

Una revisión técnica acerca de los sistemas diagnósticos en frenos de disco automotores¹

A technical review about diagnostic systems in automotive disc brakes

N. J. Rodríguez García², I. C. Nieto³, J. D. Velásquez Bran⁴

Recibido: 11 de junio de 2019 Aprobado: 03 de julio de 2019

Resumen: Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre los sistemas diagnóstico en frenos de disco automotores. Se utilizó la metodología exploratoria, respaldada por bases de datos científicas y tecnológicas, donde se incluye una revisión de técnicas computacionales y de sensores. Como resultado se identifican los métodos, estudios y desarrollos de los sistemas de diagnóstico para monitorear el sistema de frenos automotor, así como el monitoreo y control de la temperatura en las partes fijas y móviles del sistema de frenos, teniendo en cuenta que en cada componente se encuentra un tipo especial de sensor, análisis computacional, simulación e implementación de bancos de instrumentación.

Palabras clave: disco de freno, falla, pastillas de freno, sensor, térmica.

Abstract: This article presents a review of the literature on diagnostic systems in automotive disc brakes. Exploratory methodology, supported by scientific and technological databases, was used, including a review of Computational Techniques and Sensors. As a result the research must identify methods, studies and developments of diagnostic systems to monitor the automotive brake system, as well the consideration of monitoring and control of the temperature in the fixed and mobile parts of brake system, considering that in each component there is a special type of sensor, it is also determined that a large part of the developments are based on computational analysis, simulation and implementation of instrumentation banks.

Keywords: brake disk, brake pad, fault, sensor, thermal.

1 Este artículo es resultado del proyecto "Análisis científico y tecnológico a través de la instrumentación electrónica del desarrollo de sistemas diagnósticos asociados a los frenos de disco en un vehículo particular en los últimos diez años".

2 Especialista en Educación Superior a Distancia. Docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá. Correo electrónico: ing.nestor0818@gmail.com.

3 Especialista en Pedagogía para el Desarrollo del Aprendizaje Autónomo. Docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá. Correo electrónico: hernimi348@gmail.com.

4 Ingeniero Electrónico. Investigador. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá. Correo electrónico: Juancho12637@gmail.com

Introducción

Los frenos son un sistema de seguridad destinado a prevenir colisiones, por eso su eficiencia se puede ver afectada por el desgaste no homogéneo del disco debido a frenados bruscos, que elevan la temperatura por la fricción con las pastillas y, en consecuencia, generan vibraciones que ocasionan un frenado deficiente, lo que incrementa las probabilidades de accidentes sin que el conductor se percate de que debe acudir al servicio técnico especializado para corregir una falla de este tipo. Gracias a la instrumentación electrónica se puede medir cualquier tipo de magnitud física o química a través de un sensor, la información se procesa para luego suministrar el control y la visualización de los procesos.

Un vehículo en movimiento (energía cinética) que acciona los frenos reduce la velocidad, y como consecuencia dicha energía se transforma en calor generado por la fricción. Esta transformación de energía genera un aumento de la temperatura de todo el sistema. Durante las frenadas fuertes, la disipación de potencia en una pastilla de freno está alrededor de 30 kW, lo que da como resultado temperaturas de superficie muy altas (Eriksson, Bergman, y Jacobson, 2002). El calor que se genera en el proceso de frenado debe ser evacuado con rapidez, pues con estos eventos repetitivos la temperatura se eleva hasta llegar a un límite (temperatura de saturación), en función de la capacidad de disipación térmica del disco del freno y el sistema tiende a desestabilizarse, por ende el movimiento del vehículo ayuda a la disipación del calor, con la influencia de dos fenómenos: la convección y la conducción.

La temperatura en función del tiempo es un factor determinante, debido a que su aumento descontrolado ocasiona que el disco experimente ciertos fenómenos reduciendo el coeficiente de fricción, ocasionando un fenómeno llamado *Fading* que afecta la eficiencia de los frenos. De igual forma se puede producir un fenómeno llamado *Hot Judder*, que consiste en vibraciones que aparecen a alta temperatura durante procesos de frenado a presiones medias y velocidades altas debido a que las frenadas en estas condiciones se

prolongan en el tiempo, y la temperatura aumenta alcanzando valores de hasta 400 °C a 500 °C (García, 2014; 2017).

Con relación al desarrollo tecnológico sobre sistemas diagnósticos asociados a los frenos de disco en un vehículo particular, SAE International promueve el desarrollo del conocimiento de los sistemas y los vehículos en un foro neutral para el beneficio de toda la comunidad y a través de una biblioteca digital, en donde se exponen documentos técnicos, normas, libros electrónicos y revistas (SAE, s. f.). Desde otra perspectiva, actualmente Applus + IDIADA, una empresa multinacional que proporciona servicios de diseño, ingeniería, pruebas y homologación para la industria del automóvil, se encuentra desarrollando un sistema de adquisición (dbBrake) y software (dbSoft) con el objetivo de analizar el ruido de alta y baja frecuencia durante el frenado y realizar un análisis automático de la frecuencia y el nivel de presión sonora (SPL, por su sigla en inglés) del ruido del freno. Las condiciones de presión, temperatura y velocidad de la línea de freno también se registran y analizan automáticamente cuando se produce ruido. La metodología ha sido validada en diferentes ambientes de pruebas (sur de España, otras localidades europeas, Asia y América del Sur). Con base en la experiencia del Departamento de Sistemas de Frenado de IDIADA, se han logrado resultados confiables y efectivos para la investigación del ruido de frenos y la resolución de problemas (Applus + IDIADA, s. f.).

En esta revisión el análisis térmico es un aspecto fundamental, pues en el estudio de los sistemas de frenos la temperatura y el coeficiente de fricción determinan el comportamiento termomecánico de los componentes del sistema (Belhocine y Bouchetara, 2012a).

El objetivo de esta investigación es identificar los métodos, estudios y desarrollos de sistemas diagnóstico que permiten monitorear el sistema de frenos automotores. Además, el grupo investigador del proyecto "Sistema diagnóstico para detección de problemas asociados a los frenos de disco en un vehículo particular" tendrá un conocimiento actualizado y una amplia visión del Estado del Arte.

Metodología de la revisión

Se utilizó el esquema general de investigación de Arias Galicia (1991), con un tipo de investigación exploratoria (Figura 1).

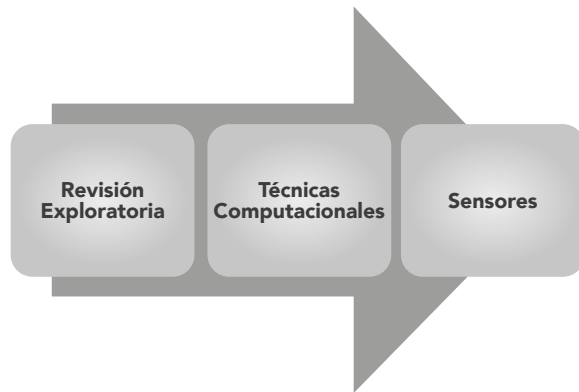


Figura 1. Esquema general de investigación.
Fuente: Elaboración propia

Se inició con la recopilación de la información, que consistió en una revisión selectiva sobre el tema objeto de estudio teniendo en cuenta las variables del problema: disco de freno, sensor, falla, pastilla de freno, térmica y se centralizó en la línea de tiempo entre 2007 y 2017, con un total de 150 artículos consultados. Se tuvieron en cuenta fuentes primarias soportadas en publicaciones originales de estudios científicos e información reciente, tales como IEEE, Science Direct, Biblioteca digital SAE, Elsevier, congresos y conferencias, además, artículos de desarrollo tecnológico y foros de la industria actual. En la

segunda etapa se procesaron los datos a través de una lectura crítica. Los artículos se seleccionaron y se organizaron en un gestor de referencias, se incluyó la información notable procedente de cada estudio de acuerdo al objetivo planteado y se hizo una comparación de los resultados de las investigaciones.

Para la validación de las fuentes consultadas se tuvieron en cuenta las investigaciones aplicadas al diagnóstico de sistemas de freno de disco, al final se validaron un total de 50 artículos, luego se clasificó la información por líneas de investigación. De igual forma, se identificaron adecuadamente las diferencias de los resultados de los estudios realizados, y se obtuvieron al final conclusiones importantes que contribuyeron a descubrir desarrollos e investigaciones en torno al diagnóstico de sistemas de freno de disco. La información analizada se estructuró en dos sub-apartados: uno dedicado a técnicas computacionales y otro, a sensores.

En los documentos sobre técnicas computacionales, las variables fueron: método de elementos finitos, predicción de temperatura y aprendizaje automático, y en los documentos sobre sensores, las variables fueron: termografía, termopar e infrarrojo.

Análisis y resultados obtenidos

En la revisión del estado del arte se identificaron diferentes técnicas computacionales y su aplicación en el diagnóstico de sistemas de freno (ver Tabla 1).

Tabla 1. Técnicas computacionales.

Técnica computacional	Aplicación	Autores
Método de elementos finitos	Predicción y análisis del comportamiento del acoplamiento termomecánico del sistema de frenado	Thuppal y Kora (2016); Belhocine y Bouchetara (2012b); Zhang y Meng (2010); Qi y Day (2007)
	Análisis del ruido de los frenos	Lü, Shangguan y Yu (2017); Parra, Olazagoitia y Biera (2010); Trichês, Gerges y Jordan (2008)
Método de elementos finitos	Predicción de desgaste de pastillas de freno	Abu Bakar, Li, James, Ouyang, y Siegel (2010); Abu Bakar y Ouyang (2008)
	Análisis térmico de un disco de freno	Alnaqi, Barton y Brooks (2015); Jungwirth y Dornheim (2014); Gotowicki, Nigrelli, Mariotti, Aleksendric y Duboka (2005)
Aprendizaje automático	Análisis de vibraciones con árbol de decisión para diagnóstico de fallas	Alnaqi, Barton y Brooks (2015); Jungwirth y Dornheim (2014); Gotowicki, Nigrelli, Mariotti, Aleksendric y Duboka (2005)
	Análisis de vibraciones con Algoritmo de selección Clonal para diagnóstico de fallas	Jegadeeshwaran y Sugumaran (2015)
	Máquinas de vectores de apoyo para diagnóstico de fallas	Lian, Xu y Lu (2013)
	Redes neuronales para diagnóstico de fallas	Aleksendrić, Jakovljević y Ćirović (2012); Aleksendrić (2010); Aleksendrić y Barton (2009)

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el análisis de cada técnica y lo que puede aportar a los sistemas diagnósticos. Entre los resultados encontrados se estableció lo siguiente:

Método de Elementos Finitos (MEF).

Es eficiente dado que discretiza la geometría de una estructura en un número finito de partes, y obtiene soluciones aproximadas a través de ecuaciones diferenciales. Por otra parte, para determinar los puntos de falla de un sistema de freno de disco, es indispensable modelarlo a

partir de sus características físicas, para lo cual son importantes los materiales de construcción y que actúan para garantizar la estabilidad y durabilidad del sistema. Thuppal Vedanta y Kora (2016) realizaron una investigación experimental en Volvo Car Corporation (VCC), efectuaron pruebas con tres sistemas de freno y a través de este método calcularon la temperatura de discos y pastillas de freno, integrando Matlab y Simulink con un bloque S-Function. (Figura 2). Los resultados de simulación generaron una buena correlación con los ensayos experimentales.

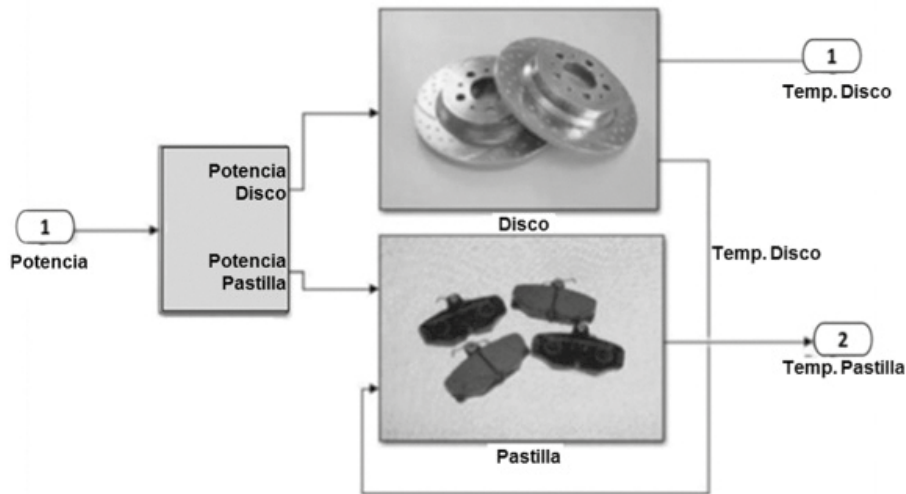


Figura 2. Modelo térmico del disco de freno en Simulink.
Fuente: Thuppal y Kora (2016)

Aprendizaje Automático.

Se destacó entre otros métodos desarrollados, puesto que es una derivación natural desde la intersección entre la Estadística y la Ciencia de la Computación (Pury, 2015), al mostrar que sus resultados reflejan el comportamiento de un disco real dado que emplea diferentes técnicas de clasificación. En esta revisión se identificaron:

Árbol de decisión, un Algoritmo de Clasificación de Selección Clonal, Máquinas de vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés [Support Vector Machine]) y Redes Neuronales. Lo anterior implica que se interpreta la interacción de las variables para realizar una predicción de la pérdida de material del disco, producto del desgaste (Figura 3).

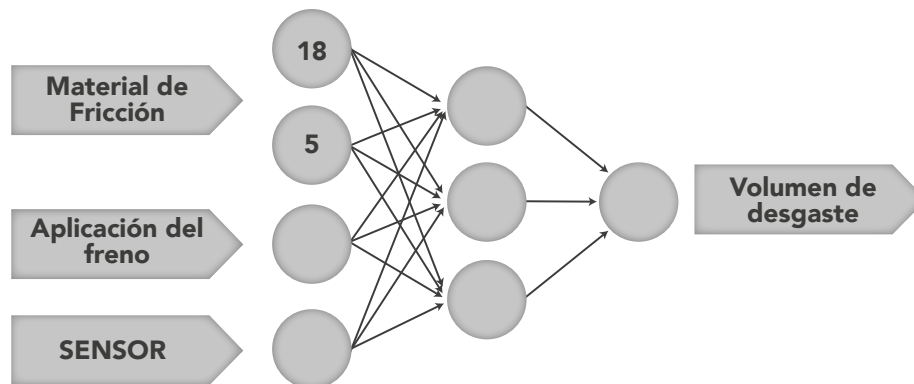


Figura 3. Modelo neuronal para predecir el desgaste de materiales de fricción.
Fuente: Aleksendrić (2010)

En los sistemas diagnósticos de frenos consultados prevalece un factor determinante y es el de la temperatura. En la Tabla 2 se exponen los tipos de sensores identificados en la presente revisión

para sensar la temperatura en los componentes fijos (pastillas de freno) y los componentes móviles (disco de freno).

Tabla 2. Sensores

Sensor	Aplicación	Autores
Termopar	Medición de temperatura en partes fijas (pastilla de freno)	Degenstein, Günter, Keller y Winner (2007); Bakonyi-Kiss (2007); Montenegro, Navarro y Rigioni (2014); Grkić (2015); Ghazaly (2013); Polajnar (2017); Siroux (2008); Xu (2015); Sofia Finnved (2015); McPhee (2008); Rodríguez García (2017); IEC (2013)
Sensor de temperatura infrarrojo	Medición de temperatura en componentes móviles (disco de freno)	Montenegro, Navarro y Rigioni (2014); Gonzalo (2010); Sheng (2011); Dalimus (2014)

Fuente: Elaboración propia

Termopar

Un termopar es un sensor para medir la variable temperatura que consta de dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o se enfría se produce un voltaje que se puede correlacionar con la temperatura (IEC, 2013). Al diseñar un sistema de medición para medir la temperatura entre la pastilla de freno y el disco de freno de un automóvil de pasajeros, se tiene en cuenta que la temperatura se mide dentro de la pastilla de freno en un rango de temperatura de trabajo entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, con fuerzas de sujeción del freno de hasta 40 KN, sensando el desgaste del disco de freno hasta 4 mm y el desgaste de la pastilla de freno hasta 10 mm, además se incrusta directamente un termopar tipo K abierto en la pastilla de freno para medir la temperatura en el área de contacto de la pastilla y el disco con un tiempo de respuesta muy corto. Se logra determinar que la respuesta escalonada a un aumento abrupto de temperatura del termopar de circuito abierto es más rápida que la respuesta del termopar de circuito cerrado (Degenstein, Günter, Keller y Winner, 2007).

De acuerdo con Montenegro, Navarro y Rigioni (2014), el termopar no debe exponerse en ningún momento al frotamiento directo sobre la superficie de fricción, para eliminar el impacto potencial en la calidad de la señal de medición del termopar que se desliza sobre la superficie metálica. Este tipo de problemas puede evitarse si el termopar está

posicionado dentro de la pastilla, muy cerca de la superficie deslizante, aproximadamente a 0,5 mm de profundidad (Figura 4), de acuerdo a la norma SAE J843. En este estudio, esta posición no fue satisfactoria debido a los fenómenos de desgaste (Grkić, Mikluc, Muždeka, Arsenić y Duboka, 2015).

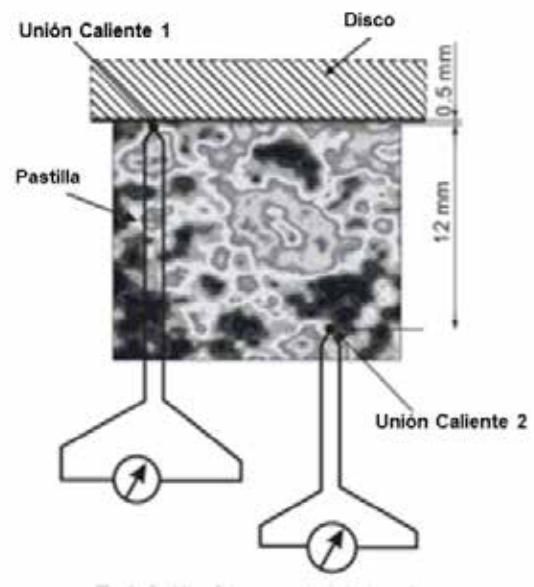


Figura 4. Posición de las termocuplas en la pastilla.
Fuente: Grkić et al. (2015)

Sensores infrarrojos

Los monoplaza de fórmula 1 usan un detector de infrarrojos de tipo fotoconductor, para evitar de esta manera su destrucción, debido a las altas temperaturas del disco y que se irradia una gran cantidad de luz sobre el mismo, esto hace que la resistencia varíe y por tanto se produzca una señal eléctrica de mayor o menor magnitud (Sáenz, 2010). Los sistemas basados en instrumentación virtual tales como Labview incluyen un control automático para medir la temperatura sin contacto, es decir con sensores no invasivos (Wenlian, Yang, y Fan, 2010) adquiriendo datos en tiempo real, en que además se pueden mostrar datos de presión de aceite, temperatura y calidad de las pastillas (Xiao y Fu Sheng, 2011). Un ejemplo de este tipo de sensores es el sensor infrarrojo modelo CTP7 de Micro-Epsilon con un rango de medición de 0 °C hasta 500 °C (Montenegro, Navarro y Rigioni, 2014) o el sensor MLX90614 con un sistema embebido Arduino (Dalimus, 2014), que al ser modelados en Matlab/Simulink, su precisión puede ser correlacionada, al mismo tiempo se puede estimar la fuerza de fricción y el calor disipado.

Conclusiones

Para los sistemas diagnósticos, con el desarrollo de un modelo térmico a través del Método de Elementos Finitos, se puede predecir el comportamiento y rendimiento térmico del sistema, y esto se logra comprobar con datos correlacionados experimentalmente. Dado lo anterior, se concluye que con la utilización de herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) se puede simular el funcionamiento del sistema de frenos de manera precisa para detectar puntos de falla. Entre estas herramientas se encuentran: Matlab, Simulink, Abaqus, Ansys y Labview.

En cuanto a las técnicas computacionales de aprendizaje automático, se deben considerar en el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco, pues al desarrollar estas técnicas que permiten a los computadores aprender, se pueden diseñar algoritmos para la detección de fallas a partir de su caracterización, ya que son el principal insumo para el diseño de los algoritmos

que desarrollan diferentes enfoques, tales como: Árbol de fallas, Algoritmos genéticos, Máquinas de vectores de soporte, redes neuronales, entre otros.

La variable temperatura debe ser controlada y monitoreada, ya que de esta depende el rendimiento de un sistema de frenos de disco, para tal fin es sensada en dos formas: En el componente fijo (pastilla de freno) y en el componente móvil (disco de freno). El termopar tipo K es el más usado para sensar la temperatura en la pastilla de freno y la forma particular de instalación es incrustado en la pastilla, pues no se expone a la fricción, y es muy importante tener en cuenta la distancia al límite de desgaste de la pastilla. Además se debe tener en cuenta el diseño y cálculo de un amplificador y transmisor hacia la unidad de procesamiento. Para la parte móvil (disco), es conveniente el uso de un sensor infrarrojo, porque este no se expone a la fricción y se evita su destrucción; la caracterización y validación de datos se deben realizar a través de cámaras infrarrojas.

Referencias

- Abu, A., Li, L., James, S. Ouyang, H. y Siegel, J. (2010). Wear Simulation and Its Effect on Contact Pressure Distribution and Squeal of a Disc Brake. In Conference on Vehicle Braking Technology (pp. 233-242). Universiti Teknologi Malaysia.
- Abu, A. y Ouyang, H. (2008). Wear prediction of friction material and brake squeal using the finite element method. *Wear*, 264(11-12), 1069-1076. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.015>
- Aleksendrić, D. (2010). Neural network prediction of brake friction materials wear. *Wear*, 268(1-2), 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.07.006>
- Aleksendrić, D. y Barton, D. C. (2009). Neural network prediction of disc brake performance. *Elsevier*, 1074-1080. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.005>
- Aleksendrić, D., Jakovljević, Ž. y Ćirović, V. (2012).

- Intelligent control of braking process. *Expert Systems with Applications*, 39(14), 11758-11765. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.04.076>
- Alnaqi, A., Barton, D. y Brooks, P. (2015). Reduced scale thermal characterization of automotive disc brake. *Applied Thermal Engineering*, 75, 658-668. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.001>
- Applus + IDIADA. (n.d.). Recuperado de <http://www.applusiada.com/es/>
- Arias, F. (1991). *Introducción a la técnica de investigación en psicología*. México: Trillas.
- Belhocine, A. y Bouchetara, M. (2012a). Thermal analysis of a solid brake disc. *Applied Thermal Engineering*, 32, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.029>
- Belhocine, A. y Bouchetara, M. (2012b). Thermomechanical modelling of disc brake contact phenomena. *FME Transactions*, 41, 59-65.
- Dalimus, Z. (2014). Braking System Modeling and Brake Temperature Response to Repeated Cycle. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 5(2), 123. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2014.v5.123-128>
- Degenstein, T. Günter, M. Keller, A. y Winner, H. (2007). Dynamic measurement of the temperature of electro conductive objects used for the example of a wheel brake. *AMA Service GmbH, A1.4(C)*, 1-5.
- Eriksson, M., Bergman, F. y Jacobson, S. (2002). On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear*, 252(1-2), 26-36. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00849-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00849-3)
- García, R. (2014). *Evaluación del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir del análisis de la aceleración del proceso de corrosión*. (Tesis de grado). Universidad Francisco De Paula Santander, Ocaña.
- García, R. (2017). Estudio térmico en tres frenos de disco ventilados, utilizando el análisis de elementos finitos. *DYNA*, 84(200), 19-27. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.55663>
- Gotowicki, P., Nigrelli, V., Mariotti, G.V., Aleksendric, D. y Duboka, C. (2005). Numerical and experimental analysis of a Pegs-Wing ventilated disk brake rotor, with pads and cylinders. In *Automotive Engineers Cooperation Conference*, at Belgrade (pp. 1-15). Belgrade. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/263818262_Numerical_And_Experimental_Analysis_Of_A_Pegs-Wing_Ventilated_Disk_Brake_Rotor_With_Pads_And_Cylinders
- Grkić, A., Mikluc, D., Muždeka, S., Arsenić, Ž. y Duboka, Č. (2015). A model for the estimation of brake interface temperature. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 61(6), 392-398. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2014.2364>
- Indira, V., Vasanthakumari, R., Jegadeeshwaran, R. y Sugumaran, V. (2015). Determination of minimum sample size for fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using power analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(1), 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.09.007>
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2013). *IEC 60584-1 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances*.
- Jegadeeshwaran, R. y Sugumaran, V. (2015). Brake fault diagnosis using Clonal Selection Classification Algorithm (CSCA) – A statistical learning approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(1), 14-23. <https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.08.001>
- Jungwirth, F. y Dornheim A., F. C. (2014). Coupled thermo-mechanical computation method for a virtual design processes of brake discs. In *Proc. 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)* (pp. 1-10).
- Lian, R., Xu, Z. y Lu, J. (2013). Online fault diagnosis for hydraulic disc brake system using feature extracted from model and an SVM classifier. In *2013 Chinese Automation Congress* (pp. 228-232). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAC.2013.6775733>

- Lü, H., Shangguan, W. y Yu, D. (2017). An imprecise probability approach for squeal instability analysis based on evidence theory. *Journal of Sound and Vibration*, 387, 96-113. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.10.001>
- Montenegro, M., Navarro, J. y Rigioni, G. (2014). Diseño de un banco de pruebas para comparar parámetros de calidad en pastillas de freno para automóviles livianos. (Tesis de Licenciatura). Universidad
- Parra, C., Olazagoitia, J. y Biera, J. (2010). Application of testing, modal analysis and numerical methods to the detection, prediction and avoidance of squeal noise in automotive brake systems. *Proceedings of ISMA 2010 - International Conference on Noise and Vibration Engineering, Including USD 2010*, (November 2014), 4351-4362. Recuperado de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84951045944&partnerID=tZOtx3y1>
- Pury, P. (2015). *Fundamentos de Aprendizaje Automático*. Córdoba, España. Recuperado de http://www.famaf.proed.unc.edu.ar/pluginfile.php/19002/mod_resource/content/2/01_introduccion.pdf
- Qi, H. y Day, A. (2007). Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking. *Wear*, 262(5-6), 505-513. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.027>
- SAE (s. f.). Recuperado de <http://www.sae.org/>
- Sáenz, A. (2010). *Sensores de Fórmula 1. De los circuitos a la carretera*. Ing. Informática, CPS, Universidad de Zaragoza, Aragón, España.
- Thuppall, S. y Kora, N. (2016). *Heat Transient Transfer Analysis of Brake Disc /Pad System*. Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering.
- Trichês, M., Gerges, S. y Jordan, R. (2008). Analysis of brake squeal noise using the finite element method: A parametric study. *Applied Acoustics*, 69(2), 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.10.003>
- Wenlian, Li, Yang, Li y Xiao, F. (2010). The design and implementation of digital temperature measurement and automatic control system. *International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, 10(Iccasm), V10-407-V10-409. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5622733>
- Xiao, K. y Sheng, F. (2011). A condition monitoring system of the disk brake based on nRF24L01. In *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 283-286). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2011.6037997>
- Zhang, L. y Meng, D. (2010). Theoretical modeling and FEM analysis of the thermomechanical dynamics of ventilated disc brakes. *SAE Technical Paper*, 01-0075. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0075>