

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



Juan David Velásquez bran

Proyecto de investigación

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

Escuela de Ciencias Básicas Tecnologías e Ingenierías

Ingeniería Electrónica

**Bogotá D.C.
2018**

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



Juan David Velásquez Bran

Trabajo de grado

Proyecto de investigación

Asesor: Ing. Néstor Javier Rodríguez

Universidad Nacional Abierta Y A Distancia (UNAD)

Escuela de Ciencias Básicas Tecnologías e Ingenierías

Ingeniería Electrónica

**Bogotá D.C.
2018**

Resumen

Este trabajo presenta una revisión de los sistemas de diagnóstico asociados con los frenos de disco en un vehículo en particular. Este estudio presenta una metodología exploratoria, soportada por bases de datos científicas y tecnológicas, que incluye una revisión de: a) Enfoque numérico y computacional, b) Sensores invasivos y c) Sensores no invasivos. El objetivo es identificar los métodos, estudios y desarrollos de sistemas de diagnóstico que permitan monitorear el sistema de frenado de un vehículo en particular, dado que el Semillero de Investigación en Instrumentación y Telemática (SIIT) requiere desarrollar el sistema de diagnóstico de frenos de disco e implementar este dispositivo en fases posteriores. La principal conclusión de este estudio es considerar el monitoreo y control de la temperatura en las partes fijas y móviles del sistema de frenado, teniendo en cuenta que cada componente tiene un tipo especial de sensor. Se recomienda no utilizar sensores invasivos en partes móviles, para evitar su destrucción también se determina que la mayoría de los desarrollos se basan en análisis computacionales, simulaciones e implementación de bancos de instrumentación.

Abstract

This paper presents a review of the diagnostic systems associated with disc brakes on a particular vehicle. This study presents an exploratory methodology, supported by scientific and technological databases, includes a review of: (a) Numerical and computational approach, (b) Invasive sensors and (c) Non-invasive sensors. The objective is identify the methods, studies and developments of diagnostic systems that allow monitoring the brake system of a particular vehicle, given that the Instrumentation and Telematics Research Seedbed (SIIT) requires developing the disc brake diagnostic system and implement this device in later phases. The main conclusion of this study is consider temperature monitoring and control in the fixed and moving parts of the braking system, consider that each component has a special type of sensor. It is recommended not use invasive sensors in mobile parts, to avoid their destruction it is also determined that most of the developments are based on computational analysis, simulations and implementation of instrumentation banks.

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes freno de disco. Fuente (Pier Francesco Gotowicki, Prof. Vincenzo Nigrelli, 2005).....	16
Figura 2. Mapa Conceptual Metodología. Fuente: El Autor	19
Figura 3. Gestor de referencias. Fuente: Mendeley	20
Figura 4. Modelo térmico del disco de freno en Simulink. Fuente: (Thuppal Vedanta & Kora, 2016).....	28
Figura 5. Modelo computacional FEM freno de disco sólido de Mercedes. Fuente:(Abu Bakar, A R. and Li, L and James, S and Ouyang, H and Siegel, 2010).....	30
Figura 6. Variación en la temperatura frente al tiempo de los discos. Fuente: (Belhocine & Bouchetara, 2013a).....	31
Figura 7. Distribución de presión de contacto en la pastilla. Fuente: (Belhocine & Bouchetara, 2013b).....	31
Figura 8. Grafica de distribución de calor en el disco. Fuente (Jungwirth F, Dornheim A, 2014).....	32
Figura 9. Sistema diagnostico con árbol de decisiones a partir de la adquisición de datos con acelerómetro. Fuente: (Indira et al., 2015).....	34
Figura 10. Sistema diagnostico modelo CSCA a partir de la adquisición de datos con acelerómetro. Fuente: (Jegadeeshwaran & Sugumaran, 2015)	35
Figura 11. Estructura del sistema diagnóstico de freno. Fuente: (Wang et al., 2015).....	36

Figura 12. Sistema diagnostico a partir de la adquisición de datos con dinamómetro. Fuente: (Wiegemann, Sven-Eric; Fecher, Norbert; Merkel, Nora; Winner, 2016).....	37
Figura 13. Modelo Neuronal para predecir el desgaste de materiales de fricción. Fuente: (Aleksendrić, 2010)	38
Figura 14. Diagrama de Bloques del proceso iterativo. Fuente: (Luo et al., 2010)	39
Figura 15. Temperatura vs Tiempo. Fuente (Degenstein, Thomas; Günter, Marc; Keller, Alexander; Winner, 2007).....	41
Figura 16. Posición de las termocuplas en la pastilla. Fuente: (Grkić et al., 2015)	42
Figura 17. Ubicación del sensor. Fuente: (Xu & Winner, 2015)	43
Figura 18. Sistema de comunicación por RadioFrecuencia. Fuente: (Rodríguez García & Nieto Sánchez, 2017)	44
Figura 19. Sensor integrado a la pastilla de freno. Fuente: (Sivarao, M. Amarnath, M.S.Rizal, 2009)	45
Figura 20. Modelo del vehículo en Simulink. Fuente: (Dalimus, 2014).....	47
Figura 21. Análisis de Ciclo de aceleración y desaceleración repetido. Fuente: (Dalimus, 2014).....	47
Figura 22. Prueba de desgaste de alta temperatura - circuito lazo cerrado. (Verma et al., 2016)	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Coeficiente de Fricción pastillas de freno. Fuente: (ICONTEC, 2005)	16
Tabla 2. Propiedades físicas y térmicas de la fundición gris Fuente: El Autor	18
Tabla 3. Síntesis. Fuente: El Autor.....	25

Lista de siglas

NTC:	Norma Técnica Colombiana
SAE:	Society of Automotive Engineers
ASTM:	American Society for Testing and Materials
IDIADA:	Instituto de Investigación Aplicada al Automóvil
SPL:	Sound Pressure Level (Nivel de Presión del Sonido)
FEM:	Finite Element Method (Método de Elementos Finitos)
GA:	Genetic Algorithm (Algoritmo Genético)
CEA:	Complex Eigen- Value Analysis (Análisis de Valores Complejos)
DOF:	Degrees Of Freedom (Grados de Libertad)
ANSYS:	Swanson Analysis Systems (Análisis de Sistemas Swanson)
FTA:	Fault Tree Analysis (Análisis Árbol de Fallas)
CSCA:	Clonal Selection Classifier Algorithm (Algoritmo de Selección Clonal)
SVM:	Support Vector Machine (Maquinas de Vectores de Soporte)
NVH:	Noise, vibration, and harshness (Ruido, Vibración, Aspereza)
ABS:	Antiblockiersystem (Sistema Antibloqueo de frenos)
HILS:	Hardware-in-the-loop simulation (Simulación de Hardware en Bucle)
AADL:	Architecture Analysis and Design Language (Análisis de Arquitectura y Lenguaje de Diseño)
RFID:	Radio Frequency Identification (Identificación por Radio Frecuencia)

Tabla de Contenido

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas.....	7
Lista de siglas	8
Introducción.....	11
1. Descripción del proyecto	12
1.1. Planteamiento del problema	12
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
2. Marco referencial y Metodología	16
2.1. Marco referencial	16
2.1. Metodología.....	19
3. Análisis de la información.....	27
3.1. Análisis numérico y computacional.....	27
3.1.1. Método de elementos finitos (FEM).	27

3.1.2. Aprendizaje Automático	33
3.2. Sensores de Temperatura	40
3.2.1. Termopar Tipo K.	40
3.2.2. Microsensor.	44
3.2.3. Sensor Infrarrojo.	46
4. Resultados.	49
5. Conclusiones y Recomendaciones	51
5.1. Conclusiones.	51
5.2. Recomendaciones.	52
Referencias.	54
ANEXO 1: Artículo de Revisión	61
I. INTRODUCCION	61
II. METODOLOGÍA.....	62
III. ANALISIS Y RESULTADOS	70
IV. CONCLUSIONES	70

Introducción

Los accidentes de tránsito actualmente constituyen un problema grave a nivel mundial; según La Organización Mundial de la Salud, a través del Informe sobre la situación mundial de la Seguridad Vial (SALUD, 2015), indica que anualmente fallecen más de 1,25 millones de personas en el mundo, por accidentes de tránsito.

En Colombia las cifras del Observatorio de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), revelan que entre enero y noviembre de 2017, se registraron 5833 fallecidos (Redacción EL TIEMPO, 2017); las principales causas se originaron por exceso de velocidad, consumo de alcohol, exceso de confianza y fallas mecánicas del vehículo, en las que se incluye el sistema de frenos y es claro afirmar que este es un sistema de seguridad destinado a prevenir colisiones, la eficacia de este sistema se puede ver afectada por el desgaste no homogéneo del disco debido a frenados bruscos, en donde se eleva la temperatura por la fricción con las pastillas y en consecuencia se generan vibraciones igualmente un frenado deficiente, incrementando las probabilidades de accidental sin que el conductor se dé cuenta, en la mayoría de los casos se debe acudir al servicio técnico especializado para detectar una falla de este tipo.

Este trabajo presenta una revisión de los sistemas de diagnóstico asociados con los frenos de disco en un vehículo en particular, a su vez presenta una metodología exploratoria, soportada en bases de datos científicos y tecnológicos. Este se compone de cinco capítulos:

En el capítulo 1 se describe el proyecto, en el Capítulo 2 se encontrará el marco referencial y la metodología, más adelante en el capítulo 3 se hará el análisis de la información, mientras que en el capítulo 4 se presentaran los resultados y finalmente en el capítulo 5 se mostraran las conclusiones y recomendaciones del proyecto y así identificar los métodos, estudios y desarrollos de sistemas diagnóstico, que permiten monitorear el sistema de frenos de un vehículo particular.

1. Descripción del proyecto

1.1. Planteamiento del problema

El semillero de investigación SIIT (Semillero de Investigación en Instrumentación y Teleinformática) del Grupo de Investigación GIDESTEC - Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería UNAD, viene desarrollando un proyecto de investigación denominado “Sistema Diagnóstico para Detección de problemas asociados a los Frenos de Disco en un Vehículo particular”, en el que se diseñará un sistema que realice el sensado y diagnóstico del freno de disco como medida de prevención para vehículos particulares, con el propósito obtener información temprana respecto al estado del freno de disco y anomalías o fallas.

Teniendo en cuenta que los accidentes de tránsito actualmente constituyen un problema grave a nivel mundial; según La Organización Mundial de la Salud, a través del Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial (2015), indica que anualmente fallecen más de 1,25 millones de personas en el mundo, por accidentes de tránsito.

En Colombia las cifras del Observatorio de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), revelan que en el 2016 las víctimas por accidente de tránsito fueron de 6680; las principales causas se originaron por exceso de velocidad, consumo de alcohol, exceso de confianza y fallas mecánicas del vehículo.

La Seguridad vial es predecible y prevenible, es por eso que el Gobierno Nacional a través de los entes competentes ha venido implementando leyes, decretos y normas, con la finalidad de disminuir el índice de accidentalidad en el territorio Nacional; para tal efecto la Ley 769 de 2002 establece los requisitos mínimos técnico – mecánicos que para que un vehículo pueda transitar por el territorio nacional, en el que se debe garantizar el perfecto funcionamiento de frenos, el sistema de dirección, el sistema de suspensión, el sistema de señales visuales y audibles permitidas y el sistema de escape de gases, además de mostrar un estado adecuado de llantas, los vidrios de seguridad, espejos y cumplir con las normas de emisión de gases que establezcan las autoridades ambientales.

Por otra parte el Decreto 015 de 2011 establece los límites máximos de velocidad en calles y carreteras, asimismo la Ley 1696 de 2013 dicta disposiciones penales y administrativas para sancionar la conducción bajo efectos del alcohol u otras sustancias psicoactivas.

Con respecto a los accidentes por fallas mecánicas, en concreto el sistema de frenos, es claro afirmar que este es un sistema de seguridad destinado a prevenir colisiones.

Refiriendo el caso específico de un sistema de frenos de disco, la eficacia se puede ver afectada por el desgaste no homogéneo del disco debido a frenados bruscos, en donde se eleva la temperatura por la fricción con las pastillas y en consecuencia se generan vibraciones igualmente un frenado deficiente, incrementando las probabilidades de accidental sin que el conductor se dé cuenta, en la mayoría de los casos se debe acudir al servicio técnico especializado para detectar una falla de este tipo.

En este punto interviene la presente investigación. Se plantea a través de un Artículo de Referencia, el análisis científico y tecnológico de los aspectos más relevantes en los sistemas de diagnóstico asociados a los Frenos de Disco de un Vehículo los últimos diez años, que permita contribuir en el proyecto macro a cargo del semillero de investigación en instrumentación y teleinformática SIIT, para el desarrollo del sistema diagnóstico de frenos de disco y la implementación de este dispositivo en fases posteriores.

Pregunta de investigación

¿Cómo establecer un estado del arte analizando sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un vehículo particular en los últimos diez años?

1.2. Justificación

Con este Artículo se pretende contribuir en el proyecto macro a cargo del semillero de investigación en instrumentación y teleinformática SIIT, para el desarrollo del sistema diagnóstico de frenos de disco y la implementación de este dispositivo en fases posteriores; pues con la recopilación de los aspectos más relevantes sobre el Desarrollo

científico y tecnológico de sistemas de diagnóstico asociados a los Frenos de Disco de un Vehículo particular en los últimos diez años, el grupo investigador del mencionado proyecto, tendrá un conocimiento actualizado y una amplia visión del Estado del Arte.

La aprobación de este proyecto permite la interdisciplinariedad; pues se conjugan varios saberes tales como: diseño ingenieril, modelos matemáticos, desarrollos tecnológicos, entre otros conocimientos que se han venido adquiriendo a lo largo de la capacitación que la Universidad ofrece en la en el programa de Ingeniería Electrónica y se podrán discernir.

La ejecución de proyectos de este tipo reviste gran importancia porque con la indexación de artículos, se garantiza que la difusión de los mismos sea masiva y a nivel mundial, puesto que a través de las bases de datos se establece la búsqueda de información para la investigación científica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar científica y tecnológicamente a través de la instrumentación electrónica, el desarrollo de sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un vehículo particular en los últimos diez años.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica en el periodo de los últimos diez años, en bases de datos confiables, identificando las aproximaciones teóricas elaboradas sobre sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un Vehículo particular.
- Establecer criterios para la clasificación de la información de acuerdo los aspectos más relevantes sobre sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un Vehículo particular.
- Analizar la información de acuerdo a los aspectos relevantes de los sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un Vehículo particular.
- Identificar los métodos, estudios y desarrollos de sistemas diagnóstico, que permiten monitorear el sistema de frenos de un vehículo particular.

2. Marco referencial y Metodología

2.1. Marco referencial

El freno de disco está conformado básicamente por un disco de hierro fundido macizo (fundición gris nodular de grafito laminar, que contiene entre un 92% y un 93% de hierro) que gira con la rueda y una pinza o mordaza (caliper) montada en la suspensión del vehículo, que presiona las pastillas de fricción contra el disco. Los discos de freno, según su fabricación se clasifican en: Macizos y Ventilados (NTC).

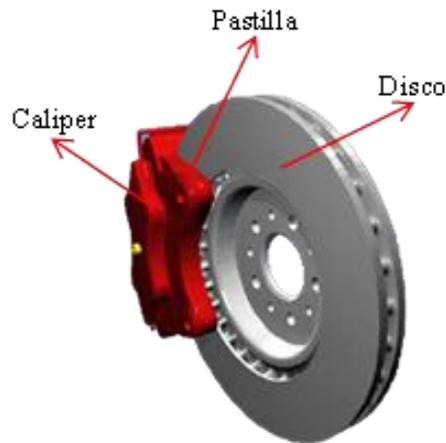


Figura 1. Componentes freno de disco. Fuente (Pier Francesco Gotowicki, Prof. Vincenzo Nigrelli, 2005)

En cuanto al control de calidad de los componentes de un sistema de frenos, La “Sociedad de Ingenieros Automotrices” (SAE) establece en la norma SAE J661, norma adoptada en Colombia a través de la norma NTC5388; además se establece el coeficiente de fricción de las pastillas de frenos SAE J866 y NTC1715 Colombiana, así mismo la “Sociedad Americana de Prueba de Materiales” (ASTM) define procedimientos y ensayos para verificar las condiciones de los materiales.

CÓDIGO	Coeficiente de Fricción
C	$\mu \leq 0.15$
D	$0.15 < \mu \leq 0.25$
E	$0.25 < \mu \leq 0.35$
F	$0.35 < \mu \leq 0.45$
G	$0.45 < \mu \leq 0.55$
H	$\mu > 0.55$
Z	Sin Clasificación

Tabla 1. Coeficiente de Fricción pastillas de freno. Fuente: (ICONTEC, 2005)

Respecto 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,” n.d.). 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 SPL (nivel de presión sonora) 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). Basado en la experiencia del Departamento de Sistemas de Frenado de IDIADA, han logrado resultados confiables y efectivos para la investigación del ruido de frenos y la resolución de problemas (“Applus + IDIADA,” n.d.).

Para esta investigación el análisis térmico es un aspecto primordial, pues en el estudio de los sistemas de frenos la temperatura determina el comportamiento termomecánico de los componentes del sistema (Belhocine & Bouchetara, 2012), por ende se deben tener en cuenta las características de las variables que interactúan en la estructura; por ejemplo la conductividad térmica de las fundiciones grises es aproximadamente superior a la de los aceros, en ello influye el grafito, que es buen conductor por ende tienen mayor capacidad para disipar el calor. Asimismo, el coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente de, entre 0°C y 500°C, y de en el rango de 0°C y 100°C, aunque parecido al del hierro. Además estas fundiciones poseen alta resistencia al choque térmico el cual resulta mejor para altos contenidos en carbono. (Yunus A. Cengel, 2007) define las propiedades físicas y térmicas de la fundición gris nodular de grafito laminar el cual tiene una composición de silicio y manganeso así:

Conductividad térmica	$k = 41 \text{ J/s} * m * ^\circ C$
Calor específico	$C_p = 434 \text{ J/Kg} * ^\circ C$
Densidad	$\rho = 8131 \text{ Kg/m}^3$
Difusividad térmica	$\alpha = 11,60 * 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficiente de transmisión térmica	$U = 32 \text{ J/s} * \text{m}^2 * ^\circ C$

Tabla 2. Propiedades físicas y térmicas de la fundición gris Fuente: El Autor

En un vehículo en movimiento (energía cinética) al aplicar el freno se reduce la velocidad y en ese momento, la energía se transforma en energía calorífica, generada por la fricción. Esta transformación de energía genera un aumento de la temperatura global de todo el sistema. Durante las frenadas bruscas, la disipación de potencia en una pastilla de freno está alrededor de 30 kW, dando como resultado temperaturas de superficie muy altas (Eriksson, Bergman, & Jacobson, 2002). La superficie en la que se friccionan las pastillas y el disco está dimensionada de modo que la potencia de disipación se aproxime a $250\text{W}/\text{cm}^2$, pero la potencia puede aumentar, todo depende la geometría del disco, ya que si este es ventilado el valor de la potencia de disipación alcanza $750\text{W}/\text{cm}^2$. 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 a mayor temperatura en un lapso de tiempo, el disco experimenta ciertos fenómenos y en el evento en que el disco alcance la temperatura de saturación, el coeficiente de fricción disminuirá entre los componentes del freno y se producirá un fenómeno llamado Fading y este genera pérdida de eficacia 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 hasta valores de 400°C a 500°C (Ricardo Andrés García León, 2014), (Garcia Leon, 2017) .

2.1. Metodología.

Se trabaja el esquema general de investigación de Arias Galicia (1991), con un tipo de investigación exploratoria. (Fig. 2)

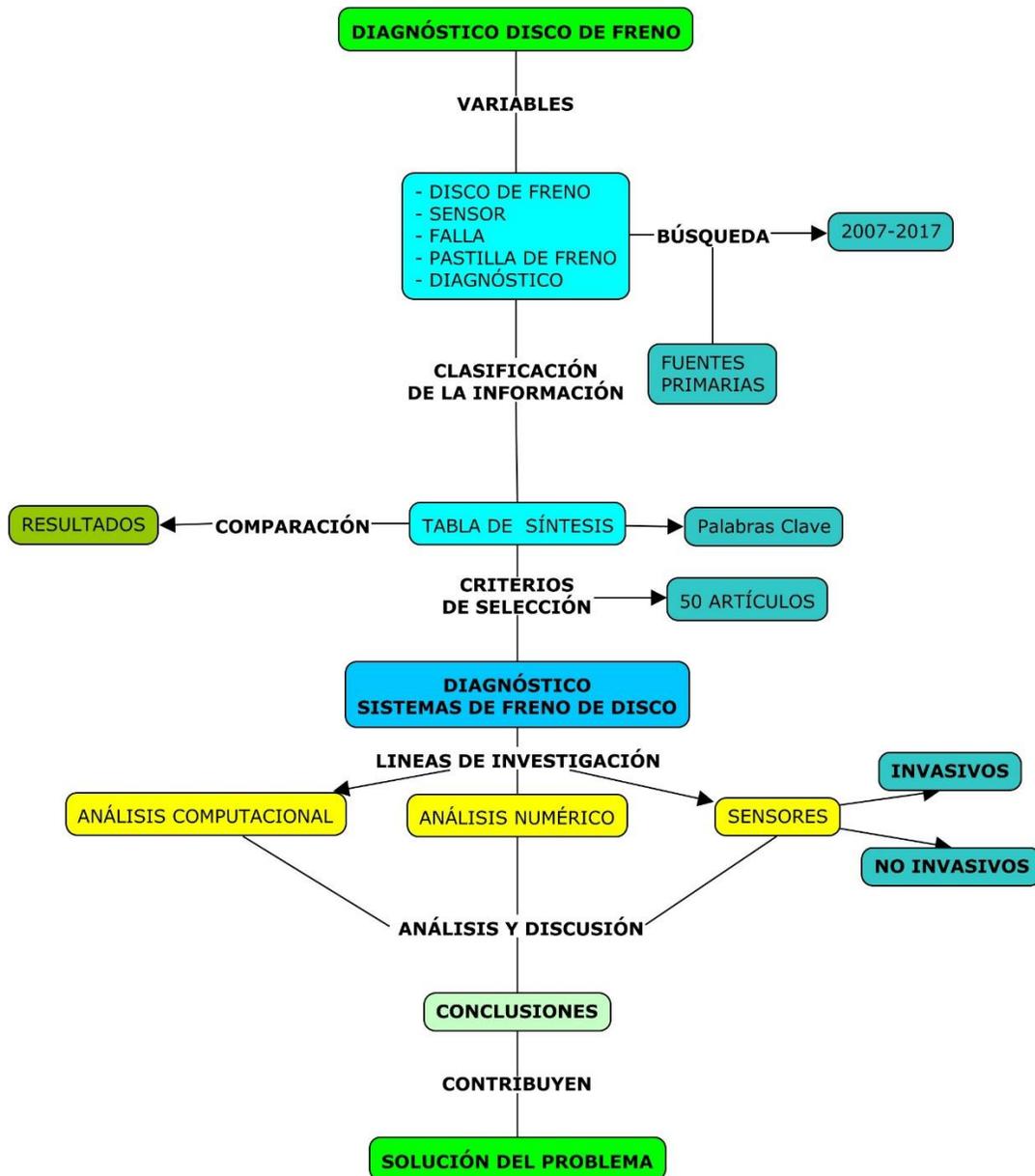


Figura 2. Mapa Conceptual Metodología. Fuente: El Autor

Se inicia con la recopilación de la información que consiste 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, térmico y se centraliza en la línea de tiempo entre 2007 y 2017, con un total de 150 artículos consultados. Se tienen en cuenta fuentes primarias soportadas en publicaciones originales de estudios científicos e información reciente, tales como IEEE, Science Direct, Biblioteca digital SAE, Elsevier, Congresos, Conferencias, Tesis, patentes, además artículos de desarrollo tecnológico y foros de la industria actual.

En una segunda etapa se procesan los datos a través de una lectura crítica. Los artículos se seleccionan y se organizan en un gestor de referencias,

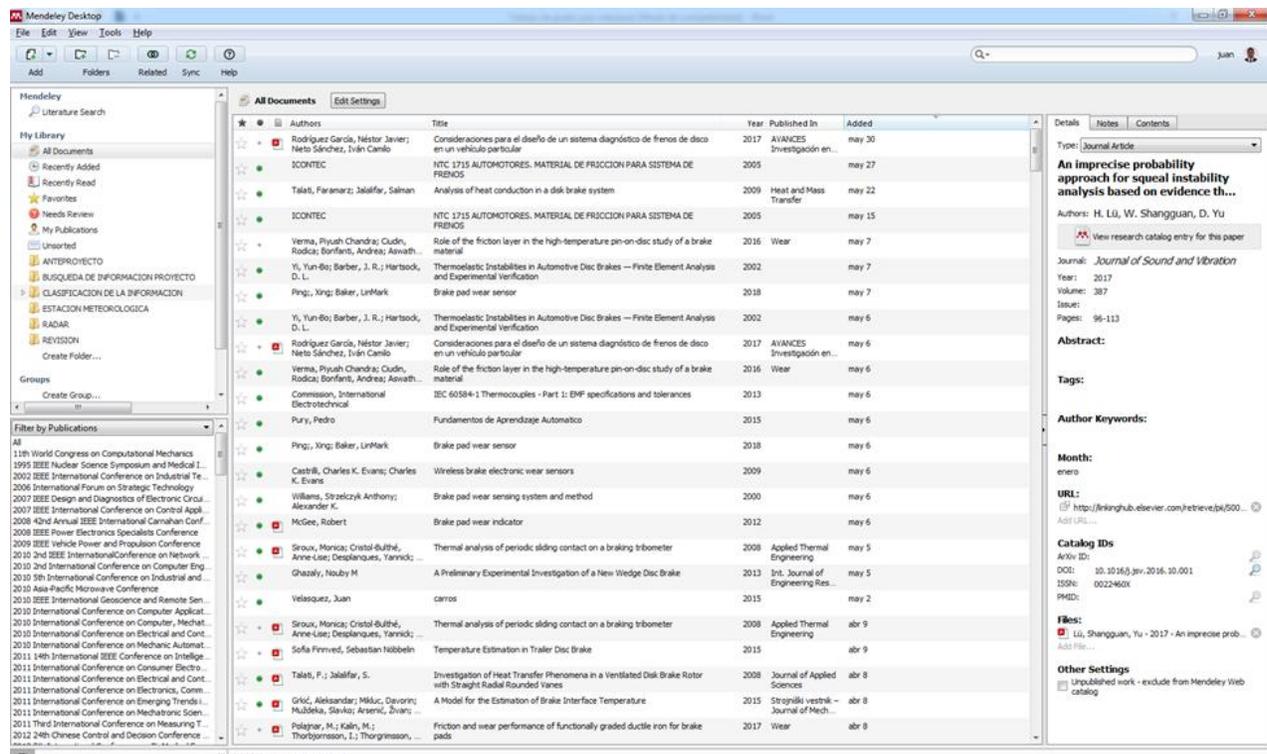


Figura 3. Gestor de referencias. Fuente: Mendeley

Luego se realiza una tabla de síntesis, con información del año y palabras clave, la información notable se extrae procedente de cada estudio de acuerdo al objetivo planteado, se hace una comparación de los resultados de las investigaciones.

Elementos Finitos		
titulo	año	KEYWORDS
HEAT TRANSIENT TRANSFER ANALYSIS OF BRAKE DISC /PAD SYSTEM	2016	Brake dimensioning; Brake disc; Calibration; Finite Element; Heat transient analysis
Theoretical modeling and FEM analysis of the thermomechanical dynamics of ventilated disc brakes	2010	Disc Brakes; Finite Element Analysis; Braking Systems; Simulation and Modeling
Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking	2007	Friction; Interface; Contact; Temperature; Measurement; Finite Element; Thermal; Brake
Analysis of brake squeal noise using the finite element method: A parametric study	2008	Brake squeal noise
Wear prediction of friction material and brake squeal using the finite element method	2008	Wear; Friction material; Contact analysis; Surface topography; Squeal; The finite element method
Application of testing, modal analysis and numerical methods to the detection, prediction and avoidance of squeal noise in automotive brake systems	2010	Automobile parts and equipment; Manufacture; Modal analysis; Numerical methods; Structural dynamics
An imprecise probability approach for squeal instability analysis based on evidence theory	2017	Brake Squeal; Instability; Evidence Theory; Uncertainty; Imprecise data
Wear Simulation and Its Effect on Contact Pressure Distribution and Squeal of a Disc Brake	2010	brake; disc; finite element; squeal; wear
Reduced scale thermal characterization of automotive disc brake	2015	Disc brake; Thermal performance; Dynamometer; Small scale
Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model	2013	Brake discs; Heat flux; Von Mises stress; Contact pressure

Thermomechanical modelling of disc brake contact phenomena	2013	brake discs, heat flux, heat transfer coefficient, von Mises stress, contact pressure.
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PEGS-WING VENTILATED DISK BRAKE ROTOR, WITH PADS AND CYLINDERS	2005	Disk brake rotor; caliper; fading testing procedure.; finite elements; pads; thermal stress
Coupled thermo-mechanical computation method for a virtual design processes of brake discs	2014	Thermomechanically coupled simulation, Brake system, Brake disc design, Heat power distribution, FEA.
Aprendizaje Automático		
título	año	KEYWORDS
Fundamentos de Aprendizaje Automático	2015	Aprendizaje Automático
Grey relation analysis on fuzzy fault tree of disk brake	2011	disk brake; fault tree; fuzzy importance; grey relation analysis
Determination of minimum sample size for fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using power analysis	2015	Fault diagnosis; Machine learning; Power analysis; Vibration signals; Minimum sample size Statistical features
Brake fault diagnosis using Clonal Selection Classification Algorithm (CSCA) – A statistical learning approach	2015	Attribute evaluator; CSCA; Decision tree; Leave-one-out cross validation; Statistical features
Online fault diagnosis for hydraulic disc brake system using feature extracted from model and an SVM classifier	2013	online fault diagnosis; feature; SVM classifier; leakage; oil contamination; hydraulic disc brake system
Study and implementation of vehicle brake test system	2015	Vehicle test; brake system; Data acquisition; CompactRIO

AUTOMATIC HEAT CRACK DETECTION OF BRAKE DISCS ON THE DYNAMOMETER	2016	crack detection, eddy current, disc brakes, heat crack test, dynamometer
Estimation of the Technical State of Automotive Disc Brakes Using Fuzzy Logic	2014	disc brake, temperature, vibration, thickness variation, fuzzy logic approach.
Intelligent control of braking process	2012	Intelligent control; Braking process; Microcontroller
Neural network prediction of brake friction materials wear	2010	Friction material; Wear modelling; Artificial neural networks
Neural network prediction of disc brake performance	2009	Neural network; Prediction; Disc brake performance; Friction material
Integrated Model-Based and Data-Driven Diagnosis of Automotive Antilock Braking Systems	2010	Antilock braking systems (ABSs), data-driven diagnosis, model-based diagnosis, nonlinear systems, parameter estimation, residuals, support vector machines (SVMs).
Model-based sensor fault detection algorithm design for Electro-Mechanical Brake	2011	EMB SYSTEM
Transient fault tolerant control for vehicle brake-by-wire systems	2016	Brake-by-wire; Transient fault tolerance; Task reallocation; Sliding mode control; Architecture analysis and design language
Sensores de Temperatura		
titulo	año	KEYWORDS
<i>IEC 60584-1 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances</i>	2013	IEC 60584-1 Thermocouples
Dynamic measurement of the temperature of electroconductive objects used for the example of a wheel brake	2007	temperature; Friction; fading warning

Low cost, low power, intelligent brake temperature sensor system for automotive applications	2007	intelligent brake; temperature sensor
Diseño de un banco de pruebas para comparar parametros de calidad en pastillas de freno para automoviles livianos	2014	Banco de Pruebas; pastilla de freno;
A Model for the Estimation of Brake Interface Temperature	2015	temperature estimation, braking, friction surface, measurement, modelling
A Preliminary Experimental Investigation of a New Wedge Disc Brake	2013	Brake test rig, brake performance, wedge disc brake
Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads	2017	Functionally graded ductile iron; Automotive brake pads; Third-body formation
Thermal analysis of periodic sliding contact on a braking tribometer	2008	Braking; Tribometer; Periodic sliding contact; Temperature
Experimental Investigation of Hot Judder Characteristics in Passenger Cars	2015	hot judder, driving test, order analysis, transfer behavior, resonance frequency
Temperature Estimation in Trailer Disc Brake	2015	Automatic brake; temperature; braking force
Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor	2008	Brake rotor; Transient experiment; Radial fin; PIV; Forced convective cooling
Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular	2017	ANSYS, Deformación, Desgaste, Freno de Disco, Temperatura.
Microsensor		
An Investigation Toward Development Of Economical Brake Lining Wear Alert System	2009	Brake lining monitoring system, Micro switch, micro sensing, brake pad evaluation.
Brake pad wear sensor	2018	Patente
Wireless Brake Electronic Wear Sensors	2011	Patente
Systems and methods for detecting wear of brake pads	2016	Patente
Sensor Infrarrojo		
titulo	año	KEYWORDS
Sensores de Fórmula 1 – De los circuitos a la carretera	2010	Sensor, ECU, BUS, señal analógica, señal digital, muestreo, tiempo real, input, output

The design and implementation of digital temperature measurement and automatic control system	2010	labview; semiconductor chip cooling; temperature sensor; thermostatical control; virtual instrument
A condition monitoring system of the disk brake based on nRF24L01	2011	disk brake, C8051F020, nRF24L01, condition monitoring
Braking System Modeling and Brake Temperature Response to Repeated Cycle	2014	braking, kinetic energy, brake characteristic, Arduino.
An emissivity-corrected method for the accurate radiometric measurement of transient surface temperatures during braking	2010	Braking; Emissivity variation; Radiometric measurements; Two-colour pyrometer
Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material	2016	High-temperature wear tests Friction coefficient Severe wear Mild wear Brake materials Degradation phenolic resin

Tabla 3. Síntesis. Fuente: El Autor

Para la selección de las fuentes consultadas, se tienen en cuenta las investigaciones aplicadas al Diagnóstico de Sistemas de Freno de disco, seleccionando al final un total de 50 artículos, luego se clasifica la información por líneas de investigación, se identifican las ideas más importantes, y relacionadas con el tema de estudio. De igual forma se interpretan las intencionalidades de los autores teniendo en cuenta las ideas planteadas en la formulación del problema para la solución del mismo, identificando adecuadamente las diferencias de los resultados de los estudios realizados, donde se obtienen al final conclusiones importantes que contribuyen a descubrir desarrollos e investigaciones en torno al Diagnóstico de Sistemas de Freno de disco y que debe considerar el Semillero de Investigación en Instrumentación y Teleinformática (SIIT) para el desarrollo del proyecto “Sistema diagnóstico para detección de problemas asociados a los frenos de disco en un vehículo particular”

La información analizada se estructura en dos sub-apartados: uno dedicado al análisis numérico y computacional y otro a los sensores. Del conjunto de estudios analizados se extrae la información de diferentes variables. En los documentos sobre análisis numérico

y computacional, las variables fueron: método de elementos finitos, predicción de temperatura, aprendizaje automático,

En los documentos sobre Sensores, las variables fueron: termografía, termopar, infrarrojo, microsensar.

3. Análisis de la información

3.1. Análisis numérico y computacional.

3.1.1. Método de elementos finitos (FEM).

Teniendo en cuenta la geometría compleja del sistema de freno de disco, se hace necesaria la aplicación de métodos numéricos para modelar y resolver, la complejidad que rige este sistema.

Un método clásico para resolver y analizar este tipo de sistemas complejos es el Método de Elementos Finitos (FEM), en esencia es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales, en donde se discretiza la geometría de una estructura en un número finito de partes, obteniendo soluciones aproximadas. Para determinar los puntos de falla de un sistema de freno de disco, es indispensable modelarlo, partiendo del diseño, siendo importante los materiales de construcción y que actúan para garantizar la estabilidad y durabilidad del sistema. (Carlos Zurrón-Barragán, Rubén Olarte-Valentín, María Cristina Ramírez-Aragón, Pedro Villanueva-Roldán, 2012) Afirma que el diseño de frenos de disco se basa en estudios teóricos y en el Método de Elementos Finitos (FEM). En su trabajo se valida y experimenta un modelo de elementos finitos de un freno de disco completo, con un diferentes condiciones de funcionamiento y propiedades del material, que se realiza con técnicas basadas en Algoritmos Genéticos (GA) y en donde la variable más relevante para el estudio es el coeficiente de conductividad térmica (λ) debido a que se considera como la más representativa e influyente de este material en el proceso.

Por otra parte (Thuppal Vedanta & Kora, 2016) Implementa un modelo térmico para calcular las temperaturas de los discos de freno y las pastillas de freno, afirmando que las técnicas numéricas ayudan a simular el dimensionamiento de los frenos. A través de Matlab simula el método de Elementos Finitos y el proceso de frenado con Simulink. Los resultados de simulación del disco de freno y de la pastilla de freno arrojan una buena correlación con los ensayos experimentales. A través de los factores de control del coeficiente de convección se muestra durante la aceleración más sensible, con un cambio de temperatura de alrededor del 16%. En la fig. 4 se muestra el modelo en

Simulink que se usó para calcular las temperaturas a través de las ecuaciones de elementos finitos asimétricas.

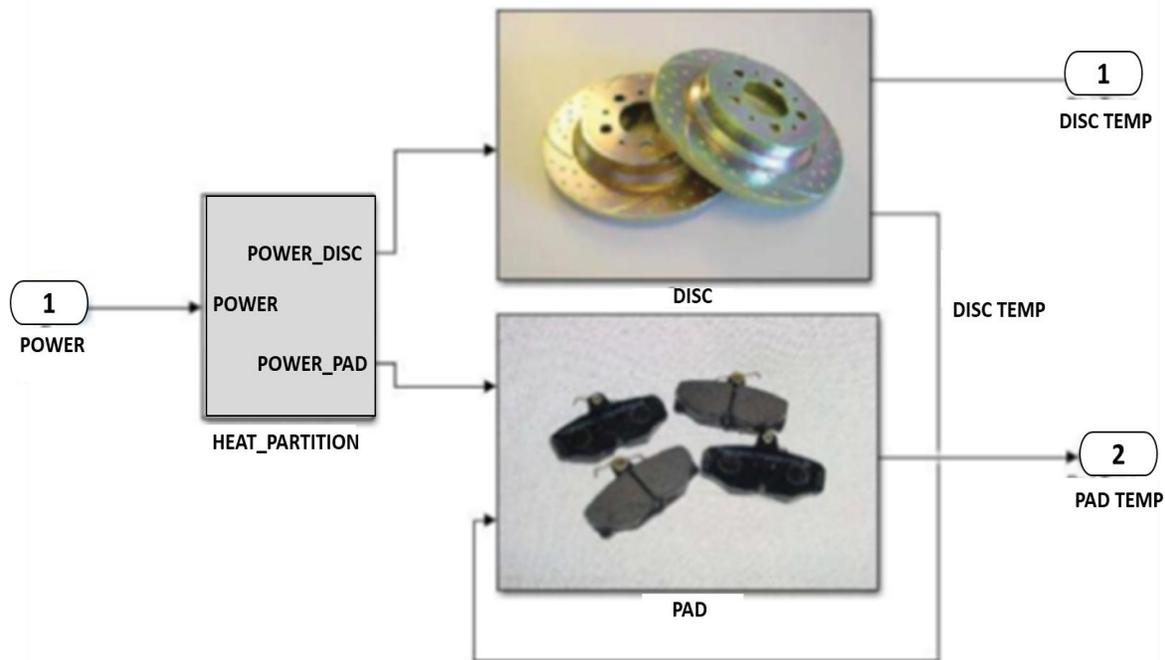


Figura 4. Modelo térmico del disco de freno en Simulink. Fuente: (Thuppal Vedanta & Kora, 2016)

(L. Zhang and D. Meng, 2010) Utiliza el Método de los elementos finitos para predecir el campo de temperatura transitoria del disco y el estrés normal en el espesor radial y asimétrico del disco interno y externo. Los resultados del FEM son validados a través del experimento utilizando termopares y sensores de desplazamiento sin contacto. Sin embargo, la dinámica del vehículo no se considera en el cálculo de la presión de la interfaz de fricción y la fuerza normal total. Mientras que (Qi & Day, 2007) utiliza este método y encuentra que la temperatura máxima en la interfaz de fricción no aumenta linealmente con la relación de área de contacto. Este hallazgo es potencialmente significativo para optimizar el diseño y la formulación de materiales de fricción para garantizar estabilidad y rendimiento de desgaste. El área de contacto entre el disco y la pastilla es donde la mayor parte de la energía cinética se disipa por fricción y tiene un efecto significativo sobre la temperatura de frenado.

Entre tanto los parámetros tales como: coeficiente de fricción, presión de frenado, temperatura del freno y desgaste son relevantes para el comportamiento dinámico del

sistema y (Trichês Júnior, Gerges, & Jordan, 2008) examina el comportamiento un sistema de frenos de disco a través del método de elementos finitos con estos parámetros, determinando la estabilidad dinámica del sistema, y el efecto del desgaste sufrido por los componentes del freno. Con esta investigación se logra identificar las frecuencias inestables generadas por ruidos, además se comprueba el rendimiento de algunos métodos de control y evidencia algunos cambios en las propiedades del material. El desgaste se puede predeterminar, pues (AbuBakar & Ouyang, 2008) a través de un modelo detallado de elementos finitos tridimensionales logra predeterminar el desgaste del material de fricción en un sistema de freno de disco, realizando la comparación con un par de pastillas de freno nuevas, bajo diferentes tiempos de aplicación del freno, estableciendo el desgaste en sus superficies.

Teniendo en cuenta que el desgaste de las pastillas genera un chillido, los autores en (Parra, Olazagoitia, & Biera, 2010) proporcionan una herramienta específica con la creación de modelos computacionales para reducir la probabilidad de desgaste en los componentes de los frenos y hace un aporte valioso a los fabricantes de frenos. Entre tanto (Lü, Shangguan, & Yu, 2017) investiga la inestabilidad generada por el chillido del freno de disco con un modelo de elementos finitos, a través de un Análisis de Autovalores Complejos (CEA) y un Análisis dinámico de transitorios. Se considera que con este método se puede analizar la inestabilidad de chillido y se puede determinar con más exactitud con datos imprecisos.

Los autores coinciden que el desgaste de la pastilla de freno es un factor que genera el particular chillido en el sistema, (Abu Bakar, A R. and Li, L and James, S and Ouyang, H and Siegel, 2010) a través de un modelo de elemento finito tridimensional de un freno de disco sólido de Mercedes (fig. 5) con 8350 elementos sólidos y aproximadamente 37,100 grados de libertad (DOF), logra determinar que el área de contacto aumenta a medida que avanza el desgaste y a través de una fórmula de tasa de desgaste de Rhee y a su vez, se puede predecir la generación de chillidos.

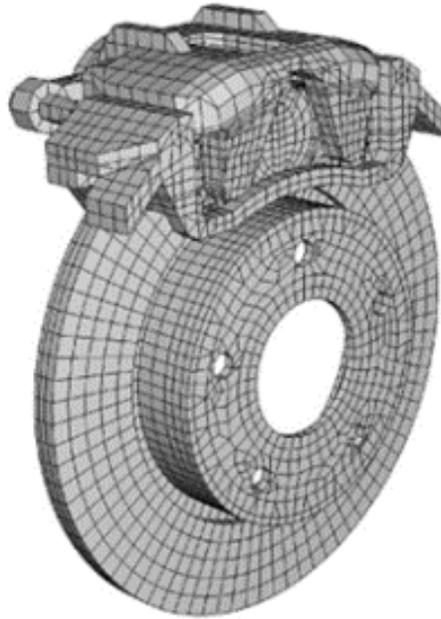


Figura 5. Modelo computacional FEM freno de disco sólido de Mercedes. Fuente:(Abu Bakar, A R. and Li, L and James, S and Ouyang, H and Siegel, 2010)

El rendimiento térmico del sistema de freno de disco debe ser evaluado. En (Alnaqi, Barton, & Brooks, 2015) a una escala reducida con la ventaja de un bajo costo y un tiempo de desarrollo reducido. Se comparan los rendimientos térmicos en discos de escala completa y pequeña usando un dinamómetro de freno convencional. Además, se desarrolla un modelo de elementos finitos térmicos transitorios asimétricos bidimensionales utilizando el software Abaqus, que ayuda a la validación de la metodología propuesta. En este estudio las simulaciones numéricas confirman la equivalencia entre el rendimiento térmico del disco de escala completa y pequeña con la metodología propuesta, siendo esta una herramienta importante para evaluar el rendimiento térmico de los frenos de disco en la fase de diseño inicial. Algo que coincide con (Belhocine & Bouchetara, 2013a) que analiza el comportamiento térmico en un disco de freno macizo y uno ventilado (Fig. 6) utilizando el programa ANSYS. El modelado determina la distribución de la temperatura en el freno de disco y se evalúan los campos de esfuerzo y deformaciones del disco, además la presión de contacto sobre las pastillas. Los resultados que se obtienen con la simulación son satisfactorios, encontrando que el disco ventilado no sufre un esfuerzo técnico tan severo en comparación del disco macizo.

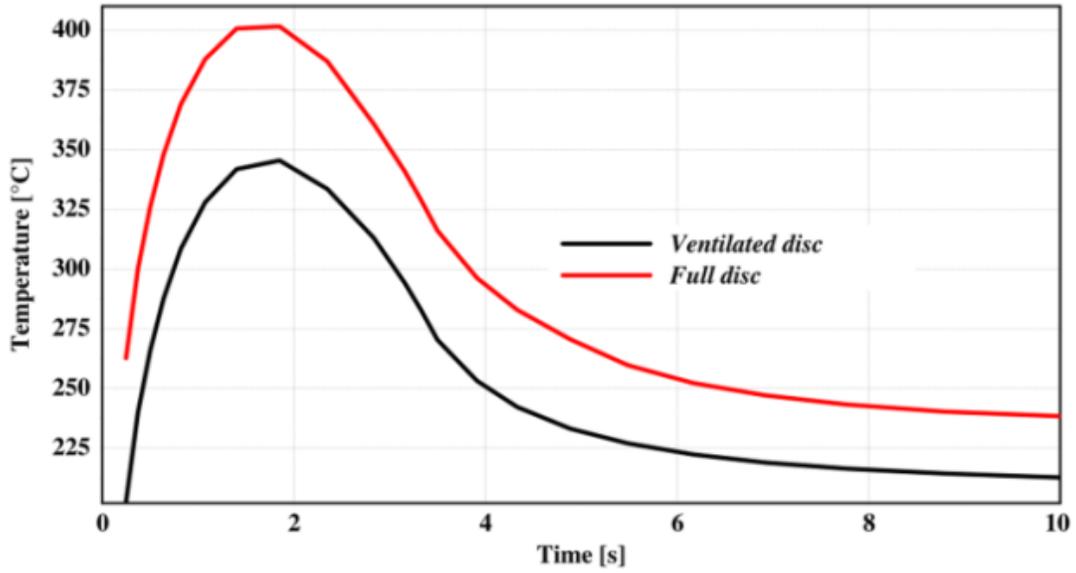


Figura 6. Variación en la temperatura frente al tiempo de los discos. Fuente: (Belhocine & Bouchetara, 2013a)

Si bien es cierto que en un sistema de frenos el calor generado por la fricción no se distribuye uniformemente (Fig. 7), con un análisis termomecánico (Belhocine & Bouchetara, 2013b) determina que la expansión térmica y las imperfecciones en la geometría del sistema influyen en este comportamiento.

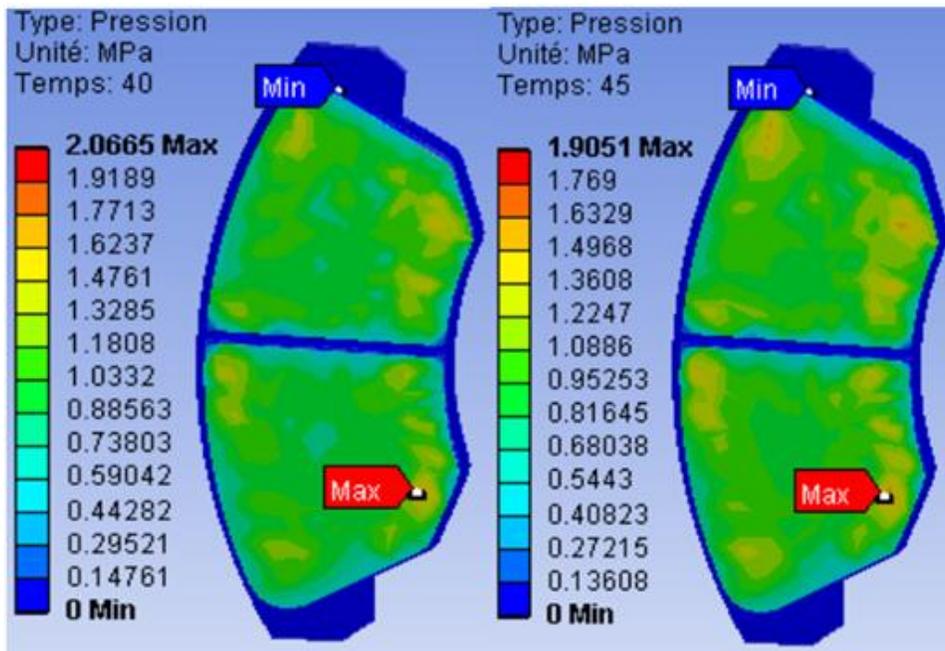


Figura 7. Distribución de presión de contacto en la pastilla. Fuente: (Belhocine & Bouchetara, 2013b)

Los autores coinciden en cuanto a que los parámetros estructurales tales como la conductividad térmica y el calor específico influyen en función a la temperatura. (Pier Francesco Gotowicki, Prof. Vincenzo Nigrelli, 2005) Afirma que simulando numéricamente el proceso de frenado de un disco ventilado y al compararlo con datos experimentales, estos correlacionan, considerando de esta manera los cálculos numéricos como conservadores, debido a que el campo térmico numérico es tan solo un poco más alto que el experimental. Además, el rotor de freno de disco ventilado con aletas oscilantes puede disipar una gran cantidad de flujo térmico y genera una gran estabilidad dimensional.

Respecto al comportamiento termomecánico del conjunto de componentes de un sistema de freno de disco, verificado con un dinamómetro, (Jungwirth F, Dornheim A, 2014) establece los parámetros de diseño de un freno de disco, teniendo en cuenta la detección de las deformaciones y la resistencia a la fatiga del disco. Con este método se puede predecir el rendimiento del sistema con respecto a la actividad de las pinzas de freno y la influencia de estas en la distribución de energía térmica en el disco de freno (Fig. 8).

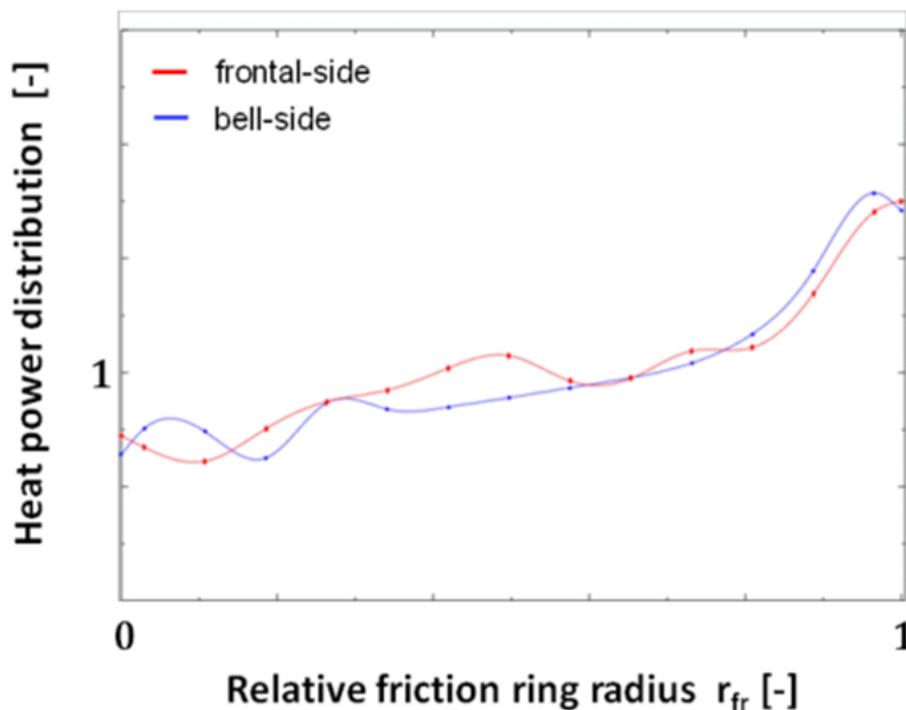


Figura 8. Grafica de distribución de calor en el disco. Fuente (Jungwirth F, Dornheim A, 2014)

3.1.2. Aprendizaje Automático

(Pury, 2015) Afirma que el Aprendizaje Automático es una derivación natural desde la intersección entre la Estadística y la Ciencia de la Computación.

(Ma, Jang, Zhou, Zhao, & Lin, 2011) Analiza las fallas, en un freno de disco hidráulico; mediante un análisis de Árbol de Fallas (FTA), cuyo enfoque es un análisis cualitativo, en donde se evalúan todas las causas probables de cada evento de falla aplicando técnicas de lógica difusa gris, pues este considera que es una manera efectiva de resolver problemas debido a que el estado del evento básico es difuso con una probabilidad de que sea incierto. Los resultados pueden proporcionar bases teóricas para detectar deficiencias, prevenir fallas, mejorar la fiabilidad y la seguridad del sistema.

(Indira, Vasanthakumari, Jegadeeshwaran, & Sugumaran, 2015) Realiza la caracterización de las señales de vibración logrando detectar condiciones defectuosas del freno, mediante un enfoque de aprendizaje automático de máquina, usando un algoritmo de árbol de decisiones C4.5, (Fig. 9) y utiliza un acelerómetro tipo piezoeléctrico como transductor para la adquisición de señales de vibración a una frecuencia de muestreo de 24 kHz, usando el teorema de muestreo de Nyquist. Se toman 55 muestras para cada condición del sistema de frenado hidráulico, con LabVIEW almacena las señales y con un método estadístico llamado análisis de potencia, determina el tamaño de muestra mínimo para entrenar y obtener una buena precisión de clasificación con estabilidad estadística.

El factor de la vibración para detectar fallos en el sistema de frenos a través de un acelerómetro es común, es así como también lo evidencia (Jegadeeshwaran & Sugumaran, 2015) quien realiza un estudio para monitorear las vibraciones de un sistema de freno usando técnicas de aprendizaje automático, a través de un Algoritmo de Clasificación de Selección Clonal (CSCA), las señales de vibración se adquieren usando un acelerómetro de tipo piezoeléctrico (tipo uniaxial, rango de 50 g, sensibilidad de 100 mV / gy frecuencia de resonancia de 40 kHz). Este enfoque consta de tres pasos: El primero es la extracción de características, el segundo la selección de características y el tercero es clasificación de características (Fig. 10). Este simula nueve condiciones de falla clásicas en un sistema de frenos, se extraen doce conjuntos de características

estadísticas de la señal de vibración utilizando técnicas de extracción de características. La selección de características se lleva a cabo utilizando un evaluador de atributos y las características seleccionadas se clasifican usando el algoritmo de clasificación de selección Clonal. De los 550 conjuntos de datos que se obtienen, el 96% es correcto.

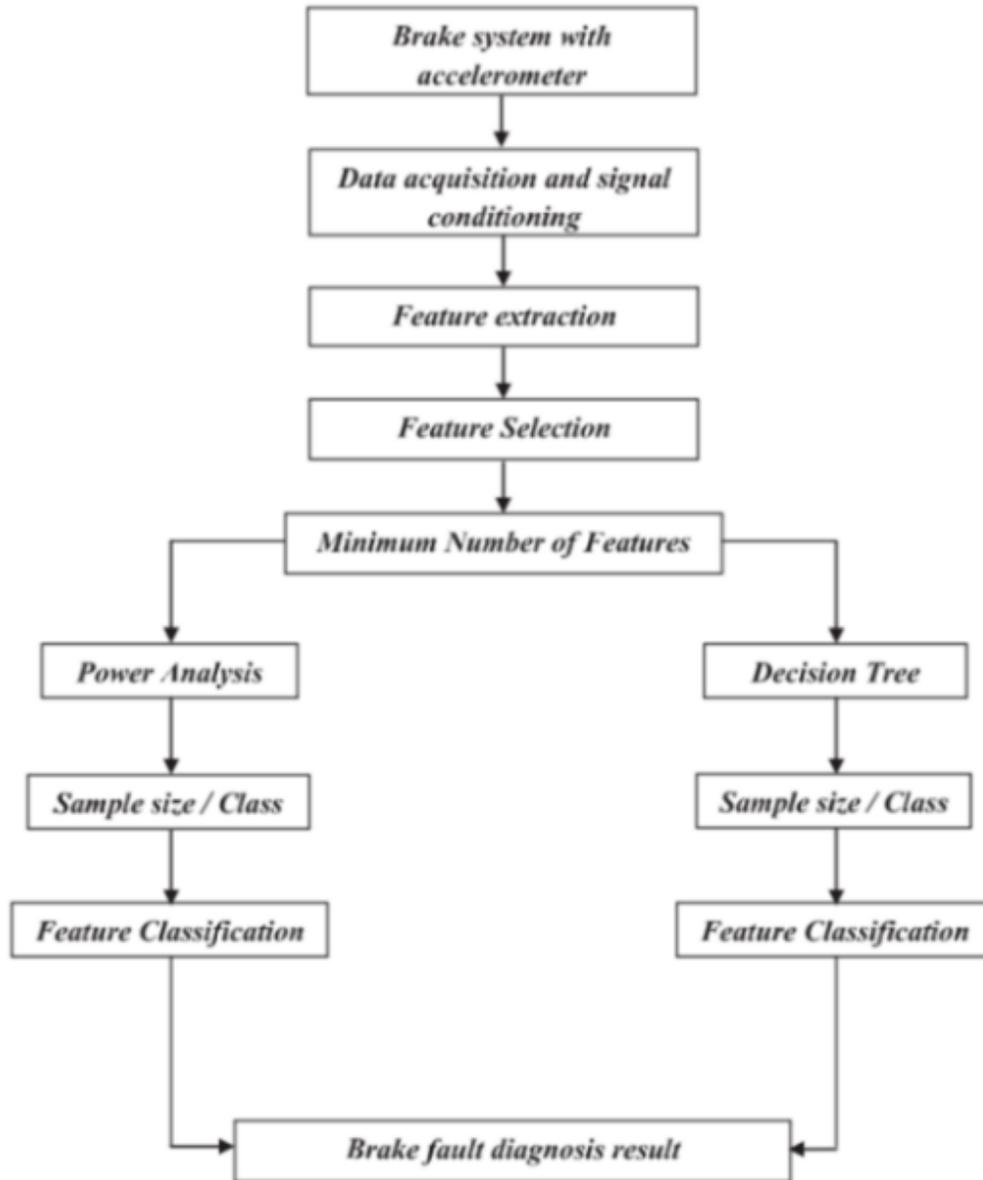


Figura 9. Sistema diagnostico con árbol de decisiones a partir de la adquisición de datos con acelerómetro. Fuente: (Indira et al., 2015)

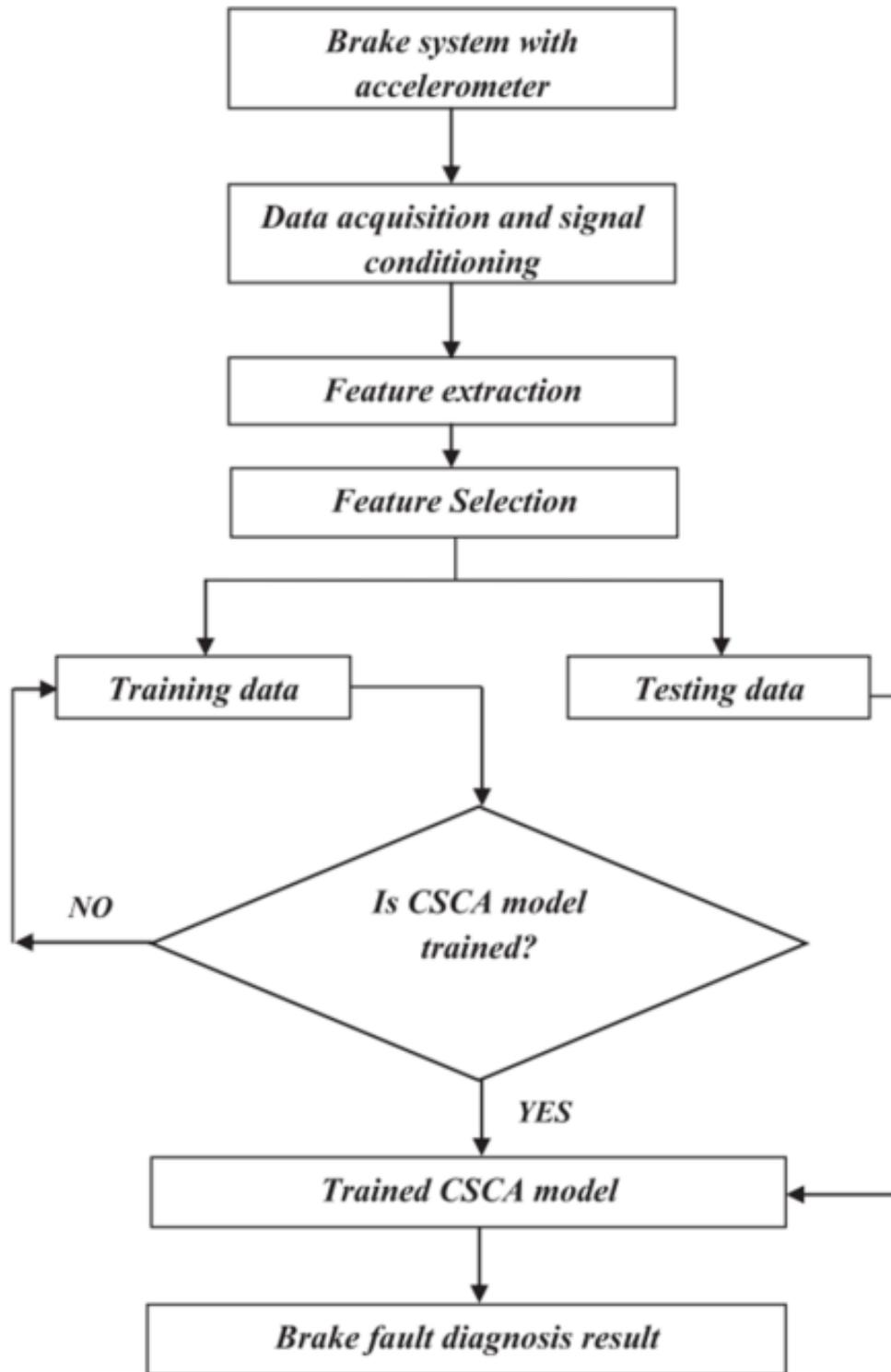


Figura 10. Sistema diagnóstico modelo CSCA a partir de la adquisición de datos con acelerómetro. Fuente: (Jegadeeshwaran & Sugumaran, 2015)

(Lian, Xu, & Lu, 2013) Proporciona un método para diagnosticar las fallas generadas en la contaminación y fugas de aceite en un sistema de frenos de disco hidráulico, mediante

un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado (clasificador SVM -Support Vector Machine), teniendo en cuenta que los datos de entrenamiento se ubican en pares de objetos: una componente del par son los datos de entrada y el otro, los resultados deseados. La salida de la función puede ser un valor numérico, con el objetivo de crear una función capaz de predecir el valor correspondiente a cualquier objeto de entrada. En este caso los datos de entrada son la categoría y magnitud de falla en dos tipos. El método propuesto puede diagnosticar fallas en el cilindro hidráulico y contaminación de aceite en línea al mismo tiempo. Los resultados de la simulación muestran que el método puede cumplir eficazmente la función de diagnóstico. La precisión del clasificador SVM puede ser del 92,5%. Cuando la magnitud de falla alcanza un cierto nivel y la tasa de error de estimación de magnitud es inferior al 6%.

Entre tanto (Wang, Liu, Xiao, & Wu, 2015) implementa un sistema de prueba de freno basado en el sistema embebido CompactRIO (Fig. 11) y en el entorno de desarrollo de LabVIEW mediante la adquisición de señales NVH (Vibración, Ruido, Aspereza) y temperatura, con el procesamiento a través de filtros digitales y cálculos del espectro y frecuencia. Las pruebas en el vehículo muestran que el sistema puede funcionar de manera estable con una alta tasa de muestreo y transmisión masiva de datos.

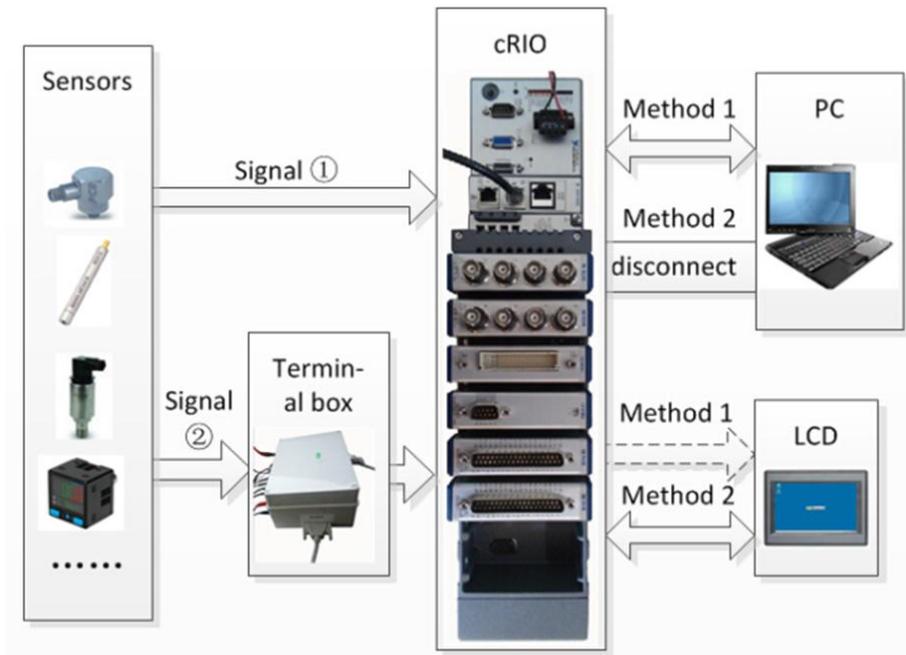


Figura 11. Estructura del sistema diagnóstico de freno. Fuente: (Wang et al., 2015)

Por otra parte (Wiegemann, Sven-Eric; Fecher, Norbert; Merkel, Nora; Winner, 2016) demuestra que el principio de corrientes de Foucault es adecuado para detectar grietas generadas por calor en los discos de freno en una prueba con un dinamómetro. Este implementa un sistema de medición que permite medir y registrar el desarrollo de las grietas después de cada accionamiento del freno de forma objetiva y se genera automáticamente una señal de corte. La fig. 12 muestra la estructura del sistema, que básicamente cuenta con dos sensores no invasivos de corrientes parásitas, en ambas caras del disco, un dinamómetro, la unidad lineal y la unidad de control.

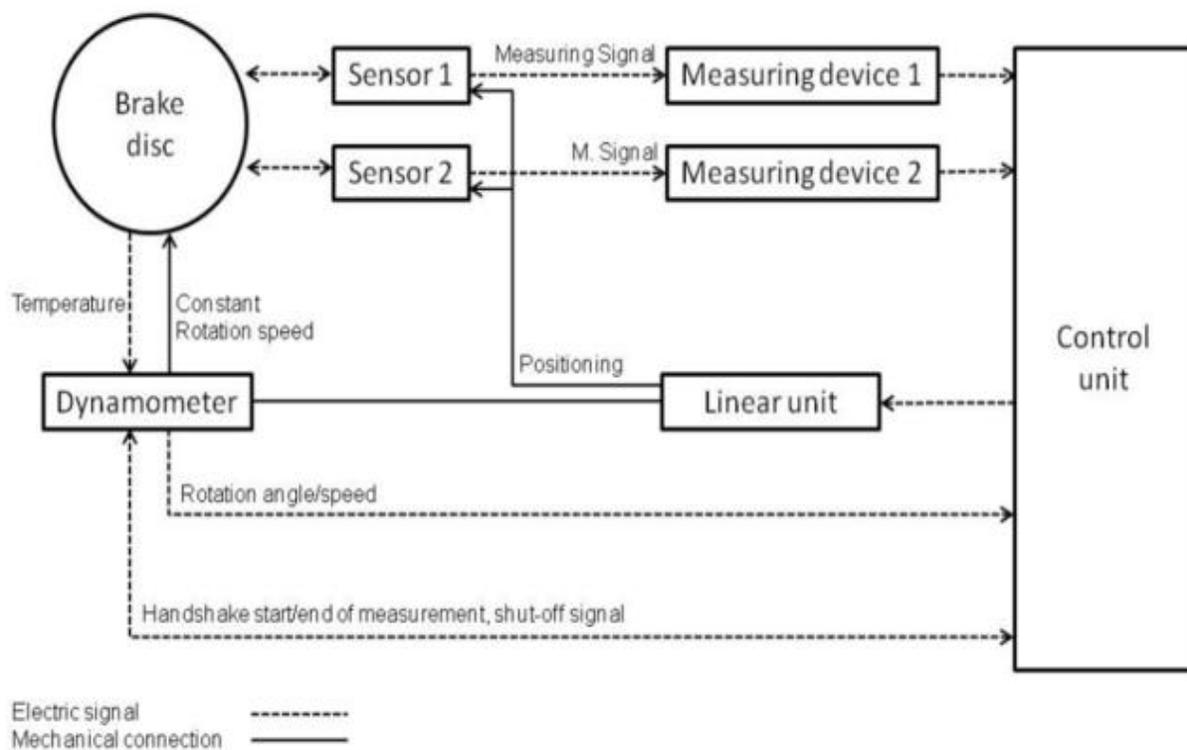


Figura 12. Sistema diagnóstico a partir de la adquisición de datos con dinamómetro. Fuente: (Wiegemann, Sven-Eric; Fecher, Norbert; Merkel, Nora; Winner, 2016)

La intención de los autores en este estudio es la de predecir las fallas del sistema de frenos, para evitar un fallo grave y que lo haga más inestable, a través de métodos numéricos y computacionales. Por otra parte (Baban, Baban, Bungau, Dragomir, & Pancu, 2014) afirma que en el proceso de frenado se generan muchas incertidumbres, para lo cual implementa un enfoque de lógica difusa con el fin de estimar el estado técnico

de los frenos de disco, a través de la variación del espesor del disco, utilizando este factor como variable lingüística de salida, las vibraciones y la temperatura como variables de entrada de lenguaje. El sistema de decisión difusa para la estimación del estado técnico de los frenos de disco se implementa con Fuzzy Logic Toolbox TM del software Matlab; para ello establece que el espesor del disco se encuentre dentro de los límites prescritos por el fabricante.

Teniendo en cuenta que los enfoques de modelado, monitoreo, predicción y control eficaz del proceso de frenado (Aleksendrić, Jakovljević, & Ćirović, 2012) propone un control basado en la presión de accionamiento del freno de disco, la velocidad del vehículo y la temperatura del freno. Este desarrolla e integra en un microcontrolador CMOS de 8 bits, aplicando modelos neuronales capaz de predecir la presión de accionamiento del freno necesaria para alcanzar el valor de par de frenado deseado, de acuerdo a los parámetros de velocidad del vehículo y la temperatura del freno.

Así mismo el modelo neuronal es implementado para predecir el desgaste de los materiales de fricción, frente a condiciones de fabricación. (Aleksendrić, 2010) desarrolla un modelo neuronal de desgaste de materiales de fricción teniendo en cuenta la información del material de fricción (18 tipos), las condiciones de fabricación más importantes del material de fricción (5 parámetros). El trabajo experimental se basa en un dinamómetro de inercia de escala completa con tres pruebas de desgaste diferentes. (Fig. 13) Este modelo es capaz de predecir el desgaste de diferentes tipos de material de fricción.

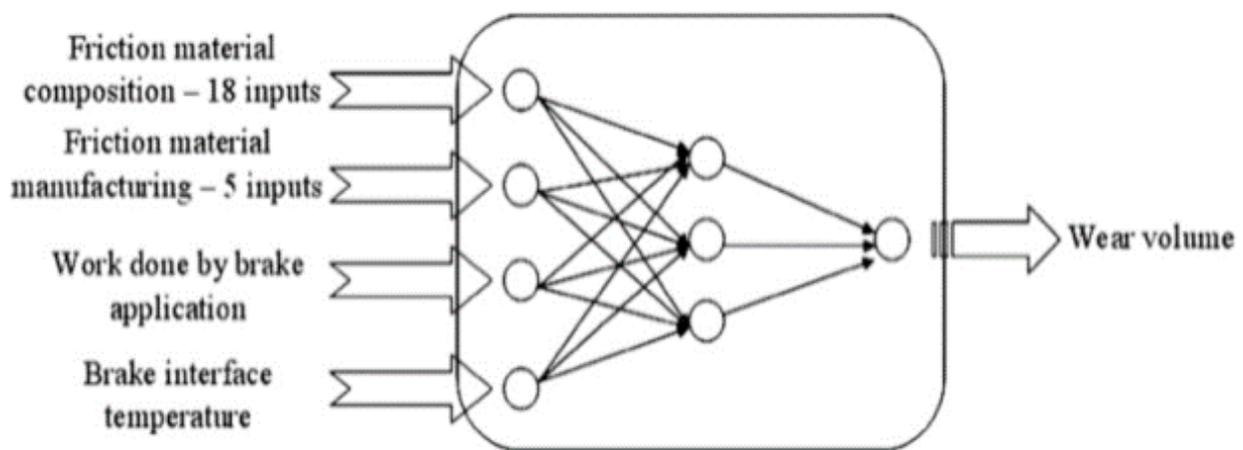


Figura 13. Modelo Neuronal para predecir el desgaste de materiales de fricción. Fuente: (Aleksendrić, 2010)

El proceso de frenado se ve afectado por las propiedades triboquímicas de los materiales de fricción y los regímenes de operación del sistema. (Dragan Aleksendric; David C Barton., 2009) Mediante redes neuronales artificiales modela la operación del freno de disco, para predecir las características de fricción del freno de disco mediante un dinamómetro inercial con 26 parámetros de entrada; 18 parámetros relacionados con la composición del material de fricción, 5 parámetros relacionados con las condiciones de fabricación y 3 parámetros relacionados con las condiciones de prueba del freno y un parámetro de salida. El modelo es capaz de caracterizar diferentes materiales de fricción en un estado inicial (frío) que puede afectar el rendimiento del freno de disco en la presión aplicada y velocidad inicial.

Ahora bien, los autores emplean diferentes métodos para el diagnóstico del sistema de frenos de disco. (Luo, Namburu, Pattipati, Qiao, & Chigusa, 2010) Emplea un enfoque híbrido que combina técnicas basadas en modelos y en datos para obtener un mejor rendimiento diagnóstico en un sistema de frenos ABS; combina las ecuaciones de paridad, ecuaciones no lineales y clasificador SVM, realizando pruebas estadísticas, con la finalidad de detectar y luego aislar la falla. El procedimiento de diseño se aplicó con éxito a un sistema ABS para detectar y aislar una falla de un sensor y cuatro fallas paramétricas. En la fig. 14 se muestra el diagrama de bloques del proceso iterativo.

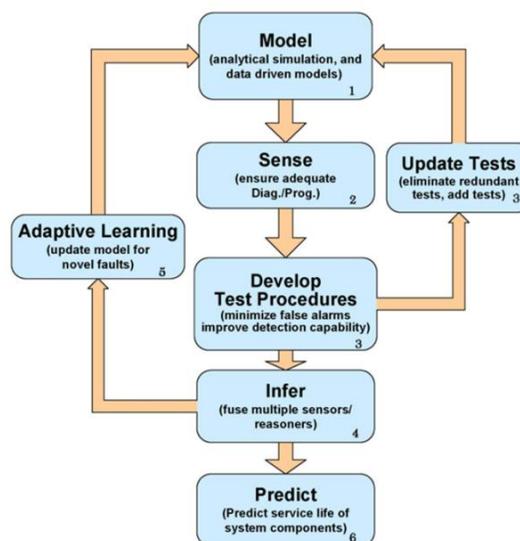


Figura 14. Diagrama de Bloques del proceso iterativo. Fuente: (Luo et al., 2010)

(Hwang, Han, Huh, Jung, & Kim, 2011) Propone un sistema de diagnóstico de fallas para frenos electromecánicos (EMB) basado en redundancia analítica, con un modelo de espacio de estado, que incluye señales de falla enviadas por los sensores de corriente, sensor de fuerza y sensor de posición del EMB. El algoritmo se diseña y se verifica a través de la simulación de un diagrama de bloques de lazo cerrado utilizando Matlab / Simulink. El resultado de la simulación se compara con el resultado de pruebas realizadas en un banco HILS (Hardware-in-the-loop simulation) y ambos resultados coinciden.

Para un freno de tipo BBW (Brake by wire) (Huang et al., 2016) propone un esquema jerárquico basado en el análisis de características de propagación de fallas transitorias, mediante factores como la presión del pedal, torque del freno y coeficiente de adhesión, basada en el Análisis de Arquitectura y Lenguaje de Diseño (AADL-Architecture Analysis and Design Language) para comprobar dicho algoritmo realiza simulaciones con un tarjeta de desarrollo HIL.

3.2. Sensores de Temperatura

En los sistemas diagnósticos de frenos consultados prevalece un factor determinante y es el de la temperatura; a continuación se exponen los tipos de sensores utilizados para sensor la temperatura en los componentes fijos (Pastillas de freno) y los componentes móviles (Disco de freno).

3.2.1. Termopar Tipo K.

Teniendo en cuenta que (Commission, 2013) define un termopar como 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.

(Degenstein, Thomas; Günter, Marc; Keller, Alexander; Winner, 2007) Diseña un sistema de medición para medir la temperatura entre la pastilla de freno y el disco de freno de un automóvil de pasajeros. La temperatura es medida dentro de la pastilla de freno en un rango de temperatura de trabajo entre -40°C y 1200°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 incrusta directamente un termopar tipo K abierto en la pastilla de freno para medir la temperatura en el área de contacto de la pastilla de freno y el disco con un tiempo de respuesta muy corto. 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 (Fig. 15)

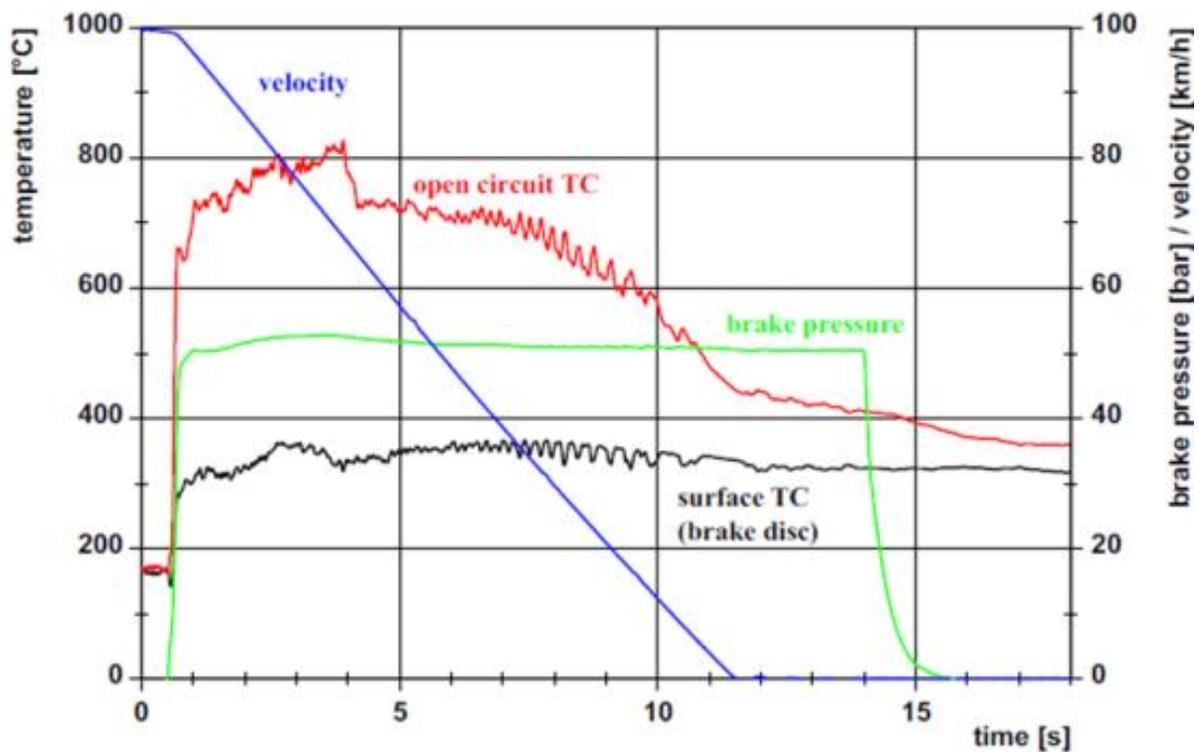


Figura 15. Temperatura vs Tiempo. Fuente (Degenstein, Thomas; Günter, Marc; Keller, Alexander; Winner, 2007)

En (Bakonyi-Kiss & Szucs, 2007) Implementan un sensor de temperatura de freno de bajo costo, bajo consumo, inteligente y con comunicación de RF, capaz de medir la temperatura de los frenos en el amplio intervalo de temperatura desde -40°C hasta $+800^{\circ}\text{C}$, con termopares de tipo K. La caracterización con estos termopares se lleva a cabo con éxito a través de una cámara de ensayo térmico obteniendo un rango de

medición de 0... 250 ° C y estos componentes pueden integrarse en un chip compacto. (Mariana Montenegro Montero, Jose Francisco Navarro Bejarano, 2014a) Diseña un banco de pruebas en el que instalaron sensores de temperatura de contacto, en particular del tipo termopar, en los componentes estáticos del sistema de frenos con un límite de precisión de 2% de la escala de medición, de marca WATLOW, para mediciones desde -200 °C a los 650 °C, con una configuración que permite colocarla sobre cualquier superficie. (Grkić, Mikluc, Muždeka, Arsenić, & Duboka, 2015) Afirma que al comparar todas las técnicas disponibles de medición de temperatura, el método que usa termopares muestra ventajas significativas sobre otros debido a que son muy efectivos para medir la temperatura en el contacto del par de fricción, sin embargo, debe tenerse en cuenta que 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 (Fig. 16) de acuerdo a la norma SAE J843. En este estudio, esta posición no fue satisfactoria debido a los fenómenos de desgaste.

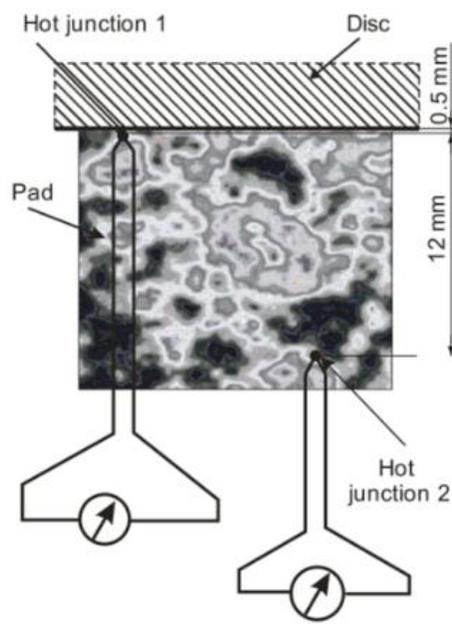


Figura 16. Posición de las termocupas en la pastilla. Fuente: (Grkić et al., 2015)

(Ghazaly, 2013) Fija el termopar en la pastilla de freno para medir la temperatura de fricción en el área de contacto entre la pastilla de freno y el disco de freno. El voltaje de salida del termopar es de milivoltios, por lo que diseña un amplificador para aumentar la magnitud del voltaje de salida del termopar y así conectarlo al sistema de adquisición de datos. (Polajnar et al., 2017) Utiliza termopares en las pastillas debajo de la zona de contacto, con una distancia inicial a la interfaz pastilla-disco de 0,7 mm realizando pruebas para monitorear continuamente el coeficiente de fricción y el desgaste de la pastilla de freno; los resultados muestran que la profundidad de desgaste disminuye con cada ciclo de prueba adicional, confirmando que el desgaste es el más alto en los primeros dos ciclos de prueba. (Siroux, Cristol-Bulthé, Desplanques, Desmet, & Degallaix, 2008) Determina que midiendo la temperatura del disco de freno a 2 mm, 5 mm y 7 mm bajo la superficie de fricción durante una sucesión de frenadas, los datos experimentales y un modelo analítico de conducción térmica determinan la evolución de la temperatura de la superficie del disco y estos resultados los compara con los estimados por pirometría, encontrando una buena correlación, teniendo en cuenta que la función de transferencia térmica del disco, este definida como la relación entre la masa y la temperatura superficial del disco y cuantifica la atenuación de la temperatura y el desplazamiento de fase de la onda térmica en el disco. (Xu & Winner, 2015) difiere en la forma para sensar la temperatura, pues sensa la temperatura de una parte móvil del sistema de frenos: la superficie del disco de freno (Fig. 17) con una termocupla tipo K en un rango efectivo de 0 a 900°C, teniendo en cuenta que la temperatura influye en la aparición de vibraciones en el disco.



Figura 17. Ubicación del sensor. Fuente: (Xu & Winner, 2015)

(Sofia Finnved, 2015) utiliza tres termocuplas tipo K para sensor la temperatura de un disco de freno, ubicando una en el borde, otra en el interior de este y otra cerca al disco para medir la temperatura ambiente, con la finalidad de correlacionar datos de esta variable para detectar vibraciones en el sistema. (McPhee & Johnson, 2008) considera que el montaje de termopares instalados directamente en el rotor de los frenos requiere menos posprocesamiento y a la vez proporciona una mayor precisión y una excelente respuesta. Mientras que (Rodríguez García & Nieto Sánchez, 2017) que propone un modelo donde se hace la lectura de la temperatura directamente sobre el disco de freno del vehículo y se comunica vía RF hacia la unidad central de proceso, donde se procesa dicha señal y luego se envía al usuario en tiempo real, tal como se muestra en la Fig. 18.

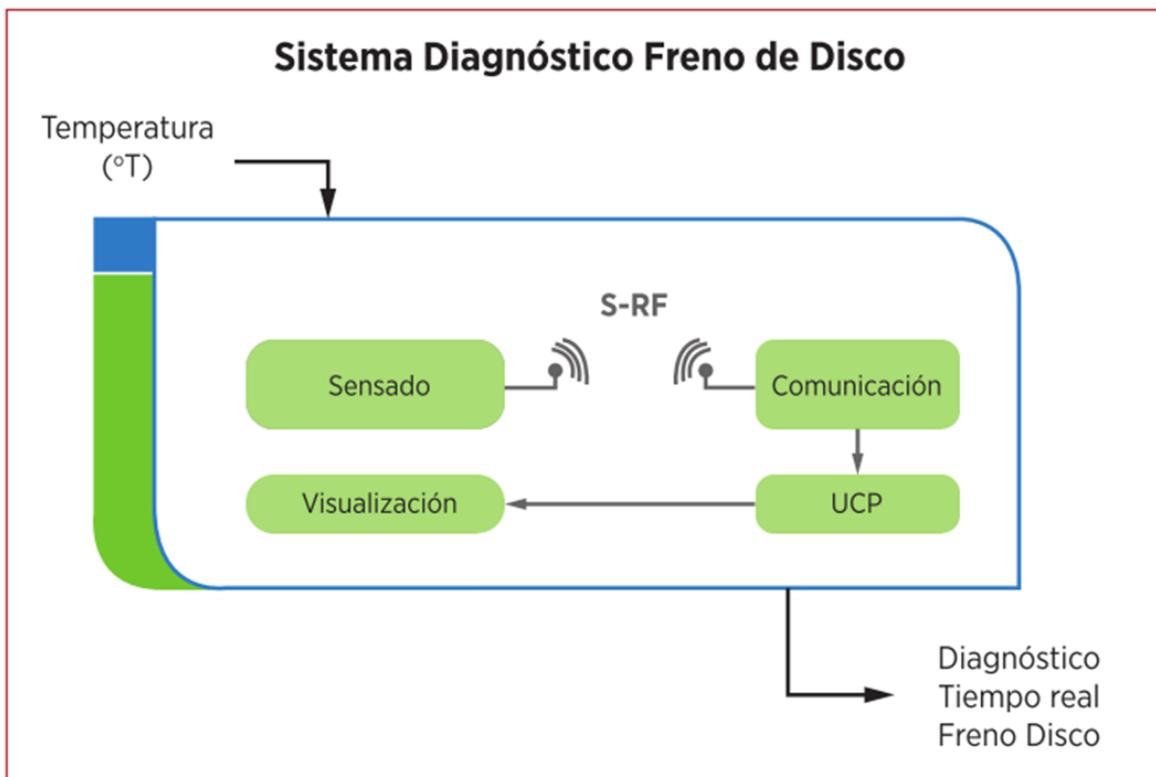


Figura 18. Sistema de comunicación por RadioFrecuencia. Fuente: (Rodríguez García & Nieto Sánchez, 2017)

3.2.2. Microsensor.

(Sivarao, M. Amarnath, M.S.Rizal, 2009) Lleva a cabo una investigación para identificar la ubicación para un microsensor incrustado en la pastilla del freno (fig. 19) para alertar el límite de desgaste de revestimiento del freno. En esta investigación el empotramiento del microinterruptor se realiza y se prueba con éxito y es muy eficiente, logrando un sistema para alertar al conductor el límite máximo de desgaste del revestimiento de la pastilla de freno.

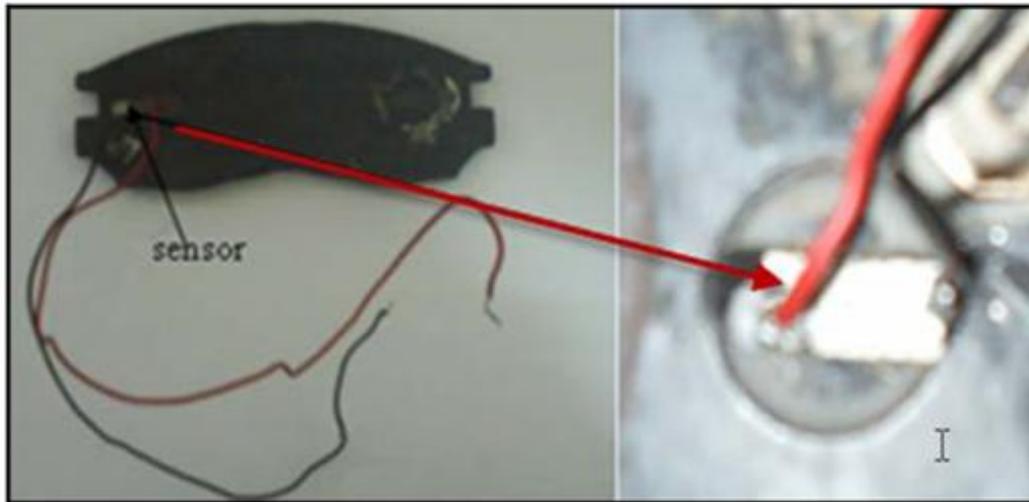


Figura 19. Sensor integrado a la pastilla de freno. Fuente: (Sivarao, M. Amarnath, M.S.Rizal, 2009)

Los datos sensados en un sistema diagnóstico deben ser enviados a una unidad de procesamiento, para tal fin (Ping; & Baker, 2018) implementa un sistema de detección de desgaste de pastillas de freno, que incluye un circuito de comunicación de RF para transmitir y recibir los datos de desgaste de la pastilla de freno, el receptor está conectado al controlador principal, tal como lo propone (Rodríguez García & Nieto Sánchez, 2017). (Evans & Castrilli, 2011) Describe un dispositivo instalado en la pastilla de freno con un detector de desgaste pasivo, que elimina la necesidad de disponer de una batería y un sensor inalámbrico para transmitir la información, usando tecnología RFID (Identificación por Radiofrecuencia) con código de identificación no eliminable, que se especifica para cada tipo de pastilla de freno, la información se almacena en el microchip RFID, programado para evaluar las señales de datos del transpondedor y desplegar visualmente la información al conductor y (Eden, 2016) Incrusta un sensor en la pastilla de freno a una distancia predeterminada con respecto a la superficie de esta, que

consiste en un filamento eléctricamente conductor que disminuye su conductividad, cuando la pastilla se desgasta y a través de una memoria se almacena la información inicial del espesor de la pastilla, la información de instalación y la información de identificación de la rueda.

3.2.3. Sensor Infrarrojo.

En (Alberto Sáenz Gonzalo, 2010) describen como sensor la temperatura de los discos de frenos de un monoplaza F1; se usa un detector de infrarrojos de tipo fotoconductor, para el contacto directo con el material a sensar, evitando 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. Al tener presente este fenómeno (Wenlian Li, Yang Li, & Fan Xiao, 2010) Diseña un sistema digital de medición de temperatura con control automático basado en instrumentación virtual (LabVIEW) en un pequeño sistema encapsulado con control termostático computacional. No obstante, sensar la temperatura sin contacto se evidencia en muchos proyectos tal como lo hace (Xiao Ke & Fu Sheng, 2011), quien diseña un sistema que monitorea en tiempo real, mostrando la presión de aceite y la temperatura de las pastillas de freno usando un módulo de transmisión inalámbrica nRF24L01. Los parámetros son medidos directamente por el sensor de presión de aceite, el sensor de desplazamiento y el sensor de temperatura infrarrojo sin contacto. (Mariana Montenegro Montero, Jose Francisco Navarro Bejarano, 2014b) también hace uso de un sensor infrarrojo en su diseño, para determinar la calidad de las pastillas de freno utilizadas en automóviles livianos, para sensar la temperatura usa un sensor infrarrojo modelo CTP7 de Micro-Epsilon con un rango de medición de 0 °C hasta 500 °C. Los parámetros de un sensor infrarrojo se pueden correlacionar realizando una simulación, tal como lo propone (Dalimus, 2014), quien modela un sistema de frenado en Matlab/Simulink (Fig. 20), midiendo la temperatura real del freno con el sensor MLX90614. Este logra estimar la fuerza de fricción y el calor disipado. Se desarrolla y se prueba el prototipo de monitoreo de temperatura de freno en Arduino.

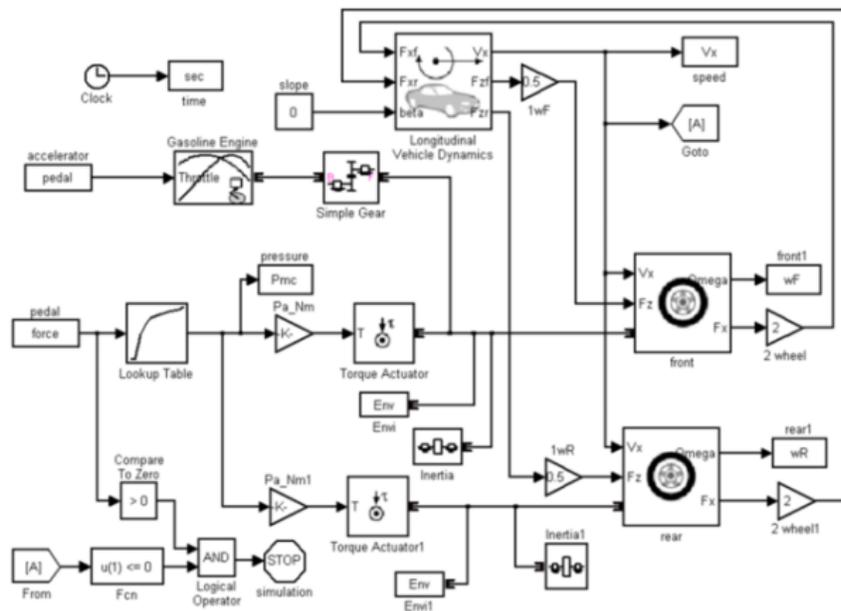


Figura 20. Modelo del vehículo en Simulink. Fuente: (Dalimus, 2014)

En este desarrollo se evidencia que la temperatura de los frenos tiende a aumentar de manera constante en el ciclo de aceleración y desaceleración repetido. (Fig. 21)

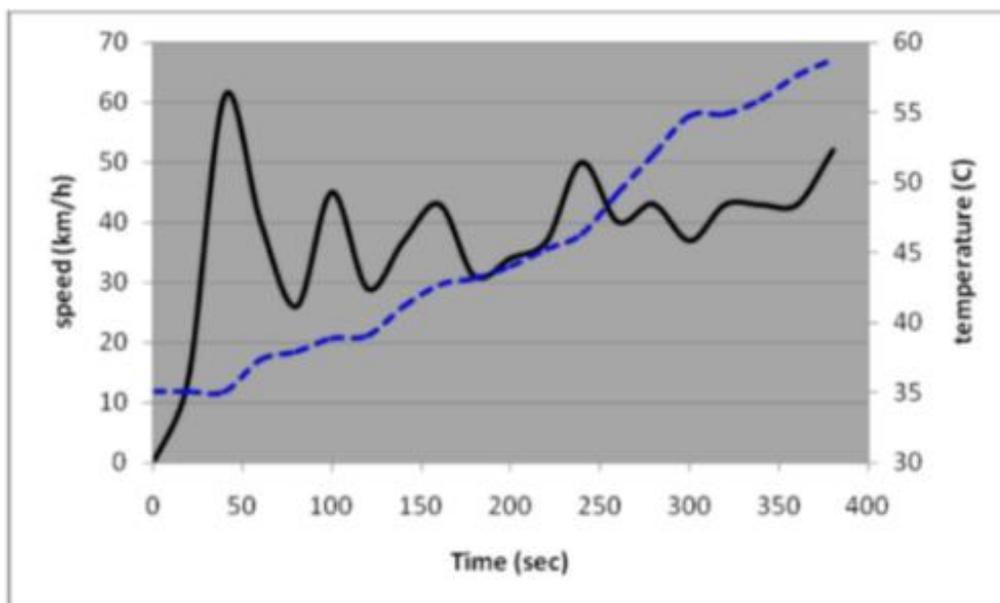


Figura 21. Análisis de Ciclo de aceleración y desaceleración repetido. Fuente: (Dalimus, 2014)

Un fenómeno muy evidente en el disco a temperaturas muy altas es el de emisividad y es (Kasem et al., 2010) quien desarrolla un dispositivo para medir este fenómeno de la superficie del disco, a través de un pirómetro de fibra óptica. El resultado es una medición de la temperatura superficial precisa, correlacionada con una cámara infrarrojo. El pirómetro determina la temperatura del disco teniendo en cuenta la cantidad de radiación que este emite, pues al aumentar la radiación, también lo hace la temperatura. La radiación se mide en dos colores distintos, la temperatura se calcula a partir del cociente de ambas señales detectadas. La Medición de la temperatura por infrarrojo aporta de manera significativa para poder ser correlacionada con valores teóricos, tal como lo hace (Verma et al., 2016) en su investigación del comportamiento tribológico del material de una pastilla de freno comercial, a través de pruebas de desgaste en el disco (prueba Pin On Disc) a diferentes temperaturas, con un sistema electrónico de lazo cerrado, induciendo la temperatura con una bobina de calentamiento controlada por un panel de control de y un sensor infrarrojo, como se observa en la figura 22. Por encima de 170°C se observa una transición de desgaste leve a severo. Se evidencia que el desgaste en las pistas de los discos deriva de fragmentos debido a la tribo-oxidación del mismo.

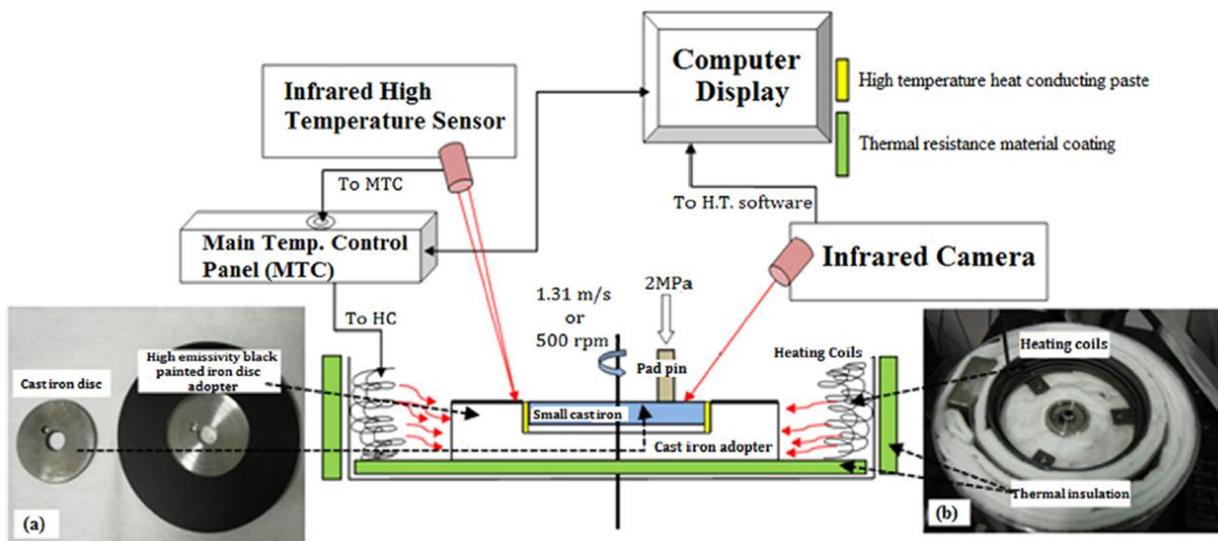


Figura 22. Prueba de desgaste de alta temperatura - circuito lazo cerrado. (Verma et al., 2016)

4. Resultados.

Al realizar la revisión bibliográfica de los sistemas diagnósticos de freno de disco, en el ámbito científico y tecnológico, se debe tener en consideración la geometría compleja del sistema de frenos de disco, pues primero se debe modelar a través de métodos numéricos que facilite resolver la complejidad del sistema. En esta revisión se evidencia que con el desarrollo de un modelo térmico a través del Método de Elementos Finitos, el análisis de las variables, tales como la temperatura, coeficiente de conductividad térmica, coeficiente de convección, coeficiente de fricción, el desgaste, entre otros; permite predecir el comportamiento y rendimiento térmico del sistema y esto se logra comprobar con datos correlacionados experimentalmente. Los autores consultados coinciden en que con la utilización de herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), se puede simular el funcionamiento del sistema de frenos y esto juega un papel importante para temas de precisión, de igual forma se pueden detectar puntos de falla. Entre estas herramientas se encuentran; Matlab, Simulink, Abaqus, Ansys y Labview.

El aprendizaje automático se debe considerar en el diseño de un sistema diagnóstico para un sistema de frenos de disco, pues al desarrollar técnicas que permiten a los computadores aprender, se pueden diseñar algoritmos para la detección de fallas. La caracterización de las principales fallas de un sistema de frenos de disco, se convierte en el principal insumo para el diseño de algoritmos con diferentes enfoques, tales como; Árbol de fallas, Algoritmos genéticos, Maquinas de vectores de soporte, redes neuronales, entre otros.

Para monitorear el desgaste de una pastilla de frenos es usual la instalación de microsensores para detectar el límite de uso de la misma.

La variable temperatura debe ser controlada y monitoreada, pues de esta depende el rendimiento de un sistema de frenos de disco, para tal fin es sensada en dos formas: En componente fijo como lo es la pastilla de freno y el componente móvil como lo es el disco de freno. El termopar tipo K es el más usado para sensar la temperatura en la pastilla de freno, la manera particular de instalación es incrustado, pues no se expone a la fricción y es muy importante la distancia al límite de desgaste de la pastilla de freno. 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, pues este no se expone a la fricción y se evita su destrucción; la caracterización y validación de datos, se realiza a través de cámaras infrarrojas.

5. Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones producto del análisis científico y tecnológico a través de la instrumentación electrónica, para el desarrollo de sistemas de diagnóstico asociados a los frenos de disco de un vehículo particular en los últimos diez años.

5.1. Conclusiones.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos confiables, soportadas en publicaciones originales de estudios científicos e información reciente, tales como IEEE, Science Direct, Biblioteca digital SAE, Elsevier, Congresos, Conferencias, Tesis, patentes, además artículos de desarrollo tecnológico y foros de la industria actual, sobre el tema objeto de estudio, teniendo en cuenta las variables del problema: Disco de freno, Sensor, Falla, Pastilla de freno, Térmico y se centralizó en la línea de tiempo entre 2007 y 2017, con un total de 150 artículos consultados cuyo contenido relacionaba temáticas tales como la composición, construcción, banco de pruebas, sensores de sistemas de freno y esto contribuyó al desarrollo de la investigación.

En un gestor de referencias y a través de una lectura crítica se seleccionó y se clasificó la información por temáticas y aspectos más relevantes sobre sistemas de diagnóstico de frenos de disco, ligados al análisis numérico, computacional y sensores. Del conjunto de estudios analizados se extrajo la información más relevante. En los documentos sobre análisis numérico y computacional, lo más destacado fue el método de elementos finitos, predicción de temperatura y aprendizaje automático. En los documentos sobre Sensores, las temáticas más sobresalientes fueron, la termografía, termopares, infrarrojos y microsensores.

Se analizó la información de acuerdo al objeto estudio, teniendo en cuenta los aspectos más relevantes de los sistemas de diagnóstico de frenos de disco, soportados en el análisis numérico y computacional, además métodos algorítmicos que determinan las fallas del sistema, de igual forma el tipo de instrumentación para sensar la variable temperatura, toda vez que esta es la de mayor influencia en el proceso de frenado. De esta forma el grupo investigador del SIIT conoce los avances más destacados en la línea de tiempo consultada.

Se identificaron los métodos, estudios y desarrollos tales como el Método de Elementos Finitos, en donde se analiza la temperatura, coeficiente de conductividad térmica, coeficiente de convección, coeficiente de fricción, el desgaste, entre otros; para predecir el comportamiento y rendimiento térmico del sistema, soportados en herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Además el diseño y desarrollo de algoritmos que proporcionan la detección de fallas, con diferentes enfoques, tales como; Árbol de fallas, Algoritmos genéticos, Maquinas de vectores de soporte, redes neuronales, entre otros. Por último se identificó la instrumentación necesaria para monitorear el desgaste de una pastilla de frenos.

5.2. Recomendaciones.

Se debe considerar el monitoreo y control de temperatura en las partes fijas y móviles del sistema.

A su vez se determina que gran parte de los desarrollos se basan en análisis computacional, simulaciones e implementación de bancos de prueba; para lo cual es de tener en consideración la implementación de un sistema diagnóstico en un vehículo particular,

La variable temperatura debe ser controlada y monitoreada, pues de esta depende el rendimiento de un sistema de frenos de disco, para tal fin es sensada en dos formas: En componente fijo como lo es la pastilla de freno y el componente móvil como lo es el disco de freno. El termopar tipo K es el más usado para sensar la temperatura en la pastilla de freno, la manera particular de instalación es incrustado, pues no se expone a la fricción y es muy importante la distancia al límite de desgaste de la pastilla de freno. 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, pues este no se expone a la fricción y se evita su destrucción; la caracterización y validación de datos, se realiza a través de cámaras infrarrojas.

Referencias.

- Abu Bakar, A R. and Li, L and James, S and Ouyang, H and Siegel, J. E. (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.
- AbuBakar, A. R., & 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>
- Alberto Sáenz Gonzalo. (2010). *Sensores de Fórmula 1 – De los circuitos a la carretera*.
- 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., Jakovljević, Ž., & 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. A., Barton, D. C., & Brooks, P. C. (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.). Retrieved from <http://www.applusidiada.com/es/>
- Baban, M., Baban, C. F., Bungau, C., Dragomir, G., & Pancu, R. M. (2014). Estimation of the Technical State of Automotive Disc Brakes Using Fuzzy Logic. *International Journal of Computers Communications & Control*, 9(5), 531. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2014.5.1274>
- Bakonyi-Kiss, G., & Szucs, Z. (2007). Low cost, low power, intelligent brake temperature sensor system for automotive applications. In *2007 IEEE Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DDECS.2007.4295309>
- Belhocine, A., & Bouchetara, M. (2012). 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., & Bouchetara, M. (2013a). Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 475–483.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.08.005>

- Belhocine, A., & Bouchetara, M. (2013b). Thermomechanical modelling of disc brake contact phenomena. *FME Transactions*, 41, 59–65.
- Carlos Zurrón-Barragán, Rubén Olarte-Valentín, María Cristina Ramírez-Aragón, Pedro Villanueva-Roldán, R. L.-L. (2012). Optimización de un Freno de disco mediante la combinación del Método de los Elementos Finitos y Algoritmos Genéticos. In *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos* (pp. 2186–2197). Valencia: Universidad de La Rioja.
- Commission, I. E. IEC 60584-1 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances (2013).
- 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, Thomas; Günter, Marc; Keller, Alexander; 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*, 1–5.
- Dragan Aleksendric; David C Barton. (2009). Neural network prediction of disc brake performance. *Elsevier*, 1074–1080. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.005>
- Eden, G. (2016). Systems and methods for detecting wear of brake pads. Google Patents. Retrieved from <https://www.google.ch/patents/US9353815>
- Eriksson, M., Bergman, F., & 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)
- Evans, C. K., & Castrilli, P. (2011). Wireless Brake Electronic Wear Sensors. Google Patents. Retrieved from <https://www.google.ch/patents/US20110133923>
- Garcia Leon, R. A. (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>
- Ghazaly, N. M. (2013). A Preliminary Experimental Investigation of a New Wedge Disc Brake. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 3(6), 735–744. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/258725439_A_Preliminary_Experi

mental_Investigation_of_a_New_Wedge_Disc_Brake

- Grkić, A., Mikluc, D., Muždeka, S., Arsenić, Ž., & 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>
- Huang, S., Zhou, C., Yang, L., Qin, Y., Huang, X., & Hu, B. (2016). Transient fault tolerant control for vehicle brake-by-wire systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 149, 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.001>
- Hwang, W., Han, K., Huh, K., Jung, J., & Kim, M. (2011). Model-based sensor fault detection algorithm design for Electro-Mechanical Brake. In *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 962–967). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6083012>
- ICONTEC. (2005). *NTC 1715 AUTOMOTORES. MATERIAL DE FRICCION PARA SISTEMA DE FRENOS.*
- Indira, V., Vasanthakumari, R., Jegadeeshwaran, R., & 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>
- Jegadeeshwaran, R., & 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, 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).
- Kasem, H., Thevenet, J., Boidin, X., Siroux, M., Dufrenoy, P., Desmet, B., & Desplanques, Y. (2010). An emissivity-corrected method for the accurate radiometric measurement of transient surface temperatures during braking. *Tribology International*, 43(10), 1823–1830. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.01.015>
- L. Zhang and D. Meng. (2010). Theoretical modeling and FEM analysis of the thermomechanical dynamics of ventilated disc brakes. *SAE Technical Paper*, (No. 01-0075, 2010). <https://doi.org/10.4271/2010-01-0075>

- Lian, R. fault diagnosis for hydraulic disc brake system using feature extracted from model and an S. classifier, Xu, Z., & 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.-B., & 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>
- Luo, J., Namburu, M., Pattipati, K. R., Qiao, L., & Chigusa, S. (2010). Integrated Model-Based and Data-Driven Diagnosis of Automotive Antilock Braking Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, *40*(2), 321–336. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2034481>
- Ma, D., Jang, Y., Zhou, Z., Zhao, T., & Lin, D. (2011). Grey relation analysis on fuzzy fault tree of disk brake. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (pp. 1590–1594). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023358>
- Mariana Montenegro Montero, Jose Francisco Navarro Bejarano, G. R. A. (2014a). *Diseño de un banco de pruebas para comparar parametros de calidad en pastillas de freno para automoviles livianos*. Universidad de Costa Rica.
- Mariana Montenegro Montero, Jose Francisco Navarro Bejarano, G. R. A. (2014b). *Diseño de un banco de Pruebas para Comparar parametros de Calidad en Pastillas de Freno para Automoviles Livianos*. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA.
- McPhee, A. D., & Johnson, D. A. (2008). Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor. *International Journal of Thermal Sciences*, *47*(4), 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.03.006>
- Parra, C., Olazagoitia, J. L., & 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. Retrieved from

<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84951045944&partnerID=tZOtx3y1>

- Pier Francesco Gotowicki, Prof. Vincenzo Nigrelli, P. G. V. M. (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. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/263818262_NUMERICAL_AND_EXPERIMENTAL_ANALYSIS_OF_A_PEGS-WING_VENTILATED_DISK_BRAKE_ROTOR_WITH_PADS_AND_CYLINDERS
- Ping, X., & Baker, L. (2018). Brake pad wear sensor. USA. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20180031066A1/en>
- Polajnar, M., Kalin, M., Thorbjornsson, I., Thorgrimsson, J. T., Valle, N., & Botor-Probierz, A. (2017). Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads. *Wear*, 382–383, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.015>
- Pury, P. (2015). *Fundamentos de Aprendizaje Automatico*. Cordoba, España. Retrieved from http://www.famaf.proed.unc.edu.ar/pluginfile.php/19002/mod_resource/content/2/01.introduccion.pdf
- Qi, H. S., & Day, A. J. (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>
- Redacción EL TIEMPO. (2017, January 7). Cada día mueren 18 personas en accidentes vehiculares en el país. *EL TIEMPO*. Bogota DC. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/cifras-de-accidentes-de-transito-en-2016-39192>
- Ricardo Andrés García León. (2014). *Evaluación del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir del análisis de la aceleración del proceso de corrosión*. Universidad francisco de paula santander ocaña.
- 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. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 14, 76.

- <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1286>
- SAE. (n.d.). Retrieved from <http://www.sae.org/>
- SALUD, O. M. D. LA. (2015). *INFORME SOBRE LA SITUACIÓN MUNDIAL DE LA SEGURIDAD VIAL 2015*. OMS. Retrieved from http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/es/
- Siroux, M., Cristol-Bulthé, A.-L., Desplanques, Y., Desmet, B., & Degallaix, G. (2008). Thermal analysis of periodic sliding contact on a braking tribometer. *Applied Thermal Engineering*, 28(17–18), 2194–2202. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.020>
- Sivarao, M. Amarnath, M.S.Rizal, A. K. (2009). An Investigation Toward Development Of Economical Brake Lining Wear Alert System. *International Journal of Engineering & Technology IJET*, Vol: 9 No.:, 251–256.
- Sofia Finnved, S. N. (2015). *Temperature Estimation in Trailer Disc Brake*. Lund University, Sweden.
- Thuppal Vedanta, S., & Kora, N. V. K. (2016). *HEAT TRANSIENT TRANSFER ANALYSIS OF BRAKE DISC /PAD SYSTEM*. Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering.
- Trichês Júnior, M., Gerges, S. N. 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>
- Verma, P. C., Ciudin, R., Bonfanti, A., Aswath, P., Straffelini, G., & Gialanella, S. (2016). Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear*, 346–347, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.004>
- Wang, X., Liu, C., Xiao, Z., & Wu, X. (2015). Study and implementation of vehicle brake test system. In *2015 IEEE International Conference on Information and Automation* (pp. 1524–1527). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279527>
- Wenlian Li, Yang Li, & Fan Xiao. (2010). The design and implementation of digital temperature measurement and automatic control system. In *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)* (Vol. 10, pp. V10-407-V10-409). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5622733>
- Wiegemann, Sven-Eric; Fecher, Norbert; Merkel, Nora; Winner, H. (2016).

AUTOMATIC HEAT CRACK DETECTION OF BRAKE DISCS ON THE DYNAMOMETER. In Technische Universität Darmstadt (Ed.), *EuroBrake* (pp. 1–11). Darmstadt, Germany: Institute of Automotive Engineering. Retrieved from <http://2016.eurobrake.net/programme/technical-programme/EB2016-SVM-057>

Xiao Ke, & Fu Sheng. (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>

Xu, X., & Winner, H. (2015). Experimental Investigation of Hot Judder Characteristics in Passenger Cars. In *EuroBrake*. Dresden, Germany: Technische Universität Darmstadt.

Yunus A. Cengel. (2007). *Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque Practico* (Tercera Ed). Mc Graw Hill.

ANEXO 1: Artículo de Revisión

A Review About Diagnostic Systems Associated to Disc Brakes in a Particular Vehicle

Velásquez Bran, J.D.

Abstract— This article presents a review of the diagnostic systems associated with disc brakes on a particular vehicle. This study presents an exploratory methodology, supported by scientific and technological databases, includes a review of: (1) Numerical and computational approach, (2) Invasive sensors and (3) Non-invasive sensors. The objective is identify the methods, studies and developments of diagnostic systems that allow monitoring the brake system of a particular vehicle, given that the Instrumentation and Telematics Research Seedbed (SIIT) requires developing the disc brake diagnostic system and implement this device in later phases. The main conclusion of this study is consider temperature monitoring and control in the fixed and moving parts of the braking system, consider that each component has a special type of sensor. It is recommended not use invasive sensors in mobile parts, to avoid their destruction it is also determined that most of the developments are based on computational analysis, simulations and implementation of instrumentation banks.

Keywords— brake disk, sensor, fault, brake pad, thermal

I. INTRODUCCION

LOS ACCIDENTES de tránsito actualmente constituyen un problema grave a nivel mundial; según La Organización Mundial de la Salud, a través del Informe sobre la situación mundial de la Seguridad Vial [1], indica que anualmente fallecen más de 1,25 millones de personas en el mundo, por accidentes de tránsito. En Colombia las cifras del Observatorio de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), revelan que entre enero y noviembre de 2017, se registraron 5833 fallecidos [2]; las principales causas se originaron por exceso de velocidad, consumo de alcohol, exceso de confianza y fallas mecánicas del vehículo, en las que se incluye el sistema de frenos y es claro afirmar que este es un sistema de seguridad destinado a prevenir colisiones, la eficacia de este sistema se puede ver afectada por el desgaste no homogéneo del disco debido a frenados bruscos, en donde se eleva la temperatura por la fricción con las pastillas y en consecuencia se generan vibraciones igualmente un frenado deficiente, incrementando las probabilidades de accidental sin que el conductor se dé cuenta, en la mayoría de los casos se debe acudir al servicio técnico especializado para detectar 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 y se procesa la información, para luego suministrar el control y la visualización de los procesos.

Desde este punto de partida es necesario conocer primero que un Freno de disco está conformado básicamente por un disco de hierro fundido macizo (fundición gris nodular de grafito laminar, que contiene entre un 92% y un 93% de hierro) (Fig. 1) que gira con la rueda y una pinza o mordaza (caliper) montada en la suspensión del vehículo, que presiona las pastillas de fricción contra el disco.

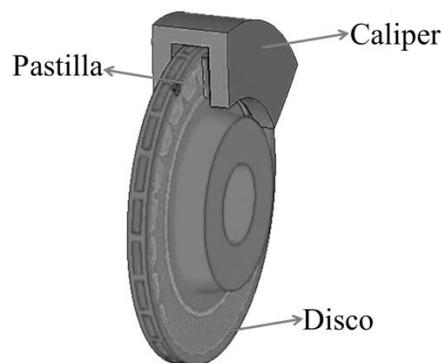


Figura 1. Sketch componentes freno de disco.

Respecto 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 [3]. 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 SPL (nivel de presión sonora) 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). Basado en la experiencia del Departamento de Sistemas de Frenado de IDIADA, han logrado resultados confiables y efectivos para la investigación del ruido de frenos y la resolución de problemas [4].

Para esta investigación el análisis térmico es un aspecto primordial, pues en el estudio de los sistemas de frenos la temperatura y el coeficiente de fricción (Tabla 1), determinan el comportamiento termomecánico de los componentes del sistema [5].

Tabla I. Coeficiente de Fricción Pastillas de freno.

CÓDIGO	Coeficiente de Fricción
C	$\mu \leq 0.15$
D	$0.15 < \mu \leq 0.25$
E	$0.25 < \mu \leq 0.35$
F	$0.35 < \mu \leq 0.45$
G	$0.45 < \mu \leq 0.55$
H	$\mu > 0.55$
Z	Sin Clasificación

Por ende se deben tener en cuenta las características de las variables que interactúan en la estructura; por ejemplo la conductividad térmica de las fundiciones grises es aproximadamente; superior a la de los aceros, en ello influye el grafito, que es buen conductor por ende tienen mayor capacidad para disipar el calor. Asimismo, el coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente de, entre 0°C y 500°C, y de en el rango de 0°C y 100°C, aunque parecido al del hierro. Además estas fundiciones poseen alta resistencia al choque térmico el cual resulta mejor para altos contenidos en carbono. [7] define las propiedades físicas y térmicas de la fundición gris nodular de grafito laminar el cual tiene una composición de silicio y manganeso así:

Tabla II. Propiedades físicas y térmicas de la fundición gris.
Fuente: Elaboración propia

Conductividad térmica	$k = 41 J/s * m * ^\circ C$
Calor específico	$C_p = 434 J/Kg * ^\circ C$

Densidad	$\rho = 8131 Kg/m^3$
Difusividad térmica	$\alpha = 11,60 * 10^6 m^2/s$
Coeficiente de transmisión térmica	$U = 32 J/s * m^2 * ^\circ C$

En un vehículo en movimiento (energía cinética) al aplicar el freno se reduce la velocidad y en ese momento, la energía se transforma en energía calorífica, generada por la fricción. Esta transformación de energía genera un aumento de la temperatura global de todo el sistema. Durante las frenadas bruscas, la disipación de potencia en una pastilla de freno está alrededor de 30 kW, dando como resultado temperaturas de superficie muy altas [8]. 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 a mayor temperatura en un lapso de tiempo, el disco experimenta ciertos fenómenos y en el evento en que el disco alcance la temperatura de saturación, el coeficiente de fricción disminuirá entre los componentes del freno y se producirá un fenómeno llamado Fading y este genera pérdida de eficacia 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 hasta valores de 400°C a 500°C [9], [10].

El objetivo de esta investigación es la de identificar los métodos, estudios y desarrollos de sistemas diagnóstico, que permiten monitorear el sistema de frenos de un vehículo particular. Con esta investigación se pretende contribuir al desarrollo del objetivo planteado por el SIIT, pues con la recopilación de los aspectos más relevantes sobre el desarrollo científico y tecnológico de sistemas de diagnóstico asociados a los Frenos de Disco de un Vehículo particular en los últimos diez años, 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.

II. METODOLOGÍA

Se trabaja el esquema general de investigación de Arias Galicia (1991), con un tipo de investigación exploratoria. (Fig. 2).

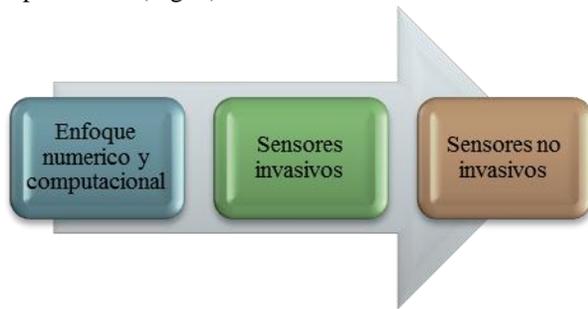


Figura 2. Esquema general de investigación. Fuente: Elaboración propia

Se inicia con la recopilación de la información que consiste 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, térmico y se centraliza en la línea de tiempo entre 2007 y 2017, con un total de 150 artículos consultados. Se tienen 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 una segunda etapa se procesan los datos a través de una lectura crítica. Los artículos se seleccionan y se organizan en un gestor de referencias, además se realiza una tabla de análisis y síntesis, en donde se incluye la información notable procedente de cada estudio de acuerdo al objetivo planteado, se hace una comparación de los resultados de las investigaciones. Para la selección de las fuentes consultadas, se tienen en cuenta las investigaciones aplicadas al Diagnóstico de Sistemas de Freno de disco, seleccionando al final un total de 50 artículos, luego se clasifica la información por líneas de investigación, se identifican las ideas más importantes, y relacionadas con el tema de estudio. De igual forma se interpretan las intencionalidades de los autores teniendo en cuenta las ideas planteadas en la formulación del problema para la solución del mismo, identificando adecuadamente las diferencias de los resultados de los estudios realizados, donde se obtienen al final conclusiones importantes que contribuyen a descubrir desarrollos e investigaciones en torno al Diagnóstico de Sistemas de Freno de disco.

La información analizada se estructura en tres sub-apartados: uno dedicado al análisis numérico y computacional, otro a sensores invasivos y otro a sensores no invasivos.

En los documentos sobre análisis numérico y computacional, las variables fueron: método de

elementos finitos, predicción de temperatura, aprendizaje automático, en los documentos sobre Sensores, las variables fueron: termografía, termopar, infrarrojo, microsensors. De las revisiones realizadas, se extrae información sobre autoría, año, finalidad, fuentes de información y conclusiones.

Análisis Numérico y Computacional.

Método de Elementos Finitos (FEM).

Teniendo en cuenta la geometría compleja del sistema de freno de disco, se hace necesaria la aplicación de métodos numéricos para modelar y resolver, la complejidad que rige este sistema. Un método clásico para resolver y analizar este tipo de sistemas complejos es el Método de Elementos Finitos (FEM), en esencia es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales, en donde se discretiza la geometría de una estructura en un número finito de partes, obteniendo soluciones aproximadas. Para determinar los puntos de falla de un sistema de freno de disco, es indispensable modelarlo, partiendo del diseño, siendo importante los materiales de construcción y que actúan para garantizar la estabilidad y durabilidad del sistema. Con técnicas basadas en Algoritmos Genéticos (GA) se valida un modelo de elementos finitos de un freno de disco, en donde la variable más relevante para el estudio es el coeficiente de conductividad térmica (λ) debido a que se considera como la más representativa e influyente del material en el proceso [11]. El cálculo de las temperaturas de los discos de freno y las pastillas de freno, se puede determinar con el método de Elementos Finitos a través de la integración de Matlab y Simulink con el bloque S-Function. Los resultados de simulación del disco de freno y de la pastilla de freno arrojan una buena correlación con los ensayos experimentales [12]. En la fig. 3 se muestra el modelo del proceso para calcular las temperaturas a través de las ecuaciones de elementos finitos asimétricas.

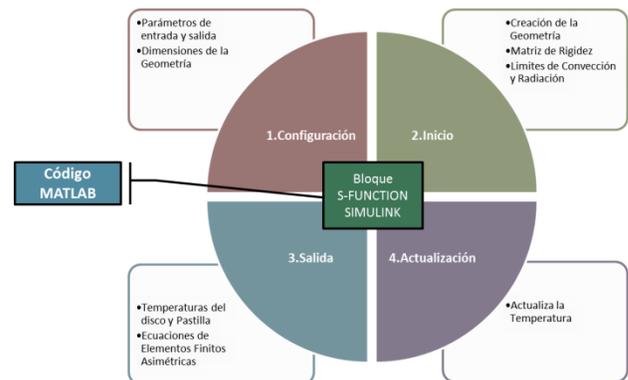


Figura 3. Modelo térmico del disco de freno en Simulink. Fuente: Elaboración propia

De otro modo para predecir el campo de temperatura transitoria del disco, el estrés normal en el espesor radial y asimétrico del disco interno y externo, los resultados del FEM son validados a través de un experimento utilizando termopares y sensores de desplazamiento sin contacto. Aquí la dinámica del vehículo no se considera en el cálculo de la presión de la interfaz de fricción y la fuerza normal total [13].

Con el FEM se puede evidenciar que la temperatura máxima en la interfaz de fricción no aumenta linealmente con la relación de área de contacto. Este hallazgo es potencialmente significativo para optimizar el diseño y la formulación de materiales de fricción para garantizar estabilidad y rendimiento de desgaste. El área de contacto entre el disco y la pastilla es donde la mayor parte de la energía cinética se disipa por fricción y tiene un efecto significativo sobre la temperatura de frenado [14].

Entre tanto los parámetros tales como: coeficiente de fricción, presión de frenado, temperatura del freno y desgaste son relevantes para el comportamiento dinámico del sistema, a través del FEM se logra determinar la estabilidad dinámica del sistema, y el efecto del desgaste sufrido por los componentes del freno, además se identifican las frecuencias inestables generadas por ruidos, el rendimiento de algunos métodos de control y algunos cambios en las propiedades del material como el desgaste [15]. Con un modelo detallado de elementos finitos tridimensionales se logra predeterminar el desgaste del material de fricción en un sistema de freno de disco, realizando la comparación con un par de pastillas de freno nuevas, bajo diferentes tiempos de aplicación del freno, estableciendo el desgaste en sus superficies [16]. Teniendo en cuenta que el desgaste de las pastillas genera un chillido, con la creación de modelos computacionales se proporciona una herramienta específica para reducir la probabilidad de este en los componentes de los frenos y hace un aporte valioso a los fabricantes de frenos [17]. A través de un Análisis de Autovalores Complejos (CEA) y un Análisis dinámico de transitorios, se puede analizar la inestabilidad de chillido y se determina con más exactitud con datos imprecisos [18]. Los autores coinciden que el desgaste de la pastilla de freno es un factor que genera el particular chillido en el sistema, pues mediante un modelo de elemento finito tridimensional de un freno de disco sólido de Mercedes (fig. 4) con 8350 elementos sólidos y aproximadamente 37,100 grados de libertad (DOF), se logra determinar que el área de contacto aumenta a medida que avanza el desgaste, con la fórmula de tasa de desgaste de Rhee, se puede predecir la generación de chillidos [19].

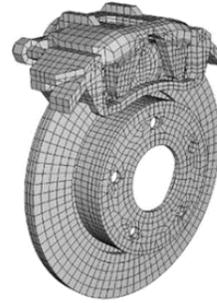


Figura 4. Modelo computacional FEM freno de disco sólido de Mercedes [20].

El rendimiento térmico del sistema de freno de disco se debe evaluar a una escala reducida con la ventaja de bajar costos y reducir el tiempo de desarrollo, para comparar los rendimientos térmicos tanto en discos de escala completa como escala pequeña; para tal fin se usa un dinamómetro de freno convencional y un modelo de elementos finitos térmicos transitorios asimétricos bidimensionales diseñado en el software Abaqus, este último para validar la metodología propuesta. Las simulaciones numéricas confirman la equivalencia entre el rendimiento térmico del disco de escala completa y pequeña, siendo esta una herramienta importante para evaluar el rendimiento térmico de los frenos de disco en la fase de diseño inicial [20].

ANSYS es otro software que contribuye al análisis del comportamiento térmico, pues al simular un disco de freno macizo y uno ventilado (Fig. 5) el modelado determina la distribución de la temperatura en el freno de disco y se evalúan los campos de esfuerzo y deformaciones del disco, además la presión de contacto sobre las pastillas. Los resultados que se obtienen con las simulaciones son satisfactorios, encontrando que el disco ventilado no sufre un esfuerzo técnico tan severo en comparación del disco macizo [21].

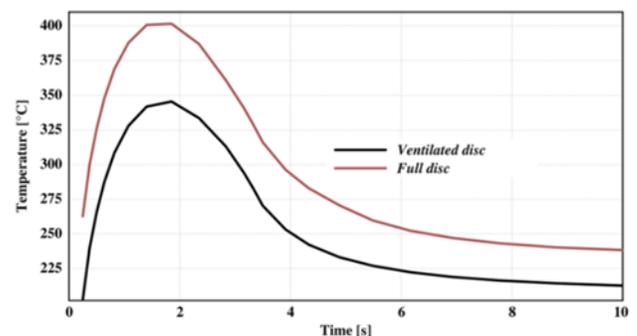


Figura 5. Variación en la temperatura frente al tiempo de los discos [22].

Si bien es cierto que en un sistema de frenos el calor generado por la fricción no se distribuye

uniformemente (Fig. 6), con un análisis termomecánico se puede determinar que la expansión térmica y las imperfecciones en la geometría del sistema influyen en este comportamiento [22].

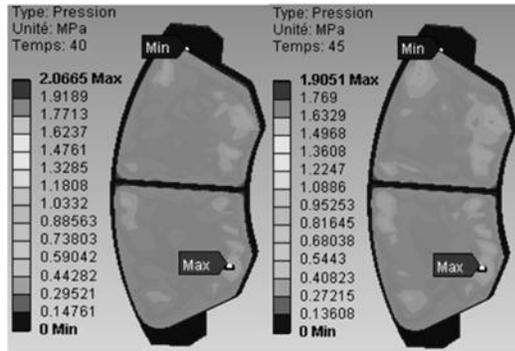


Figura 6. Distribución de presión de contacto en la pastilla [23].

Los autores coinciden en que los parámetros estructurales tales como la conductividad térmica y el calor específico influyen en función a la temperatura, al simular numéricamente el proceso de frenado de un disco ventilado y al compararlo con datos experimentales, estos correlacionan, considerando de esta manera los cálculos numéricos como conservadores, debido a que el campo térmico numérico es tan solo un poco más alto que el experimental. Además, el rotor de freno de disco ventilado con aletas oscilantes puede disipar una gran cantidad de flujo térmico y genera una gran estabilidad dimensional [23].

Al verificar con un dinamómetro el comportamiento termomecánico del conjunto de componentes de un sistema de freno de disco, se pueden establecer los parámetros de diseño de un freno de disco, teniendo en cuenta la detección de las deformaciones y la resistencia a la fatiga del disco. Con este método se puede predecir el rendimiento del sistema con respecto a la actividad de las pinzas de freno y la influencia de estas en la distribución de energía térmica en el disco de freno [24].

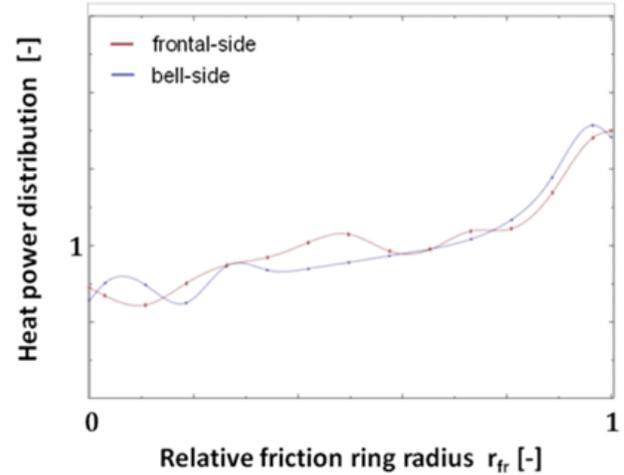


Figura 7. Grafica de distribución de calor en el disco [24].

Aprendizaje Automático.

El Aprendizaje Automático es una derivación natural desde la intersección entre la Estadística y la Ciencia de la Computación [25]. Para identificar causas potenciales de falla de un sistema antes de que las fallas ocurran, se requiere de un análisis de Árbol de Fallas (FTA), con enfoque cualitativo, aplicando técnicas de lógica difusa gris, pues se considerada una manera efectiva de resolver problemas debido a que el estado del evento básico es difuso con una probabilidad de que sea incierto. Los resultados pueden proporcionar bases teóricas para detectar deficiencias, prevenir fallas, mejorar la fiabilidad y la seguridad del sistema [26].

Con respecto al fenómeno de vibración, mediante la adquisición de señales con un acelerómetro tipo piezoeléctrico a una frecuencia de muestreo de 24 kHz se detectan condiciones defectuosas del freno, esto conlleva a un análisis con un enfoque de aprendizaje automático de máquina, usando un algoritmo de árbol de decisiones C4.5, (Fig. 8), tomando 55 muestras para cada condición del sistema de frenado, con LabVIEW se almacenan las señales y con un método estadístico llamado análisis de potencia se determina el tamaño de muestra mínimo para entrenar y obtener una buena precisión de clasificación con estabilidad estadística [27].



Figura 8. Sistema diagnóstico con árbol de decisiones a partir de la adquisición de datos con acelerómetro

El factor de la vibración para detectar fallos en el sistema de frenos a través de un acelerómetro de tipo piezoeléctrico es común, usando técnicas de aprendizaje automático y mediante un Algoritmo de Clasificación de Selección Clonal (CSCA), mediante tres pasos: El primero es la extracción de características, el segundo la selección de características y el tercero es clasificación de características (Fig. 9). Al simular nueve condiciones de falla clásicas en un sistema de frenos, se extraen doce conjuntos de características estadísticas de la señal de vibración utilizando técnicas de extracción de características. La selección de características se lleva a cabo utilizando un evaluador de atributos y las características seleccionadas se clasifican usando el algoritmo de clasificación de selección Clonal. De los 550 conjuntos de datos que se obtienen, el 96% es correcto [28].

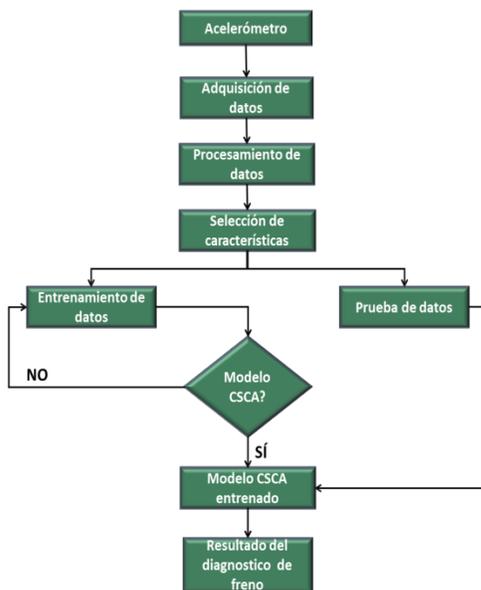


Figura 9. Sistema diagnóstico modelo CSCA.

Las fallas generadas en la contaminación y fugas de aceite en un sistema de frenos de disco hidráulico, se diagnostican mediante un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado (clasificador SVM -Support Vector Machine), teniendo en cuenta que los datos de entrenamiento se ubican en pares de objetos: una componente del par son los datos de entrada y el otro, los resultados deseados. La salida de la función es un valor numérico, en este caso los datos de entrada son la categoría y magnitud de falla en dos tipos. El método propuesto puede diagnosticar fallas en el cilindro hidráulico y contaminación de aceite en línea al mismo tiempo. Los resultados de la simulación muestran que el método puede cumplir eficazmente la función de diagnóstico. La precisión del clasificador SVM puede ser del 92,5%, cuando la magnitud de falla alcanza un cierto nivel y la tasa de error de estimación de magnitud es inferior al 6% [29]. Mediante la adquisición de señales NVH (Vibración, Ruido, Asperidad) y temperatura, se puede implementar un sistema de prueba de freno basado en un sistema embebido CompactRIO y en entorno de desarrollo de LabVIEW, con el procesamiento a través de filtros digitales, cálculos del espectro y frecuencia. Este sistema funciona de manera estable con una alta tasa de muestreo y transmisión masiva de datos [30].

En esta revisión se evidencia que la intención de los autores es la de predecir las fallas del sistema de frenos, para evitar un fallo grave y que lo haga más inestable, se ha visto que a través de métodos numéricos y computacionales en el proceso de frenado generan muchas incertidumbres, de este modo se comprueba un método más, cuyo enfoque apunta a la lógica difusa con el fin de estimar el estado técnico de los frenos de disco, a través de la variación del espesor del disco, utilizando este factor como variable lingüística de salida, las vibraciones y la temperatura como variables de entrada de lenguaje. El sistema de decisión difusa para la estimación del estado técnico de los frenos de disco se implementa con Fuzzy Logic Toolbox TM del software Matlab; para ello se establece que el espesor del disco se encuentre dentro de los límites prescritos por el fabricante [31]. Así mismo el modelo neuronal es implementado para predecir el desgaste de los materiales de fricción, frente a condiciones de fabricación. Pues se ha desarrollado un modelo neuronal de desgaste de materiales de fricción teniendo en cuenta la información del material de fricción (18 tipos), las condiciones de fabricación más importantes del material de fricción (5 parámetros). El trabajo experimental se basa en un dinamómetro de inercia de escala completa con tres pruebas de desgaste diferentes. (Fig. 10) Este modelo es capaz de predecir el desgaste de diferentes tipos de material de fricción [32].

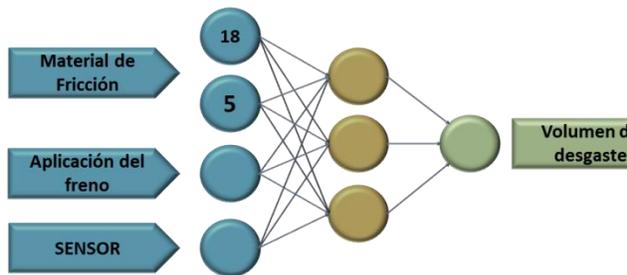


Figura 10. Modelo Neuronal para predecir el desgaste de materiales de fricción.

El proceso de frenado se ve afectado por las propiedades tribo-químicas de los materiales de fricción y los regímenes de operación del sistema, mediante redes neuronales artificiales se modela la operación del freno de disco, para predecir las características de fricción del freno de disco mediante un dinamómetro inercial con 26 parámetros de entrada; 18 parámetros relacionados con la composición del material de fricción, 5 parámetros relacionados con las condiciones de fabricación y 3 parámetros relacionados con las condiciones de prueba del freno y un parámetro de salida. Este modelo es capaz de caracterizar diferentes materiales de fricción en un estado inicial (frío) que puede afectar el rendimiento del freno de disco en la presión aplicada y velocidad inicial [33]. los enfoques de modelado, monitoreo, predicción, generan un control eficaz en el proceso de frenado, de hecho al proponer un control basado en la presión de accionamiento del freno de disco, la velocidad del vehículo y la temperatura del freno, mediante un microcontrolador CMOS de 8 bits, aplicando modelos neuronales, se puede predecir la presión de accionamiento del freno necesaria para alcanzar el valor de par de frenado deseado, de acuerdo a los parámetros de velocidad del vehículo y la temperatura del freno [34].

De otro modo en un sistema diagnóstico de fallas para frenos electromecánicos (EMB) basado en redundancia analítica, se propone un modelo de espacio de estado, que incluye señales de falla enviadas por los sensores de corriente, sensor de fuerza y sensor de posición del EMB. El algoritmo se diseña y se verifica a través de la simulación de un diagrama de bloques de lazo cerrado utilizando Matlab / Simulink. El resultado de la simulación se compara con el resultado de pruebas realizadas en un banco HILS (Hardware-in-the-loop simulation) y ambos resultados coinciden [35]. Mientras que para un freno de tipo BBW (Brake by wire) se propone un esquema jerárquico basado en el análisis de características de propagación de fallas transitorias, mediante factores como la presión del pedal, torque del freno y coeficiente de adhesión, basada en el Análisis de

Arquitectura y Lenguaje de Diseño (AADL- Architecture Analysis and Design Language) para comprobar dicho algoritmo realiza simulaciones con un tarjeta de desarrollo HIL [36].

Sensores invasivos

En los sistemas diagnósticos de frenos consultados prevalece un factor determinante y es el de la temperatura; a continuación se exponen los tipos de sensores utilizados para sensar la temperatura en los componentes fijos (Pastillas de freno) y los componentes móviles (Disco de freno).

Termopar Tipo K.

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 [37]. 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 es medida dentro de la pastilla de freno en un rango de temperatura de trabajo entre -40°C y 1200°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 de freno 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 (Fig. 11) [38].

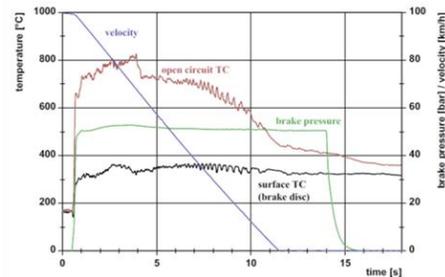


Figura 11. Temperatura vs Tiempo [38].

Ahora bien al implementar un sensor de temperatura de freno de bajo costo, bajo consumo, inteligente y con comunicación de RF hacia una unidad central de proceso, donde se procesa dicha señal y luego se envía al usuario en tiempo real [39], tal como se muestra en la Fig. 12, se puede medir la temperatura de los frenos en un amplio intervalo de temperatura, desde -40°C hasta $+800^{\circ}\text{C}$, con termopares de tipo K. La caracterización con estos termopares se lleva a cabo a

través de una cámara de ensayo térmico y se obtiene un rango de medición de 0... 250 ° C, de hecho estos componentes pueden integrarse en un chip compacto [40].

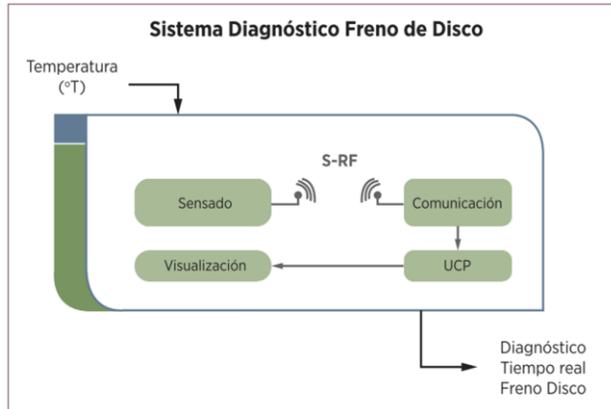


Figura 12. Sistema de comunicación por Radiofrecuencia [39].

En el desarrollo tecnológico de sistemas diagnósticos de freno es común ver bancos de pruebas en el que instalan sensores de temperatura de contacto, en particular del tipo termopar, en los componentes estáticos del sistema de frenos, con una configuración que permite colocarla sobre cualquier superficie [41]. Al comparar todas las técnicas disponibles de medición de temperatura, el método que usa termopares muestra ventajas significativas sobre otros debido a que son muy efectivos para medir la temperatura en el contacto del par de fricción, sin embargo, debe tenerse en cuenta que 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 (Fig. 13) de acuerdo a la norma SAE J843. En este estudio, esta posición no fue satisfactoria debido a los fenómenos de desgaste [42].

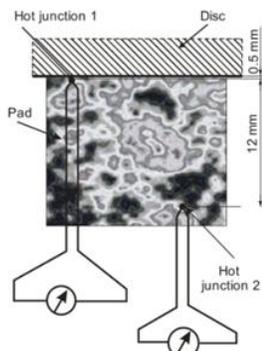


Figura 13. Posición de las termocuplas en la pastilla [42].

Al utilizar termopares en las pastillas debajo de la zona de contacto, con una distancia inicial a la interfaz pastilla-disco de 0,7 mm, al monitorear continuamente el coeficiente de fricción y el desgaste de la pastilla de freno, se evidencia que la profundidad de desgaste disminuye con cada ciclo de prueba adicional [43], confirmando que el desgaste es el más alto en los primeros dos ciclos de prueba. Al medir la temperatura del disco de freno a 2 mm, 5 mm y 7 mm bajo la superficie de fricción, durante una sucesión de frenadas, los datos experimentales, a través de un modelo analítico de conducción térmica, se determina la evolución de la temperatura de la superficie del disco comparando los resultados con los estimados por pirometría, se evidencia una buena correlación, teniendo en cuenta que la función de transferencia térmica del disco, está definida como la relación entre la masa y la temperatura superficial del disco y cuantifica la atenuación de la temperatura y el desplazamiento de fase de la onda térmica en el disco [44]. No obstante, al sensar la temperatura de una parte móvil del sistema de frenos: la superficie del disco de freno (Fig. 14) con una termocupla tipo K en un rango efectivo de 0 a 900°C, se demuestra que la temperatura influye en la aparición de vibraciones en el disco [45].

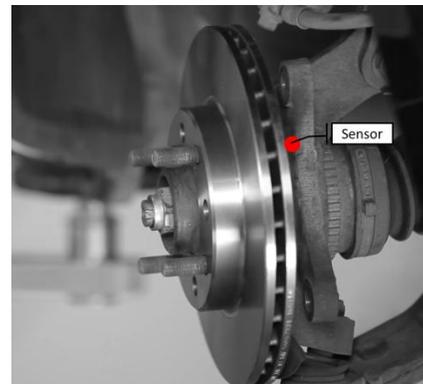


Figura 14. Sensado parte móvil.

Para detectar vibraciones en el sistema se deben usar tres termocuplas tipo K para sensar la temperatura de un disco de freno, ubicando una en el borde, otra en el interior de este y otra cerca al disco para medir la temperatura ambiente, con la finalidad de correlacionar datos de esta variable [46]. El voltaje de salida del termopar es de milivoltios, por lo que se debe diseñar un amplificador para aumentar la magnitud del voltaje de salida del termopar y así conectarlo al sistema de adquisición de datos [47]. El montaje de termopares instalados directamente en el rotor de los frenos requiere menos posprocesamiento y a la vez proporciona una mayor precisión y una excelente respuesta [48].

Microsensor.

Es usual ver desarrollos tecnológicos de fabricantes en donde embotran un microinterruptor en la pastilla del freno (Fig. 15) para alertar el límite de desgaste de revestimiento del freno [49]; pues al incrustar un sensor en la pastilla de freno a una distancia predeterminada con respecto a la superficie de esta con un filamento eléctricamente conductor que disminuye su conductividad, cuando la pastilla se desgasta, a través de una memoria se almacena la información inicial del espesor de la pastilla, la información de instalación y la información de identificación de la rueda, obteniendo un control estricto de la misma [50].

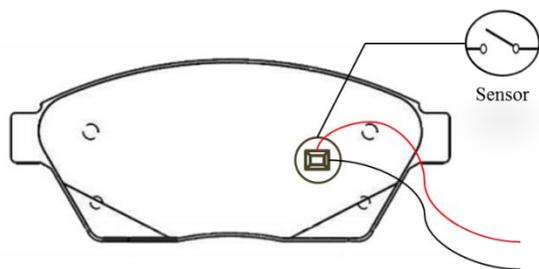


Figura 15. Sensor integrado a la pastilla de freno.

Los datos sensados en este tipo de sistema diagnóstico son a una unidad de procesamiento, mediante un circuito de comunicación de RF para transmitir y recibir los datos de desgaste de la pastilla de freno [39], [51]. Al instalar un microsensado de desgaste pasivo y un sensor inalámbrico para transmitir la información tipo RFID (Identificación por Radiofrecuencia) se descarta la necesidad de disponer de una batería para alimentar el circuito y se logra evaluar la información visualmente directamente por el conductor del vehículo [52].

Sensores no invasivos.

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 [53]. 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 [54] adquiriendo datos en tiempo real, en que además se pueden mostrar datos de presión de aceite, temperatura y calidad de las pastillas [55]. 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 [41] o el sensor MLX90614 con un sistema embebido Arduino [56], que al ser modelados en Matlab/Simulink (Fig. 16), su precisión puede ser correlacionada, al mismo tiempo se puede estimar la fuerza de fricción y el calor disipado.

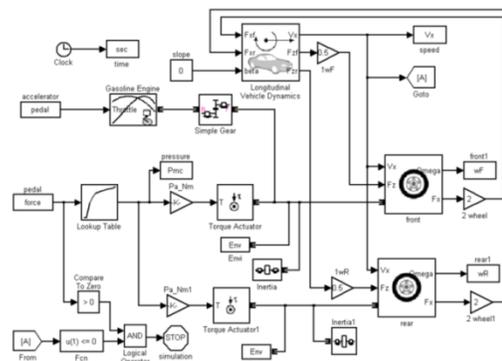


Figura 16. Modelo del vehículo en Simulink [56].

Además se evidencia que la temperatura de los frenos tiende a aumentar de manera constante en el ciclo de aceleración y desaceleración repetido tal como se observa en la Fig. 17.

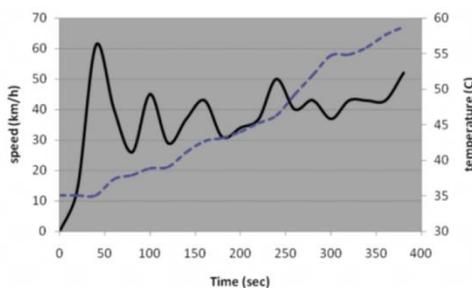


Figura 17. Análisis de Ciclo de aceleración y desaceleración repetido [56].

Un fenómeno muy evidente en el disco a temperaturas muy altas es el de emisividad y este se puede medir a través de un pirómetro de fibra óptica en donde la medición de la temperatura superficial es precisa correlacionada con una cámara infrarroja. El pirómetro determina la temperatura del disco teniendo en cuenta la cantidad de radiación que este emite, pues al aumentar la radiación, también lo hace la temperatura. La radiación se mide en dos colores distintos, la temperatura se calcula a partir del cociente de ambas señales detectadas [57]. El desgaste en las pistas de los discos emana fragmentos debido a la tribo-oxidación del mismo, esto se puede detectar analizando el comportamiento tribológico a través de pruebas de desgaste en el disco (prueba Pin On Disc) a diferentes temperaturas, con un sistema electrónico de lazo cerrado, induciendo la temperatura con una bobina de calentamiento controlada por un panel de

control y un sensor infrarrojo [58], como se observa en la Fig. 18.

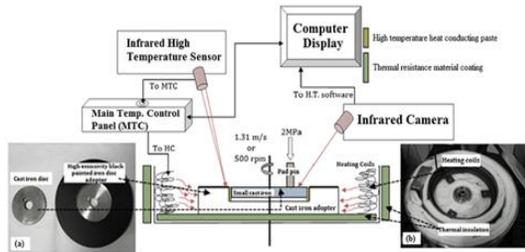


Figura 18. Prueba de desgaste de alta temperatura - circuito lazo cerrado [57].

III. ANALISIS Y RESULTADOS

Al realizar la revisión bibliográfica de los sistemas diagnósticos de freno de disco, en el ámbito científico y tecnológico, se debe tener en consideración la geometría compleja del sistema de frenos de disco, pues primero se debe modelar a través de métodos numéricos que facilite resolver la complejidad del sistema. En esta revisión se evidencia que con el desarrollo de un modelo térmico a través del Método de Elementos Finitos, el análisis de las variables, tales como la temperatura, coeficiente de conductividad térmica, coeficiente de convección, coeficiente de fricción, el desgaste, entre otros; permite predecir el comportamiento y rendimiento térmico del sistema y esto se logra comprobar con datos correlacionados experimentalmente. Los autores consultados coinciden en que con la utilización de herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), se puede simular el funcionamiento del sistema de frenos y esto juega un papel importante para temas de precisión, de igual forma se pueden detectar puntos de falla. Entre estas herramientas se encuentran; Matlab, Simulink, Abaqus, Ansys y Labview.

El aprendizaje automático se debe considerar en el diseño de un sistema diagnóstico para un sistema de frenos de disco, pues al desarrollar técnicas que permiten a los computadores aprender, se pueden diseñar algoritmos para la detección de fallas. La caracterización de las principales fallas de un sistema de frenos de disco, se convierte en el principal insumo para el diseño de algoritmos con diferentes enfoques, tales como; Árbol de fallas, Algoritmos genéticos, Maquinas de vectores de soporte, redes neuronales, entre otros.

Para monitorear el desgaste de una pastilla de frenos es usual la instalación de microsensores para detectar el límite de uso de la misma.

La variable temperatura debe ser controlada y monitoreada, pues de esta depende el rendimiento de un sistema de frenos de disco, para tal fin es sensada

en dos formas: En componente fijo como lo es la pastilla de freno y el componente móvil como lo es el disco de freno. El termopar tipo K es el más usado para sensar la temperatura en la pastilla de freno, la manera particular de instalación es incrustado, pues no se expone a la fricción y es muy importante la distancia al límite de desgaste de la pastilla de freno. 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, pues este no se expone a la fricción y se evita su destrucción; la caracterización y validación de datos, se realiza a través de cámaras infrarrojas.

IV. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica realizada aporta al Semillero de Investigación en Instrumentación y Teleinformática (SIIT) en el proyecto “Sistema diagnóstico para detección de problemas asociados a los frenos de disco en un vehículo particular”, diferentes temáticas estudiadas y analizadas, tales como métodos numéricos y análisis computacionales, que contribuyen al desarrollo de técnicas de detección y a su vez son el soporte para el desarrollo de los diferentes sistemas de detección de fallas del sistema de frenos, además se debe considerar el monitoreo y control de temperatura en las partes fijas y móviles del sistema.

A su vez se determina que gran parte de los desarrollos se basan en análisis computacional, simulaciones e implementación de bancos de prueba; para lo cual es de tener en consideración la implementación de un sistema diagnóstico en un vehículo particular.

REFERENCIAS

- [1] O. M. D. LA SALUD, *INFORME SOBRE LA SITUACIÓN MUNDIAL DE LA SEGURIDAD VIAL 2015*. OMS, 2015.
- [2] Redacción EL TIEMPO, “Cada día mueren 18 personas en accidentes vehiculares en el país,” *EL TIEMPO*, Bogota DC, 07-Jan-2017.
- [3] “SAE.” [Online]. Available: <http://www.sae.org/>.
- [4] “Applus + IDIADA.” [Online]. Available: <http://www.applusidiada.com/es/>.
- [5] A. Belhocine and M. Bouchetara, “Thermal analysis of a solid brake disc,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 32, pp. 59–67, Jan. 2012.
- [6] ICONTEC, “NTC 1715 AUTOMOTORES. MATERIAL DE FRICCIÓN PARA SISTEMA DE FRENOS,” 2005.
- [7] Yunus A. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque Práctico*, Tercera Ed. Mc Graw Hill, 2007.
- [8] M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, “On the nature of tribological contact in automotive brakes,”

- Wear, vol. 252, no. 1–2, pp. 26–36, Jan. 2002.
- [9] Ricardo Andrés García León, “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FRENOS DE DISCO DE LOS VEHÍCULOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ACELERACIÓN DEL PROCESO DE CORROSIÓN.” UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA, 2014.
- [10] R. A. García Leon, “Estudio térmico en tres frenos de disco ventilados, utilizando el análisis de elementos finitos,” *DYNA*, vol. 84, no. 200, pp. 19–27, Jan. 2017.
- [11] R. L.-L. Carlos Zurrón-Barragán, Rubén Olarte-Valentín, María Cristina Ramírez-Aragón, Pedro Villanueva-Roldán, “Optimización de un Freno de disco mediante la combinación del Método de los Elementos Finitos y Algoritmos Genéticos,” in *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2012, pp. 2186–2197.
- [12] S. Thuppal Vedanta and N. V. K. Kora, “HEAT TRANSIENT TRANSFER ANALYSIS OF BRAKE DISC /PAD SYSTEM,” Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2016.
- [13] L. Zhang and D. Meng, “Theoretical modeling and FEM analysis of the thermomechanical dynamics of ventilated disc brakes,” *SAE Tech. Pap.*, no. No. 01-0075, 2010, 2010.
- [14] H. S. Qi and A. J. Day, “Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking,” *Wear*, vol. 262, no. 5–6, pp. 505–513, Feb. 2007.
- [15] M. Trichês Júnior, S. N. Y. Gerges, and R. Jordan, “Analysis of brake squeal noise using the finite element method: A parametric study,” *Appl. Acoust.*, vol. 69, no. 2, pp. 147–162, Feb. 2008.
- [16] A. R. AbuBakar and H. Ouyang, “Wear prediction of friction material and brake squeal using the finite element method,” *Wear*, vol. 264, no. 11–12, pp. 1069–1076, May 2008.
- [17] C. Parra, J. L. Olazagoitia, and J. Biera, “Application of testing, modal analysis and numerical methods to the detection, prediction and avoidance of squeal noise in automotive brake systems,” *Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010*, no. November 2014, pp. 4351–4362, 2010.
- [18] H. Lü, W.-B. Shangguan, and D. Yu, “An imprecise probability approach for squeal instability analysis based on evidence theory,” *J. Sound Vib.*, vol. 387, pp. 96–113, Jan. 2017.
- [19] J. E. Abu Bakar, A R. and Li, L and James, S and Ouyang, H and Siegel, “Wear Simulation and Its Effect on Contact Pressure Distribution and Squeal of a Disc Brake,” in *Conference on Vehicle Braking Technology*, 2010, pp. 233–242.
- [20] A. A. Alnaqi, D. C. Barton, and P. C. Brooks, “Reduced scale thermal characterization of automotive disc brake,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 658–668, Jan. 2015.
- [21] A. Belhocine and M. Bouchetara, “Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 475–483, Sep. 2013.
- [22] A. Belhocine and M. Bouchetara, “Thermomechanical modelling of disc brake contact phenomena,” *FME Trans.*, vol. 41, pp. 59–65, 2013.
- [23] P. G. V. M. Pier Francesco Gotowicki, Prof. Vincenzo Nigrelli, “NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PEGS-WING VENTILATED DISK BRAKE ROTOR, WITH PADS AND CYLINDERS,” in *Automotive Engineers Cooperation Conference, At Belgrade*, 2005, pp. 1–15.
- [24] F. C. Jungwirth F. Dornheim A, “Coupled thermo-mechanical computation method for a virtual design processes of brake discs,” in *Proc. 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, 2014, pp. 1–10.
- [25] P. Pury, “Fundamentos de Aprendizaje Automático,” Cordoba, España, 2015.
- [26] D. Ma, Y. Jang, Z. Zhou, T. Zhao, and D. Lin, “Grey relation analysis on fuzzy fault tree of disk brake,” in *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011, pp. 1590–1594.
- [27] V. Indira, R. Vasanthakumari, R. Jegadeeshwaran, and V. Sugumaran, “Determination of minimum sample size for fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using power analysis,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 59–69, Mar. 2015.
- [28] R. Jegadeeshwaran and V. Sugumaran, “Brake fault diagnosis using Clonal Selection Classification Algorithm (CSCA) – A statistical learning approach,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 14–23, Mar. 2015.
- [29] R. fault diagnosis for hydraulic disc brake system using feature extracted from model and an S. classifier Lian, Z. Xu, and J. Lu, “Online fault diagnosis for hydraulic disc brake system using feature extracted from model and an SVM classifier,” in *2013 Chinese Automation Congress*, 2013, pp. 228–232.
- [30] X. Wang, C. Liu, Z. Xiao, and X. Wu, “Study and implementation of vehicle brake test system,” in *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2015, pp. 1524–1527.
- [31] R. M. P. M. Baban, C.F. Baban, C. Bungau, G. Dragomir, “Estimation of the Technical State of Automotive Disc Brakes Using Fuzzy Logic,” *Int. J. Comput. Commun. Control*, vol. 9, no. 5, pp. 531–538, 2014.
- [32] D. Aleksendrić, “Neural network prediction of brake friction materials wear,” *Wear*, vol. 268, no. 1–2, pp. 117–125, Jan. 2010.
- [33] Dragan Aleksendric; David C Barton., “Neural network prediction of disc brake performance,” *Elsevier*, pp. 1074–1080, 2009.
- [34] D. Aleksendrić, Ž. Jakovljević, and V. Ćirović, “Intelligent control of braking process,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 14, pp. 11758–11765, Oct. 2012.
- [35] W. Hwang, K. Han, K. Huh, J. Jung, and M. Kim, “Model-based sensor fault detection algorithm design for Electro-Mechanical Brake,” in *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011, pp. 962–967.
- [36] S. Huang, C. Zhou, L. Yang, Y. Qin, X. Huang, and B. Hu, “Transient fault tolerant control for vehicle brake-by-wire systems,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 149, pp. 148–163, May 2016.
- [37] I. E. Commission, *IEC 60584-1 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances*, 2013, p. 136.
- [38] H. Degenstein, Thomas; Günter, Marc; Keller, Alexander; Winner, “Dynamic measurement of the temperature of electro conductive objects used for the example of a wheel brake,” *AMA Serv. GmbH*, vol. A1.4, no. C, pp. 1–5, 2007.
- [39] N. J. Rodríguez García and I. C. Nieto Sánchez, “Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular,” *Av. Investig. en Ing.*, vol. 14, p. 76, Dec. 2017.
- [40] G. Bakonyi-Kiss and Z. Szucs, “Low cost, low power, intelligent brake temperature sensor system for automotive applications,” in *2007 IEEE Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems*, 2007, pp. 1–4.
- [41] G. R. A. Mariana Montenegro Montero, Jose Francisco

- Navarro Bejarano, "Diseño de un banco de pruebas para comparar parametros de calidad en pastillas de freno para automoviles livianos," Universidad de Costa Rica, 2014.
- [42] A. Grkić, D. Mikluc, S. Muždeka, Ž. Arsenić, and Č. Duboka, "A Model for the Estimation of Brake Interface Temperature," *Strojniški Vestn. – J. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 6, pp. 392–398, Jun. 2015.
- [43] M. Polajnar, M. Kalin, I. Thorbjornsson, J. T. Thorgrimsson, N. Valle, and A. Botor-Probierz, "Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads," *Wear*, vol. 382–383, pp. 85–94, Jul. 2017.
- [44] M. Siroux, A.-L. Cristol-Bulthé, Y. Desplanques, B. Desmet, and G. Degallaix, "Thermal analysis of periodic sliding contact on a braking tribometer," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 17–18, pp. 2194–2202, Dec. 2008.
- [45] X. Xu and H. Winner, "Experimental Investigation of Hot Judder Characteristics in Passenger Cars," in *EuroBrake*, 2015.
- [46] S. N. Sofia Finnved, "Temperature Estimation in Trailer Disc Brake," Lund University, Sweden, 2015.
- [47] N. M. Ghazaly, "A Preliminary Experimental Investigation of a New Wedge Disc Brake," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 6, pp. 735–744, 2013.
- [48] A. D. McPhee and D. A. Johnson, "Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 4, pp. 458–467, Apr. 2008.
- [49] A. K. Sivarao, M. Amarnath, M.S.Rizal, "An Investigation Toward Development Of Economical Brake Lining Wear Alert System," *Int. J. Eng. Technol. IJET*, vol. Vol: 9 No.:, pp. 251–256, 2009.
- [50] G. Eden, "Systems and methods for detecting wear of brake pads." Google Patents, 2016.
- [51] X. Ping; and L. Baker, "Brake pad wear sensor," US20180031066A1, 2018.
- [52] C. K. Evans and P. Castrilli, "Wireless Brake Electronic Wear Sensors." Google Patents, 2011.
- [53] Alberto Sáenz Gonzalo, "Sensores de Fórmula 1 – De los circuitos a la carretera," 2010.
- [54] Wenlian Li, Yang Li, and Fan Xiao, "The design and implementation of digital temperature measurement and automatic control system," *2010 Int. Conf. Comput. Appl. Syst. Model. (ICCASM 2010)*, vol. 10, no. Iccasm, pp. V10-407-V10-409, 2010.
- [55] Xiao Ke and Fu Sheng, "A condition monitoring system of the disk brake based on nRF24L01," in *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2011, pp. 283–286.
- [56] Z. Dalimus, "Braking System Modeling and Brake Temperature Response to Repeated Cycle," *J. Mechatronics, Electr. Power, Veh. Technol.*, vol. 5, no. 2, p. 123, Dec. 2014.
- [57] H. Kasem *et al.*, "An emissivity-corrected method for the accurate radiometric measurement of transient surface temperatures during braking," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 10, pp. 1823–1830, 2010.
- [58] P. C. Verma, R. Ciudin, A. Bonfanti, P. Aswath, G. Straffellini, and S. Gialanella, "Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material," *Wear*, vol. 346–347, pp. 56–65, Jan. 2016.

proyecto de investigación denominado "Sistema Diagnóstico para Detección de problemas asociados a los Frenos de Disco en un Vehículo particular".



Juan Velasquez es Tecnólogo en electrónica naval, estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, pertenece al Semillero de Investigación en Instrumentación y Teleinformática, actualmente trabaja en el