en eje de rodillos del dinamómetro.

En esta gráfica, las fuerzas restrictivas que se deberán simular con FCE aparecen como valores inferiores a 0 Nm, ya que operan en sentido contrario al movimiento de los rodillos. Mientras que el par torsor positivo se simulará con el motor AC y aparecen principalmente cuando el vehículo desacelera. En las etapas siguientes de esta investigación se deberá determinar las pérdidas por rozamiento en el dinamómetro para evaluar el par torsor adicional que se deberá generar con el freno y correspondiente señal de control; también se deberá hacer la caracterización del motor AC y su correspondiente análisis de la señal de control.

4. Conclusiones

El presente trabajo corresponde a una investigación en curso donde se desarrolla e implementa un proceso experimental, que permite analizar, caracterizar y establecer las bases técnicas para el control de un Freno de Corrientes de Eddy. Este dispositivo juega un papel importante para la simulación de fuerzas restrictivas durante la realización de pruebas estandarizadas. Los resultados obtenidos permiten asociar la señal de control del freno con el par torsor que se genera en el eje del rodillo. A su vez, se ha establecido para el ciclo de conducción FTP-75, la carga que se deberá simular con los actuadores. No obstante, para mejorar esta estimación se deberá establecer un marco experimental para determinar las pérdidas de rozamiento de los rodillos.

La presente investigación hace parte de un trabajo más extenso que ha facilitado entender la relación entre velocidad de ciclo, las fuerzas de tracción asociadas y su implicación práctica en la realización de pruebas y medición de consumo de combustible. En la simulación del ciclo FTP-75, se observa que existen instantes, en los momentos de desaceleración, donde la carga que se debe

simular con los actuadores aporta al movimiento del vehículo. Esto se realizará por medio del control de un motor AC para el cual se deberá hacer su respectiva caracterización. Cabe destacar que el presente trabajo permitirá futuras investigaciones de eficiencia energética vehicular.

5. Referencias

- Costa, Eduardo dos Santos, Jony Javorski Eckert, Fabio Mazzariol Santiciolli, Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, Fernanda Cristina Corrêa, and Franco Giuseppe Dedini. 2016. Economic and Energy Analysis of Hybridized Vehicle by Means of Experimental Mapping. SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2016-36-0368
- Costa, Eduardo dos Santos, Fabio Mazzariol Santiciolli, Jony Javorski Eckert, Heron José Dionísio, Franco Giuseppe Dedini, and Fernanda Cristina Corrêa. 2014. Computational and experimental analysis of fuel consumption of a hybridized vehicle. SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2014-36-0385
- Bielaczyc, P., Woodburn, J., & Szczotka, A. (2016). Exhaust emissions of gaseous and solid pollutants measured over the NEDC, FTP-75 and WLTC chassis dynamometer driving cycles (No. 2016-01-1008). SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2016-01-1008
- Eckert, J. J., Bertoti, E., dos Santos Costa, E., Santiciolli, F. M., Yamashita, R. Y., e Silva, L. C. D. A., & Dedini, F. G. (2017). Experimental evaluation of rotational inertia and tire rolling resistance for a twin roller chassis dynamometer (No. 2017-36-0212). SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2017-36-0212
- Liu, Yuhan, Keding Lu, Yufang Ma, Xinping Yang, Wenbin Zhang, Yusheng Wu, Jianfei Peng, Shijin Shuai, Min Hu, and Yuanhang Zhang. 2017. "Direct emission of nitrous acid (HONO) from gasoline cars in China determined by vehicle chassis dynamometer experiments." Atmospheric Environment. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.019
- Lourenço, M. A. de M., Eckert, J. J., Silva, F. L., Santiciolli, F. M., & Silva, L. C. A. (2022). Vehicle and twin-roller chassis dynamometer model considering slip tire interactions. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 51(11), 6166-6183. https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2038199
- Pelayo Carvajal, J. (2024). Diseño técnico y análisis económico de un freno electromagnético de resorte.
- Schmidt, H. (2015). Worldwide harmonized light-vehicles test procedure (wltp) und real driving emissions (rde)-aktueller stand der diskussion und erste messergebnisse. In 15. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil-und Motorentechnik (pp. 1403-1411). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-08844-6_97
- Soica, A., Budala, A., Monescu, V., Sommer, S., & Owczarzak, W. (2020). Method of estimating the rolling resistance coefficient of vehicle tyre using the roller dynamometer. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(13), 3194-3204. https://doi.org/10.1177/0954407020919546
- Wang, Feng-bin, Guo Yong, Yi-long Sun, and Liu Chen. 2016. "Experimental Study on the Emission and Particle Number of a Heavy-duty Gasoline Vehicle by the Heavy-duty Chassis- Dynamometer." DEStech Transactions on Computer Science and Engineering (aita). https://doi.org/10.12783/dtcse/aita2016/7583
- Yavuz, İ., Arslan, T. A., Bayrakçeken, H., Mutlu, İ., & Aysal, F. E. (2023). İkinci El Otomotiv Sektöründe Kullanılan Şasi Dinamometrelerinin Ölçüm Doğruluklarının Araştırılması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11(3), 673-684. https://doi.org/10.29109/gujsc.1292602

- Zhang, X., Zhang, Z., Liu, Y., Xu, Z., & Qu, X. (2024). A review of machine learning approaches for electric vehicle energy consumption modelling in urban transportation. Renewable Energy, 234, 121243. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121243

Sobre los autores

- **Mariana Cardona Torres**: Ingeniera Mecatrónica, estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Catedrático: mct@utp.edu.co
- **Juan Camilo Mejía Hernández**: Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Eléctrica y estudiante doctoral de la Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Catedrático: j.mejia1@utp.edu.co
- **Juan Esteban Tibaquirá**: Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, Doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Arizona y Profesor titular de la Universidad Tecnológica: juantiba@utp.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)