

Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular

Considerations for designing a disc brake diagnostics system in a particular vehicle

Néstor Javier Rodríguez García¹, Iván Camilo Nieto Sánchez²

¹ *Universidad Nacional Abierta y a Distancia, ing.nestor0818@gmail.com*

² *Universidad Nacional Abierta y a Distancia, hernimi348@gmail.com,*

DOI: <http://doi.org/...>

Fecha de recepción: 19/10/2017

Fecha de aceptación del artículo: 13/11/2017

Cómo citar:

Rodríguez García, N.J., Nieto Sánchez, I.C., (2017). Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular, Bogotá, 14(1), 76-94. DOI: org/xx/xxxxx/reds.xxxx.

Resumen

El presente artículo describe los aspectos en el proceso de frenado de un vehículo particular, para determinar la viabilidad de un sistema diagnóstico que establezca su estado actual en tiempo real, disminuyendo los índices de accidentalidad establecidos por la ANSV (Agencia Nacional Seguridad Vial). Por otra parte, se relacionan investigaciones respecto al tema de sistemas de frenos de disco y cómo aportan al diseño del sistema diagnóstico, mediante simulaciones con software ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc.) y sistemas de frenos de disco utilizados comúnmente como los ABS (Sistema antibloqueo de ruedas), teniendo en cuenta los antecedentes de estos sistemas. En consecuencia, como resultado del análisis realizado a las diferentes variables del sistema de freno de disco, se determinó que la temperatura es una de las fuentes que más afecta el desempeño del sistema de frenado, ocasionando desgastes en pastillas de freno, mecanismos del mismo y deformaciones en el disco.

Palabras claves: ANSYS, Deformación, Desgaste, Freno de Disco, Temperatura.

Abstract

This article describes the aspects in the braking process in a particular vehicle, to determine the viability of a diagnostic system that establishes its actual state in real time, decreasing accident rates established by the ANSV (Agencia Nacional de Seguridad Vial). On the other hand, some researches are related to the subject of disc braking systems and how they contribute to the design of the diagnostic system, through simulations with ANSYS software (Swanson Analysis Systems, Inc.) and disc braking systems commonly used as ABS (Anti-lock wheel system), taking into account the background of these systems. Consequently, as a result of the analysis to the different variables of the disc brake

system, it was determined that temperature is one of the sources that most affects the performance of the braking system, causing wear on brake pads, brake mechanisms and disc deformations.

Keywords: ANSYS, Deformation, Wear, Disc Brake, Temperature.

1. Introducción

En las áreas de la electrónica y la mecánica se desarrollan avances tecnológicos que facilitan la vida del hombre, entre ellos se tiene la automatización de varios procesos que se utilizan en dispositivos de desplazamiento principalmente en los vehículos, por ejemplo los sistemas electrónicos de sensado de combustible, temperatura, revoluciones del motor, entre otros, pero en la actualidad no existe un dispositivo que evalúe el desgaste del sistema de frenado en un vehículo utilizando frenos de disco o que permita verificar la temperatura que puede alcanzar este en el proceso de fricción [1]this system is exposed to external environmental sand particles, wear debris and water spray. Their presence into the disc and pad interface may create dynamic and physics phenomena induced by friction surface changes which lead to brake noise and vibration issues. Thus, this paper aims to investigate the effect of environmental sand particles (silica sand and road sand particles). Los procedimientos de mantenimientos preventivos o correctivos se pueden hacer fácilmente en un centro diagnóstico para vehículos pero implica tiempo y elevados costos para saber el resultado del desgaste y cuál es el mejor mantenimiento para este tipo de freno [2], [3]among other things, on a properly functioning brake system. Air brake systems are widely used in commercial vehicles such as trucks, tractor-trailers, and buses. In these brake systems, compressed air is used as the energy transmitting me-

dium to actuate the foundation brakes mounted on the axles. In this paper, a model-based diagnostic system for air brakes is presented. This diagnostic system is based on a nonlinear model for predicting the pressure transients in the brake chamber that correlates the brake chamber pressure to the treadle valve (brake application valve. Entre tanto, existen tecnologías que han surgido respecto a los sistemas de frenos como los ABS (Sistema antibloqueo de ruedas), estos permiten una relación respecto a la adherencia de las ruedas con el pavimento, y algunos dispositivos desarrollados electrónicamente cuya función es la de garantizar el normal funcionamiento de los sistemas de frenado ABS.

Dado lo anterior, es indispensable diseñar un dispositivo que haga del sistema de frenado más seguro y confiable, por lo que esta investigación permite establecer los antecedentes, parámetros y variables que se deben tener en cuenta para iniciar el proceso de diseño; cabe resaltar que los resultados aquí presentes hacen parte de la primera fase de desarrollo del sistema diagnóstico y éstos indican el rumbo que se debe tomar en el desarrollo del prototipo final.” [4].

2. Estado actual respecto al índice de accidentalidad en Colombia

Antes de iniciar con el proceso de análisis de las variables y parámetros que intervie-

nen en el proceso de frenado, es ineludible el tener presente los resultados de los índices de accidentalidad en Colombia, dado que es un asunto fundamental para el inicio de esta investigación.

Entre los estudios que la Universidad Nacional ha desarrollado sobre las dinámicas de accidentalidad vial, así como algunas de sus consecuencias y tipos de víctimas, es preciso remitirse al concepto de accidente de tránsito establecido en la Ley 769 de 2002 que define un accidente de tránsito como “todo evento, por lo general involuntario, generado al menos por un vehículo en movimiento que causa daños a personas o a bienes involucrados en él. El cual se traduce en víctimas con lesiones mortales o personales” [5].

Desde este ángulo, es preciso mencionar algunos de los factores que se denotan como los más recurrentes en un accidente, asociados a los efectos del alcohol, abuso o exceso descontrolado de velocidad, así como el no uso del cinturón de seguridad. Igualmente, existen factores humanos relacionados con el riesgo de accidentalidad, tales como el sueño, cansancio, estrés, consumo de sustancias psicoactivas, la atención dispersa, fallas en la memoria, agresividad, fatiga, falta de energía y la competitividad al conducir [6], [7].

Por otra parte, pero sin dejar de lado las causas en percances viales, es importante tener en mente los datos estadísticos proporcionados por la Agencia Nacional de Seguridad Vial en el 2017, donde se establece el porcentaje de víctimas fatales y no fatales en el año 2016 entre las que se hace parte peatones, motociclistas y en un menor, pero siempre considerable porcentaje a pasajeros, automovilistas, entre otros [8], [9]; así como se hace

énfasis en resaltar que la accidentalidad vial es la segunda causa de mortalidad violenta en el país.

A partir de los estudios objetivos y subjetivos de la accidentalidad vial en el país, se estableció que los tipos de vehículos que, con frecuencia se ven involucrados pero de los que no se puede asegurar que sean quienes lo provocan dichos percances son: automóviles (38,4%), motos (28,3%), buses (10,5%), vehículos de carga pesada (7,3%) y bicicletas (16.8%) [8]. En dichos sucesos se registran accidentes asociados a problemas en los sistemas de frenado en vehículos, por lo que se evidencia un índice de accidentalidad preocupante para los conductores que están expuestos a presentar una falla sin que un sistema les informe el estado de los frenos de disco.

Es preciso mencionar que muchos de los datos que se llegaron a recolectar y estudiar por la Universidad Nacional son vitales, puesto que son un insumo básico para diseñar políticas de prevención que de algún modo, sirvan como puente de evaluaciones penales, civiles y administrativas, y a la vez brinden la oportunidad de diseñar un sistema que informe en tiempo real del estado de los frenos del vehículo, por consiguiente con estos informes se inicia con la urgente necesidad de desarrollar el sistema diagnóstico.

3. Composición de un Sistema de Frenos de Disco

Inicialmente, es importante contextualizar al lector acerca de la composición de un sistema de freno de disco, donde se describen las características y elementos que

componen el sistema de freno [10]–[16] a novel approach to reduce the effect of negative damping that causes brake noise is proposed by applying an Active Force Control (AFC). A continuación, se menciona el tipo de freno de disco, objeto de esta investigación:

3.1 Freno de pinza oscilante

También conocido como freno de reacción, sólo utiliza dos pastillas y un pistón; Cuando el líquido de freno acciona el pistón, el mecanismo empuja el disco de tal forma que las dos pastillas entran en contacto con el disco para detener el vehículo. Posteriormente cuando el usuario levanta el pie del freno, la inercia del disco regresa el sistema a su posición original [17]–[19]

En vehículos de carga es común usar este sistema como freno de parqueo o también conocido como freno de mano, y en cuanto a variaciones de este tipo de freno existen los frenos de bastidor flotante y frenos de pinza flotante[20].

3.1.1 Freno de pinza flotante

Este tipo de freno utiliza el líquido que ha sido dirigido por la bomba inyectora, para ejercer una presión en el pistón de tal forma que éste mueva la pastilla en dirección al disco para frenar el vehículo [21], [22]. En la Figura 1 se observan las piezas que hacen parte del sistema, entre estos se encuentra en el pistón (indicador 7); la pinza (indicador 3), y dentro de esta última se encuentra la pastilla del freno (indicador 4), la cual ejerce una presión contra el disco (indicador 5); por otra parte cuando se ejerce dicha presión entre la pastilla y el disco, estos reaccionan en

sentido contrario juntando la otra pastilla de freno de forma tal que las dos entran en contacto permanente con el disco, por ende el resultado obtenido es la acción de frenado. Este movimiento es posible debido a los tornillos guía (indicador 2), que permiten mantener un equilibrio entre ambas caras del disco[19], [20].

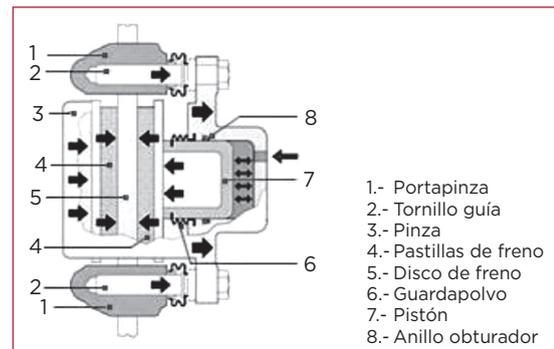


Figura # 1. Esquema de funcionamiento de un freno de disco de pinza flotante.

Fuente: Aficionados a la Mecánica.

4. Análisis de Sistemas de Transmisión y Frenado

Para el diseño del sistema diagnóstico se hace necesario realizar el análisis de los embragues de fricción, de centrifugado, electromagnéticos, hidráulicos y multidisco, así como los tipos de cajas de cambio, los sistemas de transmisión y frenado junto con sus auxiliares; elementos que hacen parte del funcionamiento de un vehículo automotriz.

Desde esta perspectiva, es preciso iniciar estableciendo que los sistemas de embrague son un conjunto de elementos que de alguna manera tienen como finalidad impedir la interacción entre el motor y la caja de cambios. Por otra parte, existen cinco tipos de embragues diferentes y a

los que a cada uno se les atribuye una función determinada, tal como se evidencia en el caso de fricción con el que se puede transmitir movimiento del motor a partir de un sistema de mando. El embrague centrífugo el cual sin ayuda del conductor hace girar o dar movimiento al motor, mientras que el electromagnético transmite movimiento a partir del uso de pequeñas partes metálicas, mientras que en el caso de los embragues hidráulico y multidisco generan dicho movimiento a través de turbinas y disminuyen su diámetro [23].

Así mismo, en algunos de los factores que se deben tener en cuenta en el proceso de mantenimiento al sistema de embragues son: las averías causantes de tensión en el cable de mando o desgaste en los forros de fricción, constantes vibraciones que causan deformaciones en los discos, así como la rotura de patillas o el desgaste en la presión de tornillos; todas estas son causantes que pueden afectar el buen funcionamiento de un vehículo automotriz.

De los temas tratados anteriormente se puede establecer la necesidad de diseñar sistemas que permitan identificar inconvenientes que puedan presentarse en el proceso de frenado de un vehículo, por ende esta investigación incluyó una búsqueda de información en diferentes bases de datos para establecer referentes en cuanto a los sistemas objeto de esta investigación [24]–[35]. A continuación, se describe una de las investigaciones más relevantes que muestran los resultados relacionados con sistemas de frenado por medio de discos y qué dificultades se presentan en estos dispositivos.

4.1 Diagnóstico sobre frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión

El artículo de investigación “Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión” de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el que se intenta explicar cómo el sistema de frenado de un automóvil es un conjunto de elementos que trabajan entre sí, en una especie de hilo conductor que de algún modo son parte vital para la seguridad del vehículo y de quien hace uso de él [36]

Desde este ángulo, es preciso mencionar que el sistema de frenado automotriz es aquel que tiene la función de disminuir o anular la velocidad de dicho vehículo; propósito que solo se logra a partir del esfuerzo ejercido por cierta energía, conocida con el nombre de cinética y la que en gran porcentaje es absorbida por los frenos de disco delanteros y otra parte de esta por el tambor.

Cabe mencionar, que dicho proceso de frenado deja de ser óptimo desde que exista corrosión, desgaste o un tipo de fricción que de algún modo altere el buen funcionamiento del sistema de frenado en un automóvil; teniendo como principales causas la presión hidráulica que estimulan las pastillas de freno contra el disco, la transferencia de calor a altas temperaturas que se almacenan en el disco; teniendo presente que estas pueden disipar la energía cinética y llegará a altos valores de temperatura y ser convertidos en una especie de radiación [36], [37]

Es pertinente resaltar, que al leer dicho artículo de investigación se puede llegar a reconocer que las mesetas más difíciles de proteger son las metálicas, puesto que estas al ser de dicho material sufren mayor desgaste al ser más y compactadas, por lo que el comportamiento de frenos es de inferior calidad a otros por las condiciones de trabajo a los que se exponen.

De este mismo modo, el constante desgaste del hierro fundido es otra de las dificultades, así como los materiales que de algún modo se componen por cerámica, carbono y grafito que tienen un uso limitado e impide que el sistema de frenado ideal sea aquel que tiene una larga vida, ausencia de vibraciones y ruidos fuera de lo habitual o esperado al tener un automóvil.

Así mismo se reconoce que algunas de las muestras investigativas que se exponen en dicho documento hacen referencia que el comportamiento de los frenos se debe a las reacciones tribo-químicas, es decir, a las bajas temperaturas en la resina fenólica que conllevan a la oxidación de los componentes metálicos y lo que se pudo identificar gracias a la macrofractografía de los discos en los que se puede llegar a identificar si hay algún tipo de grieta, oxidación o corrosión por las bajas o altas temperaturas producidas y las que producen tensiones en el frenado.

En esta investigación es importante destacar que el análisis de los cálculos matemáticos de los componentes más destacados en un vehículo como la masa, peso de los ejes, el radio dinámico de la rueda, entre otros, describen el comportamiento del disco y a través de la

simulación, se encontró como resultado que en mayor parte el desgaste y la aceleración de la corrosión se produce por el contacto metal a metal, generado por el contacto de las pastillas y por los fenómenos estáticos como deformaciones, esfuerzos y pérdidas estructurales que afectan los comportamientos del sistema de frenado.

5. Consideraciones Generales para el Desarrollo del Sistema Diagnóstico

En el siguiente contexto se presenta el análisis y las características principales para el diseño del sistema diagnóstico de freno de disco

5.1 Emisión de partículas en el aire por medio de los materiales del sistema de frenado y desgaste

La gente que habita en las ciudades está expuesta a un alto riesgo de salud con la exposición a fuentes antropogénicas de partículas de materia que circulan en el aire, en la mayoría de los casos producto del desgaste de frenado en vehículos de transporte que utilizan sistemas de freno de disco. Por ende, para este estudio es importante determinar la densidad efectiva de las partículas; por ejemplo, la medición que se realiza en instrumentos de aerosol. Para el estudio e investigación de la densidad efectiva de las partículas en el aire a causa de los materiales del freno del vehículo, se presentan dos métodos para la medición de la densidad efectiva, el primero se basa en las mediciones de la distribu-

ción del tamaño de la partícula [38]. El segundo método involucra mediciones como el tamaño aerodinámico de la distribución, en conclusión se encontró que la densidad efectiva es $0.75 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$, la emisión de la partícula, el tamaño de la distribución y la densidad efectiva son sensibles a las variaciones de la temperatura, en una emisión constante de partículas pequeñas se inicia con la temperatura del disco a 16°C , la densidad efectiva disminuye con la temperatura en el intervalo $110\text{-}360^\circ\text{C}$ [39]

5.2 Temperatura y tensión de los frenos de disco en los vehículos

El principal estudio de la investigación es el análisis del comportamiento que sufre el contacto entre el freno de disco y las pastillas, para ello los investigadores utilizaron un software de simulación denominado ANSYS 11.0 donde demostraron el comportamiento del freno de disco con el sistema de presión de las pastillas, llegando a la conclusión que la temperatura termo-mecánica se incrementa al aumentar la presión con el contacto seco entre el freno de disco y las pastillas [40]. Por otra parte, al observar este comportamiento de aumento de temperatura se establece como condición que el sistema de ventilación se debe garantizar en el proceso de rodamiento del disco para que se presente resistencia al aumento de este; dado que, en el proceso de frenado seco del vehículo, la presión ejercida por las pastillas y el incremento de la temperatura hacen que el disco presente deformaciones que afectan el normal funcionamiento del sistema.

En el estudio del flujo de calor hacia el disco del freno, se tiene en cuenta el principio de transformación de energía mecánica a energía calórica, la distribución del calor se genera por medio del calentamiento del freno de disco durante el frenado, luego la temperatura se puede disipar por medio de ondas de calor que, en un rango de 300°C a 800°C , por lo que la conductividad térmica en las pastillas del freno es menor que las del disco. Se puede deducir que el flujo térmico es absorbido en su mayoría por el disco y la forma de disipación del flujo es igual a la potencia de fricción.

Las fuerzas que intervienen en el proceso de frenado junto con el diseño simulado del disco ventilado en ANSYS se muestran en la figura 2.

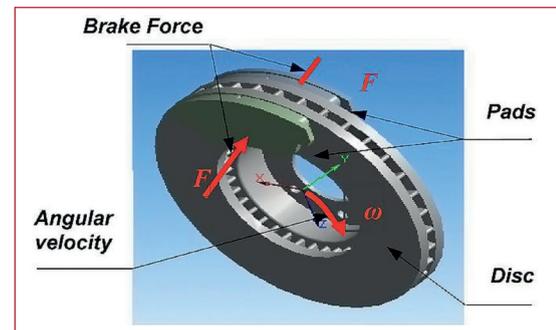


Figura # 2. Sistema de freno simulado en ANSYS

Fuente: Temperature and Thermal Stresses of Vehicles Gray Cast Brake.

En la cual: Brake force es la fuerza de frenado, Angular velocity es la velocidad angular, Pads hace mención a las pastillas de freno y Disc es el disco del sistema de frenado. Por otra parte, la Tabla 1, muestra los parámetros para el diseño y simulación del comportamiento del flujo térmico, en este dispositivo.

Tabla # 1. Propiedades termo-elásticas utilizadas en la simulación ANSYS

Propiedades del Material	Pastilla	Disco
Conductividad Térmica, k ($Wm^{-1}°C^{-1}$)	5	57
Densidad, ρ (kgm^{-3})	1400	7250
Calor Específico, c ($JKg^{-1}°C^{-1}$)	1000	460
Coefficiente Poisson's, ν	0.25	0.28
Expansión Térmica, α ($10^{-5}°C^{-1}$)	10	10.8
Módulo Elástico, E (GPa)	1	138
Coefficiente de Fricción, μ	0.2	0.2
Velocidad Angular, ω (rds^{-1})		157.89
Presión Hidráulica, P (MPa)		1

Fuente: ANSYS.

Entre los resultados obtenidos, se aprecia que el proceso de flujo térmico en el disco se distribuye hacia el exterior originando deformación en disco con una variación promedio de 0 a 284 micrómetros, con un tiempo de desplazamiento para la simulación de 3.5 segundos.

En la Figura 3 se observa que el tiempo de simulación de 1.72 segundos corresponde a la imagen a la izquierda y el tiempo simulado que obtiene la deformación mayor con un tiempo de 3.5 segundos corresponde a la imagen a la derecha. En término del desarrollo de la simulación del comportamiento del flujo térmico en el disco, se puede observar que la temperatura asciende cuando la fricción es más alta alcanzando temperaturas de 800°C, permitiendo deformaciones en el disco, estos comportamientos pueden generar problemas de reacción en el proceso de

frenado teniendo en cuenta que la temperatura se incrementa abruptamente en tiempos como el simulado igual a 3.5 segundos [41].

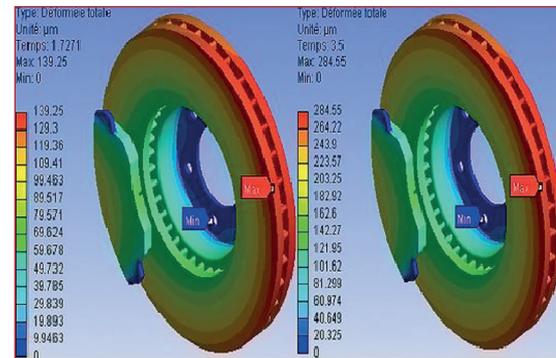


Figura # 3. Tiempo de simulación y deformación del disco debido a las altas temperaturas

Fuente: Temperature and Thermal Stresses of Vehicles Gray Cast Brake.

5.3 Problemas asociados al líquido de frenos

Los sistemas de freno funcionan a partir del uso de líquido hidráulico, el cual cumple con unas características de operación establecidas que garantizan un óptimo funcionamiento en condiciones extremas, tales como temperaturas altas y bajas, o compresión del líquido, sin sufrir alteraciones. En cuanto al principio de funcionamiento, este sistema de freno está basado en la ley de Pascal, donde se establece que la fuerza aplicada en un punto A es transmitida a un punto B usando un líquido incompresible, por ende y de acuerdo a la relación entre los diámetros cada cilindro (actuadores) se aplica una fuerza mínima en uno de ellos, obteniendo una fuerza multiplicada en el otro punto [42], [43].

A partir de este fluido, se establecen diferentes parámetros que son medibles

tales como las condiciones del fluido, nivel de líquido de frenos y operación de actuadores. Dentro de los problemas más comunes asociados a los fluidos, se encontraron problemas de sellado en el pistón, pérdida de líquido de freno, alteración de las características del líquido por contaminación o límites de temperatura establecidos, falla en el actuador del freno, entre otras.

No obstante, estos parámetros pueden medirse a partir de las variables Presión y Temperatura, dado que, si se registra una variación de cualquiera de estas variables fuera de los rangos establecidos por el fabricante del líquido de frenos, puede ocasionar daños como los mencionados anteriormente.

Es por esto que problemas de sellos, pérdidas de fluidos, alteraciones en la densidad del material y demás pueden ser detectados a partir de la presión del fluido, puesto que un cambio en las condiciones de operación del mismo evidenciará una falla en el sistema de freno. Mientras que problemas asociados a la calidad del líquido del freno se puede establecer indirectamente a partir de la temperatura [40], [44], [45].

6. Diseño y modelamiento del sistema diagnóstico del freno de disco

A continuación, se hará una descripción del proyecto de investigación corres-

pondiente al diseño y modelamiento del sistema diagnóstico que se desea implementar, estableciendo las fases del mismo junto con el modelamiento geométrico del disco y la primera etapa correspondiente a la simulación teniendo en cuenta las características físicas del mismo.

6.1 Proyecto de Investigación

Dado que el este artículo hace parte de los resultados parciales del proyecto de investigación denominado Sistema diagnóstico para detección de problemas asociados a los frenos de disco en un vehículo particular, se consideró importante hacer un contexto del mismo y los resultados que se esperan obtener con su desarrollo.

El proyecto plantea tres (3) fases principales (figura 4). En la fase I se pretende obtener un contexto claro a nivel nacional e internacional sobre investigaciones desarrolladas en torno a frenos de disco; para ello es importante hacer una búsqueda de información en las bases de datos y una vez analizada, se realiza un artículo de revisión documental. En la segunda fase se realizará el modelamiento geométrico del disco de freno y posterior simulación, teniendo en cuenta parámetros físicos para acercar el diseño a un modelo real. Finalmente, en la fase III se construirá un prototipo del sistema diagnóstico y se realizarán pruebas de campo usando vehículos reales en condiciones normales para validar el funcionamiento.

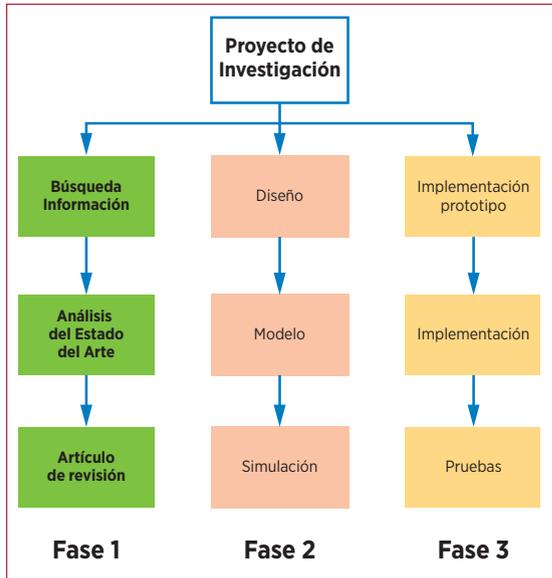


Figura # 4. Fases del proyecto de investigación del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

De acuerdo con la descripción del proyecto, la figura 6 muestra una descripción más a fondo de las fases I y II, donde se procesa la información encontrada acerca de los casos de éxito registrados en artículos de investigación (Figura 5), para la construcción de un artículo de

referencia, y posteriormente el diseño del sistema desde el análisis y selección de la variable para realizar el diseño geométrico del disco (Figura 6), incluyendo las características físicas recomendadas para obtener el modelo matemático el cual será simulado en ANSYS.

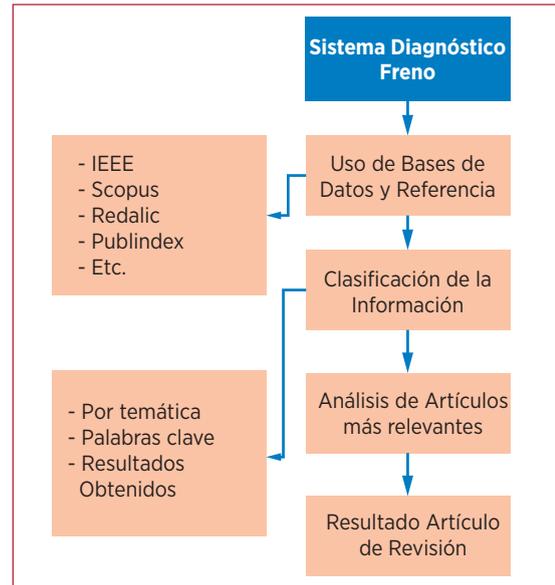


Figura # 5. Fase I del proyecto de investigación del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

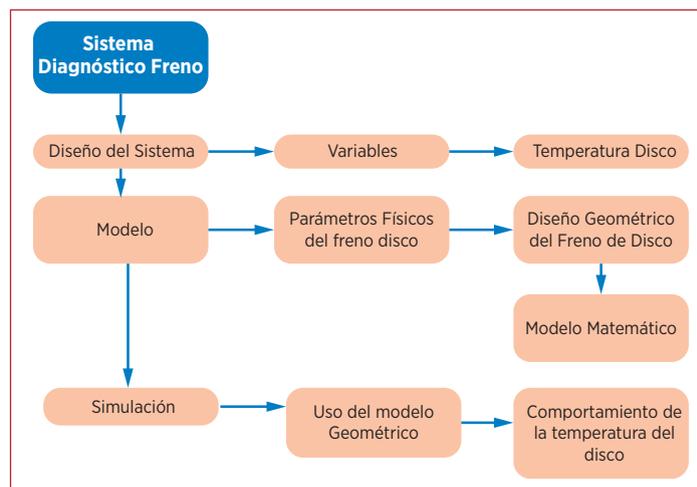


Figura # 6. Fase II del proyecto de investigación del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

Al momento de la elaboración de este artículo, el proyecto se encuentra finalizando la fase I y en desarrollo de la fase II, puesto que actualmente se cuenta con el modelo geométrico.

6.2 Modelo del diseño del sistema diagnóstico

A partir del contexto realizado en las secciones abordadas anteriormente, se propone un sistema diagnóstico que informe al usuario en tiempo real la situación actual del disco de freno de su vehículo (de uso particular), empleando la variable *Tem-*

peratura como parámetro de medición para caracterizar el modelo.

En ese sentido, se planteó un modelo donde se hace la lectura de la temperatura directamente sobre el disco de freno del vehículo y se comunica vía RF (S-RF: Señal de Radiofrecuencia) hacia la Unidad Central de Proceso (UCP), donde se hace el procesamiento de dicha señal y finalmente de acuerdo con unas condiciones de decisión se informa al usuario el resultado de la lectura y si en este momento puede sufrir algún tipo de daño en su sistema de freno. En la Figura 7 se realiza una descripción del modelo a partir de un diagrama de cajas negras.

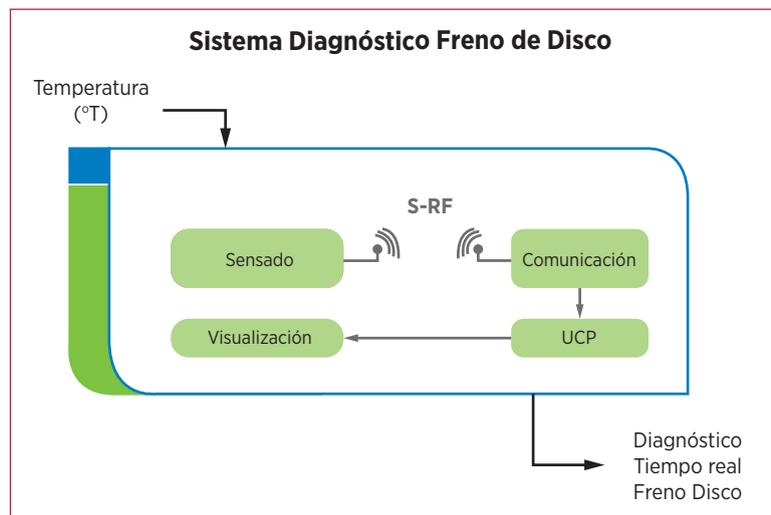


Figura # 7. Diagrama de bloques del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

El diagrama de cajas negras presentado evidencia cuatro (4) etapas básicas para realizar el procesamiento y posterior informe al usuario final; en la primera etapa se realiza la lectura de la variable a analizar (para el caso particular será la temperatura), posteriormente se encuentra la etapa de comunicación donde se codifica la señal obtenida

de la variable para garantizar un procesamiento adecuado en la siguiente etapa denominada como UCP, donde se realizará el análisis de la variable contra el modelo matemático caracterizado, y finalmente dicho resultado será presentado al usuario final a través de la última etapa del proceso llamada Visualización.

Cada etapa de las mencionadas anteriormente es considerada como un subsistema donde se realizan diversos procesos que permiten obtener el resultado esperado. En la siguiente sección se realizará una descripción de cada subsistema, describiendo de forma más detallada cada proceso.

6.3 Etapas del sistema diagnóstico

6.3.1 Etapa de sensado:

Como se mencionó anteriormente, esta etapa realiza la lectura de la variable Temperatura para ser enviada vía RF hacia la etapa de comunicación. Para ello

se construirá un dispositivo de tamaño reducido (30 x 25 x 15 mm) empleando un sensor de temperatura (al momento de esta publicación se han realizado pruebas con una termocupla. Sin embargo, no se descarta probar otras fuentes de lectura), cuya señal será ingresada a un Arduino Nano dado su tamaño para convertir la señal analógica entregada por el sensor y así convertirla en una señal digital que será transmitida por el módulo RF de 433 MHz hacia la etapa de comunicación. La ubicación del sensor en relación con el disco no debe superar un centímetro para garantizar una medición acertada. En la Figura 8 se muestra el esquema descrito anteriormente.

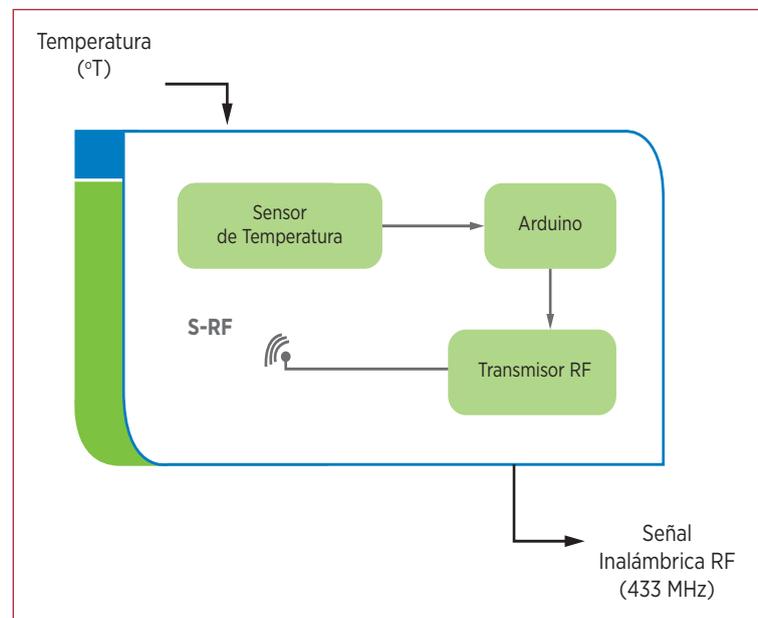


Figura # 8. Etapa de sensado del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

6.3.2 Etapa de comunicación:

En esta etapa se recibe la señal RF emitida por el la etapa de sensado, y usa un dispositivo Arduino para convertir la señal recibida a una que sea reconocida por el dispositivo que realizará el procesamiento de la señal. Dicha conversión se realizará utilizando el protocolo BCD.

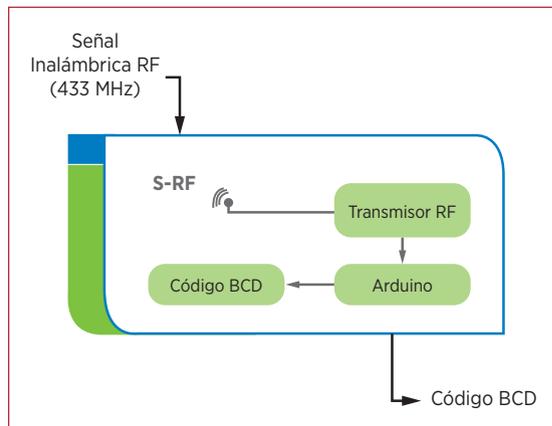


Figura # 9. Etapa de comunicación del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 9, la salida codificada será ingresada a la siguiente etapa para su análisis.

6.3.3 Etapa UCP (Unidad Central de Proceso):

Esta etapa es la pieza principal del modelo puesto que se realiza la comparación de la señal contra el modelo propuesto. Aquí se ingresa la señal enviada por la etapa de la comunicación y se analiza utilizando un dispositivo de procesamiento denominado *Field Programmable Gate Arrays (FPGAs)*, para establecer el estado del disco de acuerdo a la temperatura sensada. El método para definir estos valores de temperatura se obtiene a través de una regla construida a partir de pruebas estadísticas producto de las simulaciones realizadas.

El resultado de este análisis es comparado con el modelo matemático desarrollado en el software de modelamiento geométrico

llamado ANSYS, donde se caracterizó el comportamiento del disco a partir de la variable Temperatura y así validar si el resultado obtenido corresponde a un dato real, dado que éste permite configurar parámetros como el tipo de material, el coeficiente de fricción, entre otros.

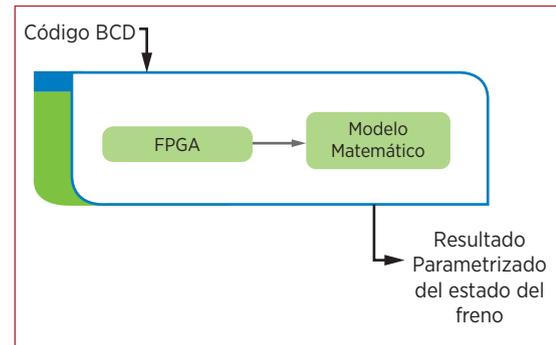


Figura # 10. Etapa UCP del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

En la Figura 10 se observa el ingreso de la señal a la FPGA ser procesada y posteriormente comparada con el modelo geométrico diseñado, para generar el diagnóstico final, el cual será enviado a la siguiente etapa.

6.3.4 Etapa de Visualización:

Finalmente, en esta etapa se presentará al usuario el diagnóstico encontrado en la etapa de procesamiento a través de una pantalla LCD que será controlada a través del mismo Arduino usado en la etapa de comunicación, y además indicando el valor de temperatura leído en el momento del análisis. En la Figura 11 se observa la arquitectura de esta etapa la visualización del resultado al usuario final.

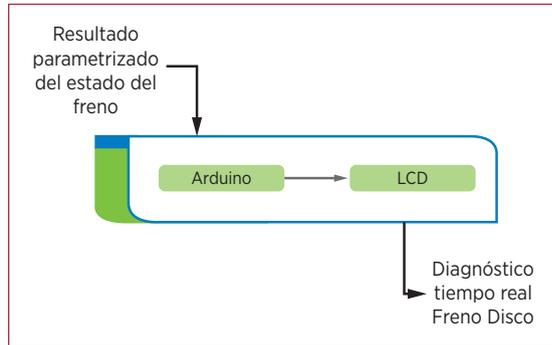


Figura # 11. Etapa de visualización del sistema diagnóstico del freno de disco.

Fuente: Autores

6.4 Primera etapa del proceso de simulación

En la fase de modelamiento del sistema diagnóstico del freno de disco se considera realizar el diseño a través del modelamiento geométrico, para realizar las respectivas pruebas de calor generadas por la de fricción entre éste y las pastillas de freno [46]. Para ello se construye el disco mediante la herramienta CAD, teniendo presente tanto los resultados de diseño obtenido en el proyecto, como la investigación que se presentó anteriormente en este documento [47]. En la Figura 12 se muestra inicialmente el diseño del disco mediante el software de diseño ANSYS, el cual presenta la cara superior del disco de freno desarrollado por los investigadores, con las características de un disco de freno genérico: Masa 9,6 Kg, Volumen: 0,0013 m³, Densidad: 7200 kg/m³, tipo de material: Hierro de fundición gris.



Figura # 12. Vista superior del modelo geométrico del disco de freno.

Fuente: Autores

En la Figura 13 se puede apreciar desde una mejor perspectiva el diseño del freno de disco que se ha desarrollado, el cual pasará a la siguiente etapa donde se desarrollará el modelo matemático que describa el comportamiento del disco en términos de la temperatura, teniendo en cuenta la fricción que ejerce las pastillas cuando el disco está en movimiento



Figura # 13. Vista frontal del modelo geométrico del disco de freno.

Fuente: Autores

Continuando con el proceso de simulación, se lleva el modelo del freno de disco bajo condiciones de potencia calorífica radiada y convección térmica; en consecuencia, se puede observar que el disco sin ningún proceso de frenado tiene un comportamiento de radiación de temperatura igual a la temperatura ambiente como se muestra en la Figura 14 con un valor de 295° Kelvin.

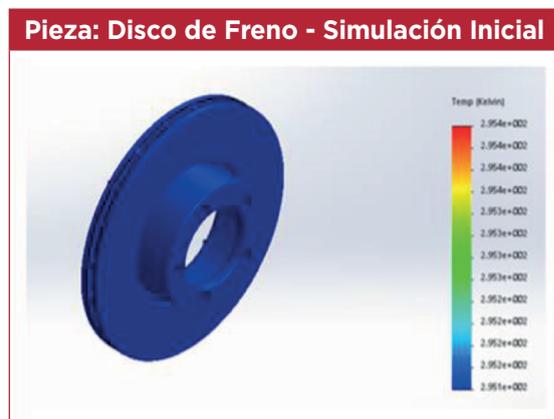


Figura # 14. Simulación inicial del modelo geométrico del disco de freno.

Fuente: Autores

Por otra parte, en la Figura 16 se aprecia el comportamiento del disco en su cara posterior, evidenciando una baja temperatura en el orificio de tornillo de rueda para la ubicación de los pernos del disco; esta sección se encuentra una temperatura ambiente de 295° K la cual indica que el comportamiento de la temperatura afecta directamente el área del disco donde se produce la fricción sin afectar la ubicación de la base de éste, sin embargo el tener distintas temperaturas sobre el elemento en el proceso de frenado generan una afectación, causando un desgaste mayor en el disco, por lo que es necesario el proyecto actual.

Posteriormente en la Figura 15 se observa que, aplicando los siguientes parámetros de simulación como: potencia calorífica radiada: 9,5 vatios, y un coeficiente de convección térmica de 6,5 W/(m²K) a una temperatura ambiente de 295 grados kelvin, el comportamiento del flujo térmico en el disco es mayor en el área de fricción generando una elevación de la temperatura mínima de 378 K y una temperatura máxima de 389 K.

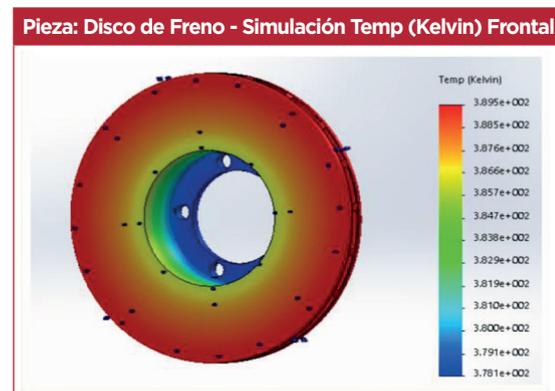


Figura # 15. Simulación de temperatura en la cara frontal del disco de freno.

Fuente: Autores

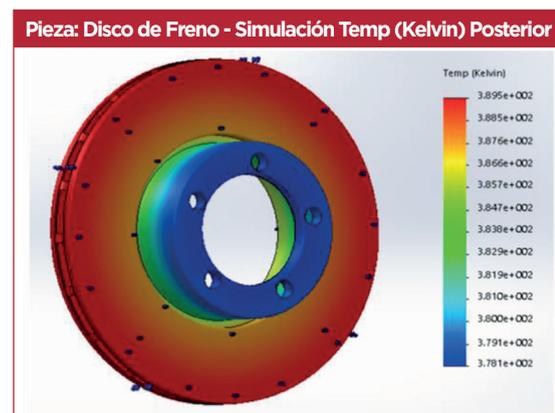


Figura # 16. Simulación de temperatura en la cara posterior del disco de freno.

Fuente: Autores

Conclusiones

Uno de los factores que se destaca como causante en las estadísticas de accidentalidad en Colombia es el asociado a fallas mecánicas, principalmente por recalentamiento del motor, avería en las llantas o fallas en los frenos, por tal razón se evidenció una oportunidad de investigación [8].

La investigación que enmarca la necesidad del diseño y desarrollo del sistema diagnóstico es la fluctuación de la temperatura que puede elevarse debido a la fricción que ocurre entre el disco y las pastillas de freno, por lo que puede alcanzar temperaturas muy altas, hasta los 800°C, y esto se debe informar en tiempo real en el vehículo generando así alerta temprana para evitar posibles accidentes por sobrecalentamiento del sistema.

Existen productos que acompañan los sistemas de frenos de disco como la generación de energía por medio del frenado, que en un futuro se puede acompañar en el sistema diagnóstico para visualizar en tiempo real la carga de baterías que pudieran utilizarse en un vehículo eléctrico [48]-[50].

Con los resultados parciales obtenidos en la primera fase de simulación, se logró establecer que es posible caracterizar un proceso de frenado en un vehículo particular; por ende, al finalizar esta fase, se espera obtener el modelo matemático requerido en el sistema diagnóstico para determinar la alerta temprana que emitirá la solución, a partir de la temperatura del disco de freno.

A pesar de que la investigación no ha culminado, se consideró necesario hacer una publicación acerca de los antece-

denes y los logros alcanzados hasta el momento, partiendo de los requerimientos del proyecto y el proceso de diseño del sistema diagnóstico, para el registro de una posible patente del producto final, teniendo en cuenta que al momento de la publicación de este artículo no se registra una solución como la planteada por los autores.

Referencias

- [1] M. Kchaou, A. R. Mat Lazim, M. K. Abdul Hamid, and A. R. Abu Bakar, "Experimental studies of friction-induced brake squeal: Influence of environmental sand particles in the interface brake pad-disc," *Tribol. Int.*, vol. 110, no. November 2016, pp. 307-317, 2017.
- [2] S. C. Subramanian, S. Darbha, and K. R. Rajagopal, "A Diagnostic System for Air Brakes in Commercial Vehicles," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, pp. 360-377, 2006.
- [3] W. Lin and T. Tang, "Active Safety Diagnosis of Brake-by-Wire Systems with Unscented Kalman Filter," pp. 1-6.
- [4] N. Cheifetz, P. Akinin, and E. De Verdalle, "A pattern recognition approach for anomaly detection on buses brake system," *2011 14th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, pp. 0-5, 2011.
- [5] R. A. Garcia Leon, "Estudio térmico en tres frenos de disco ventilados, utilizando el análisis de elementos finitos," *Dyna*, vol. 84, no. 200, pp. 19-27, 2017.
- [6] Grupo SURA, "Accidentalidad en carretera, problema para la seguridad vial." [Online]. Available: <https://www.sura.com/blogs/autos/accidentalidad-carretera-seguridad-vial.aspx>. [Accessed: 04-Oct-2017].

- [7] R. Saddem, A. Toguyeni, and M. Tagina, "Diagnosis of critical embedded systems: Application to the control card of a railway vehicle braking systems," *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, pp. 163-168, 2011.
- [8] Agencia Nacional de Seguridad Vial, "Consultas Nivel Nacional - Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV)." [Online]. Available: <http://ansv.gov.co/consultas-nivel-nacional/>. [Accessed: 04-Oct-2017].
- [9] J. I. Ruiz and A. N. Herrera, "Accidentes de tránsito con heridos en Colombia según fuentes de información: caracterización general y tipologías de accidentes," *Rev. CES Psicol.*, vol. 9, no. ISSN 2011-3080, pp. 32-46, 2016.
- [10] M. Mailah, A. Rahim, and A. Bakar, "An Active Control Method to Reduce the Effect of Negative Damping in Disk Brake System," *2009 Conf. Innov. Technol. Intell. Syst. Ind. Appl. (CITISIA 2009)*, no. July, pp. 34-39, 2009.
- [11] S. Li, "The Disc Brake Design and Performance Analysis," *IEEE Xplore*, pp. 846-849, 2011.
- [12] J. ROBERTS, "The other brake option.," *Overdrive*, vol. 55, no. 10, p. 42, Oct. 2015.
- [13] Ingemecánica, "Frenos de Disco en los Vehículos Automóviles," *Ingemecánica*. [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn74.html>. [Accessed: 12-Aug-2017].
- [14] A. M. Parera, *Frenos ABS*. Marcombo, 1993.
- [15] J. R. Montes, J. C. S. R. M. J. R. M. M. M. C. C. Julián Rodríguez Montes, J. C. S. Rodríguez, M. J. R. Maqueda, and M. M. C. Castro, *Teoría de las máquinas: fundamentos y aplicaciones*, 1st ed. Madrid España: Vision Net, 2005.
- [16] J. M. A. PÉREZ, *Sistemas de transmisión y frenado*. Paraninfo, 2014.
- [17] L. Franklin and L. Taris, "Tesis de grado," 2014.
- [18] Á. Ferrer, "Frenos de disco y de tambor: Cómo son y cómo funcionan," *Autonación.com*, 2015. [Online]. Available: <https://www.autonacion.com/frenos-disco-tambor-componentes-tipos-funcionamiento/>. [Accessed: 12-Aug-2017].
- [19] E. J. Domínguez and J. Ferrer, *Elementos y piezas del sistema de frenos (Sistemas de transmisión y frenado)*: Editorial Editex, 2012.
- [20] Aficionados a la mecánica, "Sistema de frenos: frenos de disco." [Online]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/frenos-3.htm>. [Accessed: 04-Oct-2017].
- [21] R. Bosch, *Sistemas de freno convencionales y electrónicos*, 3rd ed. Germany: Robert Bosch GmbH, 2003.
- [22] J. Calvo Martín and A. Miravete de Marco, *Mecánica del automóvil actual*, 1st ed. Zaragoza: Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza, 1997.
- [23] C. J. Borja, J. Fenoll, and J. S. de Herrera, *Sistemas de Transmisión y Frenado*. 2009.
- [24] X. Yang, J. Wang, and Y. Liu, "Dynamic Properties of Disk Brake Based on Thermo-elastic Instability Theory," in *international Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010, pp. 2756-2759.
- [25] J.-O. Hahn, S.-H. You, Y. M. Cho, S. Kang, and K. Il Lee, "Fault diagnostics in the differential brake control system using the analytical redundancy technique," *Decis. Control. 2003. Proceedings*.

- 42nd IEEE Conf., vol. 3, no. December, p. 2276–2281 Vol.3, 2003.
- [26] Z. Yang, C. Liu, J. Wang, and X. Yang, “Dynamic analysis of disc brake and impact law of related parameters on braking torque,” in *2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2010, pp. 1478–1483.
- [27] C. Mahesh, “Flow and Heat Transfer Analysis of Variable Diameter Circular Pillar Disc Brake Rotor Using CFD,” *7th Int. Conf. Mech. Aerosp. Eng.*, pp. 146–153, 2016.
- [28] H. Yamamura and Y. Liang, “Improved ensemble empirical mode decomposition method for investigating disc brake squeal signals,” *ICSP2014 Proc.*, no. 1, pp. 205–209, 2014.
- [29] J. Luo, M. Namburu, K. R. Pattipati, L. Qiao, and S. Chigusa, “Integrated model-based and data-driven diagnostic strategies applied to an anti-lock brake system,” *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, vol. 2005, no. 1, 2005.
- [30] P. D. Neis, N. F. Ferreira, G. Fekete, L. T. Matoso, and D. Masotti, “Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads,” *Tribol. Int.*, vol. 105, no. June 2016, pp. 135–147, 2017.
- [31] K. Xiao and S. Fu, “A condition monitoring system of the disk brake based on nRF24L01,” *Proc. - IEEE 2011 10th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments, ICEMI 2011*, vol. 4, pp. 283–286, 2011.
- [32] R. Udayakumar and R. Ponnusamy, “Computer aided design and analysis of disc brake rotors for passenger cars,” *2013 Int. Conf. Comput. Appl. Technol.*, vol. 2, no. m, pp. 1–5, 2013.
- [33] D. Ma, Y. Jang, Z. Zhou, T. Zhao, and D. Lin, “Grey relation analysis on fuzzy fault tree of disk brake,” *Proc. 2011 Int. Conf. Electron. Mech. Eng. Inf. Technol. EMEIT 2011*, vol. 3, pp. 1590–1594, 2011.
- [34] J. Bao, M. Tong, Z. Zhu, and Y. Yin, “Intelligent tribological forecasting model and system for disc brake,” *Proc. 2012 24th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2012*, pp. 3870–3874, 2012.
- [35] Jiuchen Fan, Yaxu Chu, Xuemei Sun, and Xun Yang, “Thermal-structure coupling analysis of disc brake,” *2010 Int. Conf. Comput. Mechatronics, Control Electron. Eng.*, 2010.
- [36] R. A. García León, M. A. Acosta Pérez, and E. Flórez Solano, “Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión,” *Tecnura*, vol. 19 No. 45, no. ISSN: 2248-7638, pp. 53–56, 2015.
- [37] P. Mart, “Design process for an electromagnetic power brake with abs function: corporate knowledge management,” *Elect. Proc. from 12th Int. Congr. Proj. Eng.*, no. July, pp. 173–184, 2008.
- [38] D. Varrica, F. Bardelli, G. Dongarrà, and E. Tamburo, “Speciation of Sb in airborne particulate matter, vehicle brake linings, and brake pad wear residues,” *Atmos. Environ.*, vol. 64, pp. 18–24, 2013.
- [39] O. Nosko and U. Olofsson, “Effective density of airborne wear particles from car brake materials,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 107, pp. 94–106, 2017.
- [40] A. Helhocine and M. Bouchetara, “Temperature and Thermal Stresses of Vehicles Gray Cast Brake,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 674–682, 2013.
- [41] R. A. García Leon and E. Pérez Rojas, “Analysis of the Amount of Heat Flow Between Cooling Channels in Three Vented Brake Discs 1,” vol. 21, no. 1, pp. 71–96, 2016.

- [42] B. J. Murphy, M. Lebold, J. C. Banks, and K. Reichard, "Diagnostic End to End Monitoring & Fault Detection for Braking Systems," *Appl. Res. Lab. Pennsylvania State Univ.*, 2006.
- [43] R. Lian and Z. Xu, "Online Fault Diagnosis for Hydraulic Disc Brake System Using Feature Extracted From Model and an SVM Classifier," *IEEE Xplore*, pp. 228-232, 2013.
- [44] O. Access, "CFD Analysis Of Straight Ventilated Disc Brake," *Nikhil K. Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 6, no. 5, pp. 34-40, 2016.
- [45] G. Bakonyi-Kiss and Z. Szucs, "Low cost, low power, intelligent brake temperature sensor system for automotive applications," *2007 IEEE Des. Diagnostics Electron. Circuits Syst.*, pp. 1-4, 2007.
- [46] A. Belhocine and M. Bouchetara, "Thermo-mechanical modelling of dry contacts in automotive disc brake," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 60, pp. 161-170, Oct. 2012.
- [47] D. G. H. G. V. Chengal Reddy, M. Gunasekhar Reddy, "Modeling And Analysis of FSAE Car Disc Brake Using FEM," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 9, pp. 383-389, 2013.
- [48] K. Itani, A. De Bernardinis, Z. Khatir, and A. Jammal, "Comparison between two braking control methods integrating energy recovery for a two-wheel front driven electric vehicle," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, no. 13, pp. 330-343, 2016.
- [49] R. Maia, M. Silva, R. Araújo, and U. Nunes, "Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 22, pp. 8504-8519, 2015.
- [50] C. Lv, J. Zhang, Y. Li, and Y. Yuan, "Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles," *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, pp. 469-482, 2015.