



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo de Integración Curricular previa a la obtención del título
de Ingeniería en Mecánica Automotriz**

**Diseño de sistema térmico, físico y experimental para el
monitoreo inteligente de temperatura en disco de frenos de
vehículos categoría N1**

AUTORES:

Adrian Alejandro Bolaños Canchignia
Francisco Xavier Bustamante Vargas
Pablo Andrés Freile Narváez

TUTOR:

Ing. Christopher Fuertes

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Adrian Alejandro Bolaños Canchignia, Franciso Xavier Bustamante Vargas y Pablo Andrés Freile Narváez, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

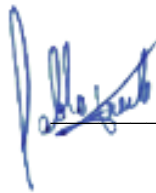
Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



Adrian Alejandro Bolaños Canchignia



Francisco Xavier Bustamante Vargas



Pablo Andrés Freile Narváez

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **CHRISTOPHER FUERTES**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "CHRISTOPHER FUERTES", enclosed within a large, loopy oval flourish.

Christopher Fuertes

DEDICATORIAS

Dedico este arduo trabajo a mis padres Jorge Bolaños y Mercedes Canchignia, ya que, ellos son mi pilar fundamental para salir adelante, con su esfuerzo me han brindado el mejor privilegio que existe en la vida, la cual es estudiar lo que me apasiona; a mis hermanos que han sido un ejemplo de superación a pesar de las adversidades, apoyándome con sus consejos para ser de mí cada día una mejor persona y un buen profesional.

A mi padre que me ve desde el cielo.

¡Lo logramos papá!

Adrian Alejandro Bolaños Canchignia

Dedico este logro a mi familia, quienes han sido el motor de mi vida y la razón de cada uno de mis esfuerzos: a mi madre Yadira Vargas, por su amor infinito, su entrega incondicional y por ser el corazón que ha guiado cada uno de mis pasos, enseñándome con su ejemplo a luchar con valentía y a nunca rendirme; a mi padre Manuel Bustamante, por su fortaleza, su sabiduría y por ser ese apoyo firme que siempre me impulsó a seguir adelante, brindándome seguridad y confianza en cada etapa de mi vida; a mi hermano, por su compañía leal, su apoyo sincero y por compartir conmigo este camino, siendo siempre un motivo de ánimo y alegría; y de manera muy especial a mi abuelita, cuyo amor puro, ternura incomparable y sabiduría llena de vida han sido una luz constante en mi camino, un refugio de paz y un ejemplo que llevaré siempre en mi corazón; asimismo, a mi novia, por su apoyo, su paciencia y por acompañarme durante este proceso. A todos ustedes, gracias por ser mi fuerza, mi inspiración y el pilar fundamental que me permitió alcanzar esta meta.

Francisco Xavier Bustamante Vargas

Dedico este trabajo principalmente a mi familia, por ser el pilar fundamental en mi formación personal y académica. A mis padres, por su amor, esfuerzo y sacrificio, que han sido la base de cada uno de mis logros. A todas aquellas personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo en los momentos más difíciles, este logro también les pertenece.

Pablo Andrés Freile Narváez

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a Dios por permitirme haber llegado hasta este momento en mi vida; agradecer a mi madre Mercedes Canchignia, que a pesar de que el camino no haya sido fácil siempre ha estado junto a mi padre apoyándome, gracias a su apoyo y amor hemos logrado salir adelante; agradezco a cada uno de mis profesores durante mi paso en la UIDE, que cultivaron sus conocimientos en mí, a Christopher Fuertes por no negarse a prestar su ayuda y encaminarnos de la mejor manera para lograr obtener un trabajo que ayude a la industria.

Adrian Alejandro Bolaños Canchignia

Expreso mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este proceso, especialmente a mi familia, por su amor, comprensión, paciencia y apoyo constante en cada etapa de mi formación; a mi madre, por su dedicación incansable y por enseñarme con su ejemplo el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia; a mi padre, por su guía firme, sus consejos oportunos y por impulsarme siempre a superarme; a mi hermano, por su apoyo incondicional, su cercanía y por estar presente en cada momento importante; y a mi abuelita, por su cariño sincero, sus palabras llenas de sabiduría y por ser una fuente de amor que siempre me ha fortalecido; a mi novia, por su compañía y apoyo a lo largo de este camino; y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron con sus conocimientos y motivación para hacer posible la culminación de este trabajo. Este logro no es solo mío, sino de todos quienes estuvieron a mi lado, brindándome la fuerza necesaria para seguir adelante.

Francisco Xavier Bustamante Vargas

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de titulación. En especial, a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de este proceso. A mis docentes y tutor de tesis, por su guía, conocimientos y acompañamiento en cada etapa del desarrollo de este proyecto. Asimismo, expreso mi gratitud a mis compañeros y amigos, quienes contribuyeron con su apoyo y colaboración para alcanzar este objetivo académico.

Pablo Andrés Freile Narváez

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	iii
DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO.....	3
1. Seguridad Vial y Sistemas de Frenado en el Ecuador	3
2. Vehículos categoría N1: Clasificación y Características	3
3. Principios físicos del Sistema de Frenos de Disco.....	4
3.1. Ecuación 1: Balance Energético en Frenado.....	4
3.2. Ecuación 2: Incremento de Temperatura por Fricción.....	4
4. Transferencia de calor en el disco de freno.....	5
4.1. Ecuación 3: Transferencia de Calor por Convección.....	5
5. Fading Térmico.....	6
6. Sensores de Temperatura para Aplicaciones Automotrices.....	6
7. Sistemas Inteligentes de Monitoreo Térmico y Marco Normativo.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS	7
1. Ruta de Pruebas.....	7
2. Normativas de Referencias	8
3. Materiales.....	8

3.1.	Vehículo de Pruebas.....	8
3.2.	Termocupla Tipo K.....	9
3.3.	Modulo MAX6675.....	10
3.4.	ESP32 de 38 Pines	11
3.5.	Pantalla Nextion NX4832T035.....	11
3.6.	Jumpers M-H, H-H y Cable de Datos Tipo C.....	12
4.	Programa para Recolección de Datos	12
5.	Programación del Prototipo y Comunicación con la Pantalla Nextion.....	14
6.	Interfaz Nextion.....	15
7.	Parámetros del Sistema de Alerta Temprana.....	16
8.	Flujograma de Funcionamiento del Prototipo Experimental.....	17
9.	Clasificación del Tipo de Frenado Aplicado en las Pruebas Experimentales.....	18
10.	Estimación de la Contribución del Prototipo a la Reducción de Siniestros.....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		20
1.	Resultados Generales de Temperaturas Máximas Registradas.....	20
2.	Comparativas Individuales.....	21
2.1.	Frenado Suave.....	21
2.2.	Frenado Moderado.....	22
2.3.	Frenado Duro	23
3.	Cálculos Teóricos y Comparación con los Resultados Experimentales	23
3.1.	Datos Utilizados para los Cálculos	23
3.2.	Velocidades de Prueba.....	24
3.3.	Cálculos sin Carga ($m = 1.650 \text{ kg}$)	24
3.4.	Cálculos con Carga ($m = 2.100 \text{ kg}$).....	25
3.5.	Tabla comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada.....	25
4.	Discusión.....	26

4.1 Cálculo de Fallecidos Evitados	29
4.2 Cálculo de Lesionados Evitados	30
4.3 Análisis en el Contexto Internacional	30
CONCLUSIÓN	31
BIBLIOGRAFÍA	34
ANEXOS	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del sistema de alerta temprana-Prototipo de monitoreo térmico	16
Tabla 2. Criterios para la clasificación del tipo de frenado aplicado en las pruebas experimentales con referencia a SAE J2522	18
Tabla 3. Daños mecánicos, valores absolutos y porcentajes 2024	19
Tabla 4. Resultados generales de temperatura máxima registrada según tipo de frenado y condición de carga	20
Tabla 5. Comparativas de temperatura máxima frenado suave, sin carga vs. con carga	21
Tabla 6. Comparativa de temperatura máxima frenado moderado, sin carga vs. con carga	22
Tabla 7 Comparativa de temperatura máxima frenado duro, sin carga vs. con carga	23
Tabla 8. Comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada según el tipo de frenado	25
Tabla 9. Estimación de la contribución del sistema de monitoreo térmico en la reducción de siniestros atribuibles al sistema de frenos	29
Tabla 10. Comparación de la contribución con estimaciones internacionales	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Sistema de Frenado de Disco.....	3
Ilustración 2. Clasificación de Vehículos	4
Ilustración 3. Sobre calentamiento de Frenos.....	6
Ilustración 4. Ruta de Pruebas.....	7
Ilustración 5. Mazda BT-50.....	8
Ilustración 6. Termocupla Tipo K para Discos de Freno.....	9
Ilustración 7. Plano de termocupla tipo K para disco de freno.....	10
Ilustración 8. Dimensiones proporcionadas por el fabricante.....	10
Ilustración 9. Módulo MAX6675.....	10
Ilustración 10. Microcontrolador ESP32	11
Ilustración 11. Pantalla Nextion 3.5 pulgadas.....	11
Ilustración12. Jumpers y Cable de Datos Tipo C.....	12
Ilustración 13. Código de Programación Registro de Datos.....	13
Ilustración 14. Código de Programación Registro de Datos.....	13
Ilustración 15 y 16. Código Prototipo.....	15

DISEÑO DE SISTEMA TÉRMICO, FÍSICO Y EXPERIMENTAL PARA EL MONITOREO INTELIGENTE DE TEMPERATURA EN DISCOS DE FRENO DE VEHÍCULOS CATEGORÍA N1

Ing. Christopher Fuertes, Adrian Bolaños, Francisco Bustamante, Pablo Freile

*Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, crifuertesit@internacional.edu.ec,
adbolanosca@uide.edu.ec , pafreilena@uide.edu.ec*

Quito – Ecuador

RESUMEN

Introducción: El sobrecalentamiento en los sistemas de frenado representa una de las principales causas de los accidentes de tránsito en el Ecuador, situación que se agrava en descensos prolongados, característicos de la geografía ecuatoriana, donde la fricción continua genera acumulación crítica de calor en el disco de freno conocido como fenómeno de fading térmico que compromete la seguridad vial, superando los límites seguros de operación de los materiales de fricción. **Metodología:** Se empleó un enfoque cuantitativo y experimental a través del desarrollo de un prototipo que integra una termocupla tipo K especializada, seleccionada por su rango de medición de -200°C a $+1000^{\circ}\text{C}$ y alta durabilidad, para registrar en tiempo real la temperatura del disco de freno durante pruebas realizadas en la ruta Av. Maldonado hasta la Loma de Puengasí, trayecto representativo por sus condiciones de pendiente exigentes; los datos obtenidos se procesan mediante un microcontrolador que activa mecanismos de alerta al superar umbrales críticos establecidos. **Resultados:** Las mediciones registraron temperaturas máximas de 65°C ; 95°C y $279,25^{\circ}\text{C}$ para frenado suave, moderado y duro sin carga respectivamente, mientras que con una carga adicional los calores se elevaron a 220°C ; 305°C y $432,75^{\circ}\text{C}$, confirmando la aparición del fenómeno de fading térmico a partir de los 300°C en condiciones de frenado con carga y validando los modelos de transferencia de calor aplicados al sistema de frenos. **Conclusión:** El prototipo demostró viabilidad técnica y económica, siendo capaz de detectar en tiempo real condiciones térmicas críticas en el sistema de frenos de vehículos categoría N1, contribuyendo a la reducción de accidentes por fallos mecánicos en rutas con condiciones geográficas exigentes.

Palabras clave: Monitoreo térmico, disco de freno, termocupla Tipo K, fading térmico, vehículos N1.

ABSTRACT

Introduction: Overheating in braking systems represents one of the main causes of traffic accidents in Ecuador, a situation that is aggravated by prolonged descents, characteristic of the Ecuadorian geography, where continuous friction generates critical accumulation of heat in the brake disc known as the thermal fading phenomenon that compromises road safety, exceeding the safe operating limits of friction materials. **Methodology:** A quantitative and experimental approach was used through the development of a prototype that integrates a specialized K-type thermocouple, selected for its measurement range from -200°C to $+1000^{\circ}\text{C}$ and high durability, to record in real time the temperature of the brake disc during tests carried out on the Av. Maldonado route to the Loma de Puengasí, a representative route due to its demanding slope conditions; the data obtained are processed by a microcontroller that activates alert mechanisms when the established critical thresholds exceed. **Results:** The measurements recorded maximum temperatures of 65°C ; 95°C and 279.25°C for soft, moderate and hard braking without load respectively, while with an additional load the heats rose to 220°C ; 305°C and 432.75°C , confirming the appearance of the thermal fading phenomenon from 300°C in braking conditions with load and validating the heat transfer models applied to the brake system. **Conclusion:** The prototype demonstrated technical and economic feasibility, being able to detect in real time critical thermal conditions in the brake system of category N1 vehicles, contributing to the reduction of accidents due to mechanical failures on routes with demanding geographical conditions.

Keywords: Thermal monitoring, brake disc, Thermocouple Type K, thermal fading, N1 vehicles.

INTRODUCCIÓN

Cuando un vehículo de carga de 3.5 toneladas circula a 100 km/h, su capacidad para detenerse a tiempo no depende del motor ni de los neumáticos, sino de un componente que, si falla, convierte tres toneladas y media de metal en un elemento incontrolable: el sistema de frenado, cuyo estándar técnico de referencia mundial, el Reglamento UNECE N.º 13-H, es la única barrera normativa entre el control absoluto y la tragedia evitable (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2023). Este reglamento establece los requisitos uniformes para la homologación de vehículos de categorías M1 y N1 en materia de frenado, ofreciendo un conjunto alternativo de requerimientos para vehículos N1. La relevancia de esta normativa en el contexto ecuatoriano es significativa, dado que el parque automotor nacional se compone mayoritariamente de vehículos que deben cumplir con estos estándares internacionales para garantizar su seguridad operativa (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2020). Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) en país, en el 2023, los vehículos livianos representan el 87% del parque automotor nacional (AEADE, 2023) y dentro de ese porcentaje, una parte importante corresponde a los vehículos de carga liviana que circulan a diario por rutas geográficamente complejas. En este escenario y en un contexto de siniestralidad alarmante, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), reportó 20 994 accidentes de tránsito durante el año 2023, mientras que solo en el primer trimestre de 2024 se registraron 4 868 más (INEC, 2024); las fallas mecánicas en el sistema de freno juegan un papel fundamental como causa frecuente en estos accidentes.

Un estudio realizado en la ciudad de Cuenca, basado en datos de la Inspección Técnica Vehicular y registros de accidentes entre 2009 y 2018, reveló que, dentro de las fallas mecánicas con potencial de influir en accidentes, el sistema de frenos representa el 65,5% de los casos, seguido del sistema de dirección con 17,2% para la subcategoría M1 (Montero et al., 2022). Esta cifra resulta particularmente significativa al considerar que el parque automotor ecuatoriano ha mostrado un crecimiento anual promedio de 6,77% en la subcategoría N1 durante el período 2013-2018 (Montero et al., 2022). A nivel internacional, en 2018 estudios de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) señalan que los sistemas de frenos defectuosos representan aproximadamente el 22% de los accidentes causados por fallas mecánicas, aproximadamente 10.000 vehículos (Haq et al., 2023) siendo uno de los problemas mecánicos más letales en las carreteras. Esta estadística se alinea con investigaciones que indican que los vehículos con frenos defectuosos tienen un

45% más de probabilidad de verse involucrados en colisiones fatales (Enimola, 2025). La situación se agrava en países con condiciones geográficas exigentes como Ecuador, donde los descensos prolongados y pendientes pronunciadas someten al sistema de frenos a un estrés térmico continuo.

Esta situación se torna preocupante especialmente en tramos como la Av. Maldonado-Loma de Puengasí, cantón Quito, provincia de Pichincha, donde las condiciones de descenso prolongado generan un uso intensivo del sistema de frenos que ha sido documentado como un punto de alta siniestralidad relacionada a fallos mecánicos (Artieda Azuero, 2024). Según el INEC (2024) los daños mecánicos en 2024 representan entre el 0.64% y el 1.34% de los siniestros. La literatura técnica especializada documenta el sobrecalentamiento en los discos de freno, conocido como *fading* térmico, como la principal amenaza en condiciones de uso prolongado del sistema (Gillespie, 2021); cuando la temperatura del material de fricción supera su rango de operación, entre 150°C y 250 para materiales orgánicos semimetálicos, el coeficiente de fricción disminuye de forma progresiva y, en consecuencia, la capacidad de frenado se reduce de manera drástica (Limpert, 2011). La transferencia de calor aplicada a sistema de frenos ha avanzado significativamente mediante simulaciones por elementos finitos, así Belhocine y Bouchetara (2012) demostraron mediante una simulación por elementos finitos que los modelos de transferencia de calor, considerando conducción, convección y radiación; permiten predecir con una precisión superior al 95% las temperaturas máximas en los componentes del sistema de frenos. .

Frente a esta problemática, este trabajo propone el diseño de un prototipo experimental para monitorear la temperatura del disco de freno en vehículos categoría N1; el sistema integra una termocupla Tipo K, seleccionada por su rango de medición de -200°C a +1000°C, con una precisión muy meticulosa, conectada a un microcontrolador que procesa los datos en tiempo real y activa alertas al superar los umbrales críticos de operación. Las pruebas experimentales se llevarán a cabo en la ruta Av. Maldonado-Loma de Puengasí, un trayecto representativo por sus condiciones de pendiente pronunciada, que ayuda a generar escenarios de uso intensivo del sistema de frenos. Los objetivos del proyecto incluyen analizar el comportamiento térmico del disco de freno bajo condiciones reales de operación, validar los modelos teóricos de transferencia de calor con mediciones experimentales y evaluar la eficacia del sistema de alerta temprana para detectar las condiciones térmicas críticas del sistema, todo ello con el propósito de contribuir a la prevención de accidentes causados por los fallos mecánicos en los frenos de vehículos categoría N1 en Ecuador.

MARCO TEÓRICO

1. Seguridad Vial y Sistemas de Frenado en el Ecuador

La Seguridad vial es una prioridad estratégica tanto a nivel mundial, como lo es en Ecuador y los sistemas de frenado son uno de los elementos más importantes para prevenir accidentes de tránsito; en el país el parque automotor ha crecido de manera sostenida en las últimas décadas, durante 2024 se vendieron 108 266 vehículos nuevos, los cuales se estima que 94 192 son vehículos livianos, SUVs y camionetas del parque automotor nacional en circulación (AEADE, 2024). Los vehículos N1 o de carga liviana aquellos cuyo peso bruto no supera las 3,5 toneladas, los cuales cuando circulan por descensos prolongados superiores al 8% someten al sistema a un frenado intensivo y continuo (Novillo, 2021). Como se mencionó, el INEC reportó 20 994 accidentes en el año 2023, con una tasa de mortalidad de 13,37 por cada 100.000 habitantes, evidenciando que las fallas mecánicas en los sistemas de frenado son una causa recurrente a los accidentes de tránsito con un impacto socioeconómico que supera los 150 millones de dólares anuales (INEC, 2024).

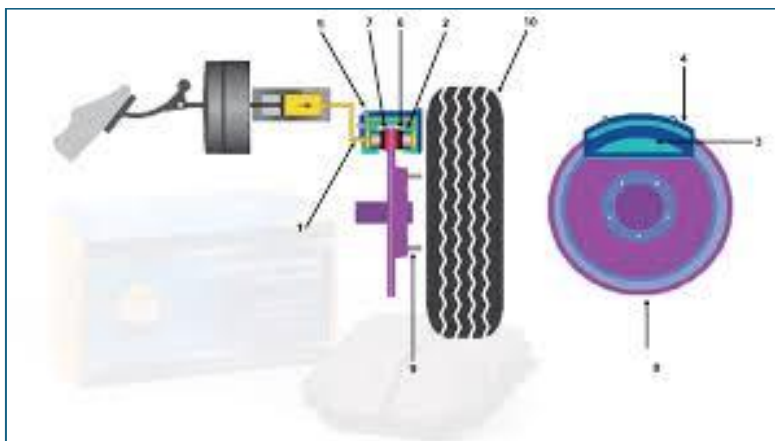


Ilustración 1. Sistema de Frenado de Disco

2. Vehículos categoría N1: Clasificación y Características

La categoría N1 abarca a los vehículos destinados al transporte de mercancías con un peso bruto máximo de 3,5 toneladas, de acuerdo con el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034 (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2018) y el Reglamento N°13 de la ONU para la homologación de vehículos categoría M,N,O en materia de frenado (United Nations Economic Commission for Europe, 2023); esta categoría incluye camionetas livianas, furgonetas y vehículos utilitarios de carga liviana, en donde su operación implican variaciones de carga y circulación en vías con pendientes pronunciadas y uso prolongado del sistema de frenos. La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2185 indica los requisitos para los materiales de fricción usados en el sistema de frenos, mientras que el RTE INEN 053

regula obligatoriamente la certificación de estos materiales para los automotores comercializados en Ecuador, asegurando los estándares de seguridad en sus componentes (INEN, 2020).



Ilustración 2. *Clasificación de Vehículos*

3. Principios físicos del Sistema de Frenos de Disco

El sistema de frenos de disco es el mecanismo que predomina en vehículos categoría N1 , convierte la energía cinética en energía térmica mediante la fricción (García-León, 2017) (Limpert, 2011), sus componentes principales son el disco de freno, las pastillas de fricción, la pinza hidráulica, el cilindro maestro y líneas hidráulicas fricción (García-León, 2017); (Limpert, 2011); la energía disipada durante el frenado se expresa mediante el balance energético (Ecuación 1) donde la energía térmica generada (Q) corresponde a la diferencia entre la energía cinética inicial y final del vehículo (Gillespie, 2021; Limpert, 2011)

3.1. Ecuación 1: Balance Energético en Frenado

$$Q = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2$$

Donde

Q = energía térmica generada (J),

m = masa del vehículo (Kg),

v₁ = velocidad inicial (m/s)

v₂ = velocidad final (m/s)

El incremento de la temperatura resultante en el disco se calcula mediante la ecuación de transferencia de calor (Ecuación 2), que relaciona la energía térmica generada con la masa del componente y el calor específico del material (García-León, 2017); (Limpert, 2011):

3.2. Ecuación 2: Incremento de Temperatura por Fricción

$$\Delta T = Q/m_{freno} \times C_{específico}$$

Donde

ΔT = incremento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$),

m_{freno} = masa del componente de freno (Kg) y

$C_{\text{especifico}}$ = calor específico del material ($\text{J/kg} \times ^{\circ}\text{C}$)

Según Limpert (2011, p. 248), los discos de freno absorben cerca del 70% de la energía cinética generada durante el movimiento del vehículo y cuando tienen geometría ventilada favorece la disipación de calor por convección forzada (García-León, 2017); (Belhocine y Bouchetara, 2012).

4. Transferencia de calor en el disco de freno

El comportamiento térmico del disco involucra tres mecanismos: conducción, convección y radiación (Belhocine & Bouchetara, 2012); (Incropera et al., 2007). La convección es el mecanismo dominante y se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 3), donde el flujo de calor por convección depende del coeficiente de transferencia, el área superficial y la diferencia de temperatura entre la superficie y el ambiente (Incropera et al., 2007):

4.1. Ecuación 3: Transferencia de Calor por Convección

$$Q_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}})$$

Donde:

Q_{conv} = flujo de calor por convección (W)

h = coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

A = área superficial de transferencia (m^2)

$T_{\text{superficie}}$ = temperatura de la superficie del disco ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ambiente} = temperatura del aire ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

La radiación es relevante por encima de los 300°C (Limpert, 2011, p. 250). Se ha documentado que incrementos superiores a 200°C reducen significativamente la eficiencia de frenado, aumentando las distancias de frenado a niveles de riesgo (Limpert, 2011). Los modelos que integran los tres mecanismos de transferencia de calor permiten predecir con alta precisión las temperaturas máximas de los componentes (Choi & Lee, 2012).

Adicionalmente, estudios mediante simulación por elementos finitos demuestran que, al ajustar la geometría del disco, específicamente implementando geometría ventilada, se favorece la disipación de calor por convección forzada, mejorando la eficiencia térmica del sistema (García-León, 2017). En ensayos de banco, estos modelos han mostrado una buena

correlación con los datos experimentales, reportándose errores relativos inferiores al 10% (Adamowicz & Grzes, 2011).

5. Fading Térmico

El fading térmico es la pérdida progresiva de la eficacia de frenado causada por el sobrecalentamiento de los materiales de fricción, reduciendo el coeficiente de fricción y con ello la fuerza de frenado disponible (Limpert, 2011). La norma ISO 26867:2009 regula el proceso de ensayo para evaluar la influencia de la presión, temperatura y velocidad sobre el coeficiente de fricción, determinando la temperatura como parámetro de control (International Organization for Standardization, 2009) (López Naranjo & Paucar Paredes, 2013). Los materiales orgánicos semimetálicos (predominantes en vehículos N1) operan normalmente entre 150°C y 250°C, con una temperatura crítica de fading entre 300°C y 350°C y máximo seguro de 400°C; los materiales cerámicos toleran hasta 600°C y los compuestos de carbono hasta 900°C (Limpert, 2011).



Ilustración 3. Sobrecalentamiento de Frenos

6. Sensores de Temperatura para Aplicaciones Automotrices

La termocupla Tipo K formada por Chromel y Alumel es la más utilizada en aplicaciones automotrices, con un rango de -200°C a +1000°C, precisión de $\pm 2,5^\circ\text{C}$, tiempo de respuesta de 100 a 300 ms y buena durabilidad en condiciones exigentes (López Naranjo & Paucar Paredes, 2013). Estos sistemas permiten detectar con anticipación la degradación térmica que pone en riesgo la seguridad del vehículo.

7. Sistemas Inteligentes de Monitoreo Térmico y Marco Normativo

Los sistemas de monitoreo térmico integran sensores, microcontroladores y comunicación inalámbrica para adquirir, procesar y transmitir datos en tiempo real (López Naranjo & Paucar Paredes, 2013). El prototipo se direcciona normativamente en la ISO 26867:2009 (ISO, 2009), la SAE J2522 (SAE International, 2020), el RTE INEN 053 y la NTE INEN 2185 (INEN, 2020), normas que en conjunto ayudan con el marco regulatorio de referencia para la selección y evaluación de los componentes del sistema de freno en vehículos categoría N1.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental, dado que se obtendrá, medirá y analizará datos numéricos relacionados con la temperatura generada en el disco delantero izquierdo de un vehículo categoría N1 durante condiciones reales de operación; este enfoque permitirá registrar valores térmicos específicos mediante sensores electrónicos, facilitando el análisis del comportamiento térmico del sistema de freno, a través de diferentes condiciones de frenado, el método experimental se enfoca en la implementación y evaluación de un prototipo de monitoreo térmico que será instalado directamente en un vehículo en circulación, con la finalidad de analizar el fenómeno de fading térmico y validar la capacidad del sistema para identificar temperaturas críticas mediante alertas en tiempo real; la implementación del prototipo tendrá un alcance orientado a la comprobación y validación del sistema inteligente de monitoreo térmico para contribuir a la prevención de fallos mecánicos en vehículos de carga liviana categoría N1.

1. Ruta de Pruebas

Las pruebas experimentales se realizarán en la ruta comprendida desde la Av. Morán Valverde (Centro Comercial Quicentro sur) hasta la entrada a la Loma de Puengasí, en la ciudad de Quito. Esta ruta fue seleccionada por presentar condiciones de pendiente pronunciada y frenado continuo que representan un escenario adecuado y representativo para evaluar el comportamiento térmico del sistema de frenos en condiciones reales de operación; esta ruta ha sido documentada técnicamente como uno de los tramos de mayor siniestralidad vial asociada a los fallos en el sistema de frenado dentro del DMQ, lo que refuerza su uso como ruta de prueba (Artieda Azuero, 2024).

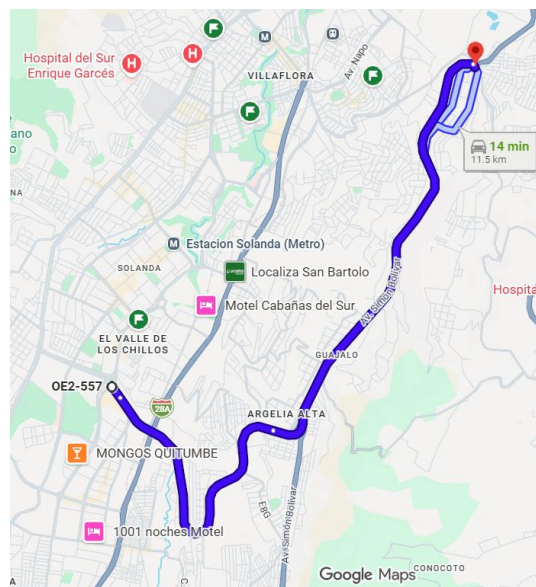


Ilustración 4. Ruta de Pruebas

2. Normativas de Referencias

El desarrollo del prototipo y la realización de pruebas se sustentarán en base a las siguientes normativas técnicas:

ISO 26867:2009 establece el procedimiento de ensayo para evaluar la influencia de la presión, temperatura y velocidad lineal del coeficiente de fricción de los materiales de frenado, siendo la referencia principal para determinar los umbrales críticos de temperatura a usar en el sistema de alerta del prototipo (International Organization for Standardization, 2009).

SAE J2522: Define el procedimiento de ensayo de rendimiento de fricción de pastillas de freno, conocido como AK Master Test, referenciará el comportamiento de los materiales de fricción bajo condiciones controladas de temperatura y fricción (Limpert, 2011).

NTE INEN 2185: Establece los requisitos técnicos que deben cumplir los materiales de fricción usados en los sistemas de frenos en los vehículos comercializados en el Ecuador (INEN, 2020).

RTE INEN 053: Obliga los requisitos de seguridad para los materiales de fricción de frenos en los vehículos que circulan en el Ecuador, garantizando que los componentes del sistema de frenos del vehículo de pruebas cumplan con los estándares mínimos de seguridad establecidos por la normativa.

3. Materiales

3.1. Vehículo de Pruebas

Se utilizará una camioneta Mazda BT-50 doble cabina del año 2014, este vehículo fue seleccionado para representar un modelo ampliamente utilizado en el transporte de carga liviano dentro del Ecuador; además según la (AEADE, 2014), la Mazda BT-50 del año 2014 fue la segunda camioneta más vendida en el país, con 6.440 unidades vendidas.

Sus especificaciones son las siguientes:



Ilustración 5. Mazda BT-50

- Marca: Mazda
- Modelo: BT-50
- Año: 2014
- Tracción: 4x2
- Combustible: Gasolina
- Sistema de frenos: Discos ventilados delanteros

3.2. Termocupla Tipo K

Para la medición de la temperatura se utilizará una termocupla Tipo K, fabricada con una unión bimetálica de Chromel y Alumel, seleccionada por su amplio rango de operación, rapidez de respuesta y resistencia a condiciones térmicas extremas; este sensor presenta un rango de operación de -200°C a $+1000^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ y un tiempo de respuesta entre 100 y 300 ms, características que lo hacen apropiado para el monitoreo térmico, donde se requiere alta durabilidad a vibraciones y temperaturas, la termocupla será instalada rozando el disco de frenos para captar la variación térmica que se producirá durante las frenadas continuas en el trayecto de la ruta experimental.

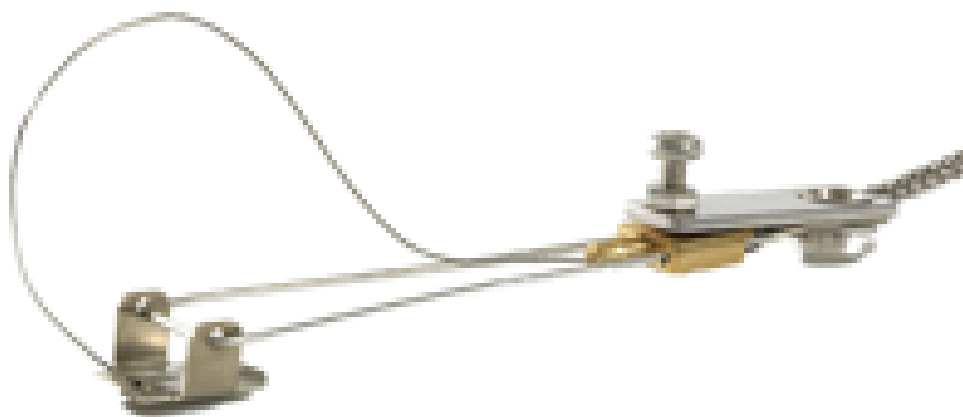


Ilustración 6. *Termocupla Tipo K para Discos de Freno*

3.4.ESP32 de 38 Pines

El procesamiento central se realizara con un microprocesador ESP32 debido a su alta capacidad de procesamiento y compatibilidad con los módulos del sistema, opera con una frecuencia de 240 MHz con un voltaje de 3,3 V; cuenta con múltiples entradas y salidas GPIO, compatible con protocolos SPI Y UART y presenta bajo consumo energético, el ESP32 será programado para adquirir continuamente los valores de temperatura provenientes del módulo MAX6675 y transmitirlos a la pantalla que alertara cuando la temperatura supere los umbrales críticos establecidos para el sistema de frenos.



Ilustración 10. *Microcontrolador ESP32*

3.5.Pantalla Nextion NX4832T035

La visualización de datos en tiempo real se realizaran mediante una pantalla inteligente Nextion, usada como interfaz HMI para mostrar la temperatura registrada en el disco de freno y las alertas térmicas generadas por el sistema durante la conducción del vehículo, opera mediante una alimentación de 5v, cuenta con una interfaz gráfica programable, se comunica mediante protocolo UART y es compatible con ESP32, permitiendo mostrar de manera dinámica la información térmica durante la conducción en tiempo real.



Ilustración 11. *Pantalla Nextion 3.5 pulgadas*

3.6. Jumpers M-H, H-H y Cable de Datos Tipo C



Ilustración12. Jumpers y Cable de Datos Tipo C

4. Programa para Recolección de Datos

Con la finalidad de poder recopilar los datos en tiempo real al momento de realizar las pruebas en la ruta, se desarrolló un código en el programa Phyton que permita registrar las temperaturas con su respectiva fecha y hora.

Primero Phyton crea una comunicación serial con el ESP32 mediante el puerto COM3 utilizando la instrucción `serial.Serial('COM3', 115200, timeout=1)`; para que posteriormente el programa pueda crear automáticamente un archivo Excel utilizando la librería `openpyxl`, donde se genera una hoja llamada “Temperatura MAX6675” con los encabezados de fecha, hora y temperatura; cuando este se inicia, entra en el ciclo `while True`, donde lee continuamente las líneas enviadas por el ESP32, normalmente datos de temperatura provenientes del sensor MAX6675, cuando recibe una lectura, el código verifica si la línea contiene el texto `"Temp:"`; en caso de existir, utiliza `replace()` para eliminarlo y quedarse únicamente con el valor numérico de la temperatura, después obtiene la fecha y hora actual mediante `datetime.now().strftime()` y guarda toda la información en una nueva fila dentro del archivo Excel usando `ws.append()`, después de cada registro, el archivo se actualiza automáticamente con `wb.save("temperatura_max6675.xlsx")` para evitar pérdida de datos, el proceso continúa indefinidamente hasta que el usuario presiona la combinación de teclas `Ctrl + C`, lo que activa `KeyboardInterrupt`, permitiendo finalizar correctamente el programa, guardar el archivo y cerrar la comunicación serial mediante `esp32.close()`.

```

1 import serial
2 import openpyxl
3 from datetime import datetime
4
5 # =====
6 # CONFIGURAR PUERTO DEL ESP32
7 # =====
8 esp32 = serial.Serial('COM3', 115200, timeout=1)
9
10
11 # =====
12 # CREAR ARCHIVO EXCEL
13 # =====
14 wb = openpyxl.Workbook()
15 ws = wb.active
16 ws.title = "Temperatura MAX6675"
17
18 # =====
19 # ENCABEZADOS
20 # =====
21 encabezados = ["Fecha", "Hora", "Temperatura °C"]
22 ws.append(encabezados)
23
24 print("📝 Registrando temperatura... (Ctrl + C para detener)")
25
26 try:
27     while True:
28
29         # Leer línea enviada por ESP32
30         linea = esp32.readline().decode().strip()
31
32         # Ignorar líneas vacías
33         if not linea:
34             continue
35
36         print(linea)
37

```

Ilustración 13. Código de Programación Registro de Datos

```

37
38 # =====
39 # EXTRAER TEMPERATURA
40 # =====
41
42 # Si Arduino envía: Temp: 245.3
43 if "Temp:" in linea:
44     temperatura = linea.replace("Temp:", "").strip()
45
46 else:
47     temperatura = linea
48
49 # =====
50 # FECHA Y HORA
51 # =====
52 fecha = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d")
53 hora = datetime.now().strftime("%H:%M:%S")
54
55 # =====
56 # GUARDAR EN EXCEL
57 # =====
58 ws.append([fecha, hora, temperatura])
59
60 # Guardar automáticamente
61 wb.save("temperatura_max6675.xlsx")
62
63 except KeyboardInterrupt:
64
65     print("\n✅ Registro finalizado")
66     print("📁 Archivo guardado como: temperatura_max6675.xlsx")
67
68     esp32.close()

```

Ilustración 14. Código de Programación Registro de Datos

5. Programación del Prototipo y Comunicación con la Pantalla Nextion

El prototipo tiene como función principal medir la temperatura mediante una termocupla tipo K conectada al módulo MAX6675 que envían información al ESP32 y así mostrar la información en tiempo real en la pantalla Nextion NX4832T035; para su funcionamiento en ARDUINO IDE se incluyen las librerías *SPI.h* y *max6675.h*, necesarias para la comunicación con el módulo MAX6675 y la lectura de la termocupla tipo K, posteriormente se configuran los pines *thermoDO*, *thermoCS* y *thermoCLK*, que permiten la comunicación entre el ESP32 y el módulo, además se inicia la comunicación serial con la pantalla Nextion mediante *HardwareSerial nextion(2)* utilizando los pines *RXD2* y *TXD2*, dentro de *setup()*, el sistema inicia la comunicación serial, muestra el mensaje “Sistema iniciado” en el monitor serial y configura el estado inicial de la pantalla enviando comandos mediante la función *enviarNextion()*, la cual transmite instrucciones hacia la Nextion acompañadas de los tres bytes *0xFF* requeridos por el protocolo de comunicación, en este estado inicial se muestran los mensajes “INICIANDO...” y “ESPERE” con color verde.

Posteriormente, el programa entra en el ciclo *loop()*, donde realiza continuamente la lectura de temperatura mediante *thermocouple.readCelsius()*, si la termocupla presenta un error o no se encuentra conectado, la función *isnan(temperatura)* detecta el problema y automáticamente la pantalla cambia al estado de error, mostrando los mensajes “ERROR” y “SIN SENSOR” en color rojo; si la lectura es válida, el sistema compara la temperatura actual con *tempAnterior* para actualizar únicamente cuando exista un cambio, evitando enviar información repetitiva a la pantalla, a temperatura se convierte en texto usando *String(temperatura, 1)* y luego se envía a los objetos *t0* y *n0* de la interfaz Nextion para mostrar tanto el valor decimal como el entero.

Después de actualizar la lectura, el programa determina el estado de funcionamiento utilizando rangos de temperatura, cuando la temperatura es menor o igual a 120 °C, el sistema entra en estado “OPERATIVO”, mostrando color verde y la imagen correspondiente mediante *p0.pic=0*; si la temperatura se encuentra entre 121 °C y 240 °C, el sistema cambia al estado “PRECAUCION”, utilizando color amarillo y la imagen *p0.pic=1* y finalmente, si la temperatura es mayor o igual a 241 °C, el sistema activa el estado “PELIGRO”, mostrando color rojo y la imagen *p0.pic=2*, cada cambio de estado también se refleja en el monitor serial mediante *Serial.println()*, todo este proceso se ejecuta continuamente dentro del *loop()*, permitiendo supervisar en tiempo real la temperatura y el estado del sistema mediante la pantalla Nextion.

```

1  #include <SPI.h>
2  #include <max6675.h>
3
4  // =====
5  // MAX6675
6  // =====
7
8  int thermoDO = 19;
9  int thermoCS = 5;
10 int thermoCLK = 18;
11
12 MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
13
14 // =====
15 // NEXTION
16 // =====
17
18 #define RXD2 16
19 #define TXD2 17
20
21 HardwareSerial nextion(2);
22
23 // =====
24 // VARIABLES
25 // =====
26
27 float temperatura;
28 float tempAnterior = -999;
29
30 int estadoActual = -1;
31
32 // =====
33 // FUNCION NEXTION
34 // =====
35
36 void enviarNextion(String comando)
37 {
38     nextion.print(comando);
39
40     nextion.write(0xFF);
41     nextion.write(0xFF);
42     nextion.write(0xFF);
43 }
44
45 // =====
46 // SETUP
47 // =====
48
49 void setup()
50 {
51     Serial.begin(115200);
52
53     nextion.begin(9600, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
54
55     Serial.println("Sistema iniciado");
56
57     // =====
58     // ESTADO INICIAL
59     // =====
60
61     enviarNextion("p0.pic=0");
62
63     enviarNextion("t0.txt=\"INICIANDO...\"");
64     enviarNextion("t1.txt=\"ESPERE\"");
65
66     // COLOR VERDE
67     enviarNextion("t0.pco=2016");
68     enviarNextion("t1.pco=2016");
69
70     delay(500);

```

Ilustración 15 y 16. Código Prototipo

6. Interfaz Nextion

El diseño de la interfaz gráfica de la pantalla NEXTION4832T035 se realizaron mediante el software Nextion Editor, donde se desarrolló una interfaz destinada al monitoreo de temperatura en tiempo real del disco de freno, dentro del diseño se configuraron elementos gráficos como cuadros de texto, imágenes e indicadores visuales, permitiendo mostrar de forma clara el estado del sistema, además se establecieron rangos de funcionamiento asociados a colores específicos para facilitar la interpretación de las condiciones térmicas, el color verde corresponde al estado “OPERATIVO” para temperaturas normales, el color amarillo para “PRECAUCIÓN”, cuando la temperatura supera el límite establecido se indica con color rojo el estado de “PELIGRO” al superar el límite establecido; la pantalla recibe continuamente los datos enviados desde el ESP32 mediante la comunicación serial, procesando la información de temperatura para actualizar tanto los valores numéricos, como los cambios de color, permitiendo el funcionamiento eficiente del sistema.

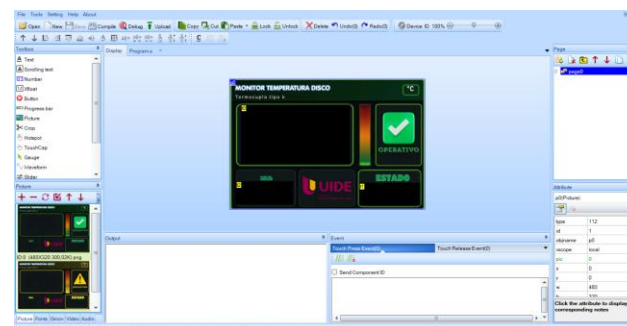


Ilustración 17. Creación de interfaz gráfica en NEXTION EDITOR

7. Parámetros del Sistema de Alerta Temprana

El sistema de alerta temprana del prototipo opera a través de tres estados térmicos definidos, programados en el ESP32; los umbrales críticos fueron establecidos en base a los rangos operativos de los materiales de fricción semimetálicos predominantes en vehículos categoría N1, referenciados en la norma ISO 26867:2009 y (Limpert, 2011).

La siguiente tabla especifica los parámetros de funcionamiento del sistema:

Tabla 1.

Parámetros del sistema de alerta temprana-Prototipo de monitoreo térmico

Estado	Rango de Temperatura	Color de Alerta	Indicaciones por considerar
OPERATIVO	$\leq 120^{\circ}\text{C}$	Verde	Sistema dentro de los parámetros normales de operación
PRECAUCIÓN	$121^{\circ}\text{C} - 240^{\circ}\text{C}$	Amarillo	Acumulación térmica moderada, reducir la intensidad de frenado
PELIGRO	$\geq 241^{\circ}\text{C}$	Rojo	Temperatura crítica, riesgo de fading térmico y pérdida de eficacia de frenado

Fuente: Elaboración propia

Estos umbrales fueron definidos considerando que los materiales semimetálicos operan normalmente entre 150° y 250° , con una temperatura crítica de fading entre 300°C y 350°C (Limpert, 2011). El estado PRECUCIÓN se activa por debajo del umbral de fading para permitir una advertencia anticipada al conductor, mientras que el estado PELIGRO se activa a partir de los 241°C , coincidiendo con el rango en el cual la degradación del coeficiente de fricción comienza a ser significativa.

8. Flujograma de Funcionamiento del Prototipo Experimental

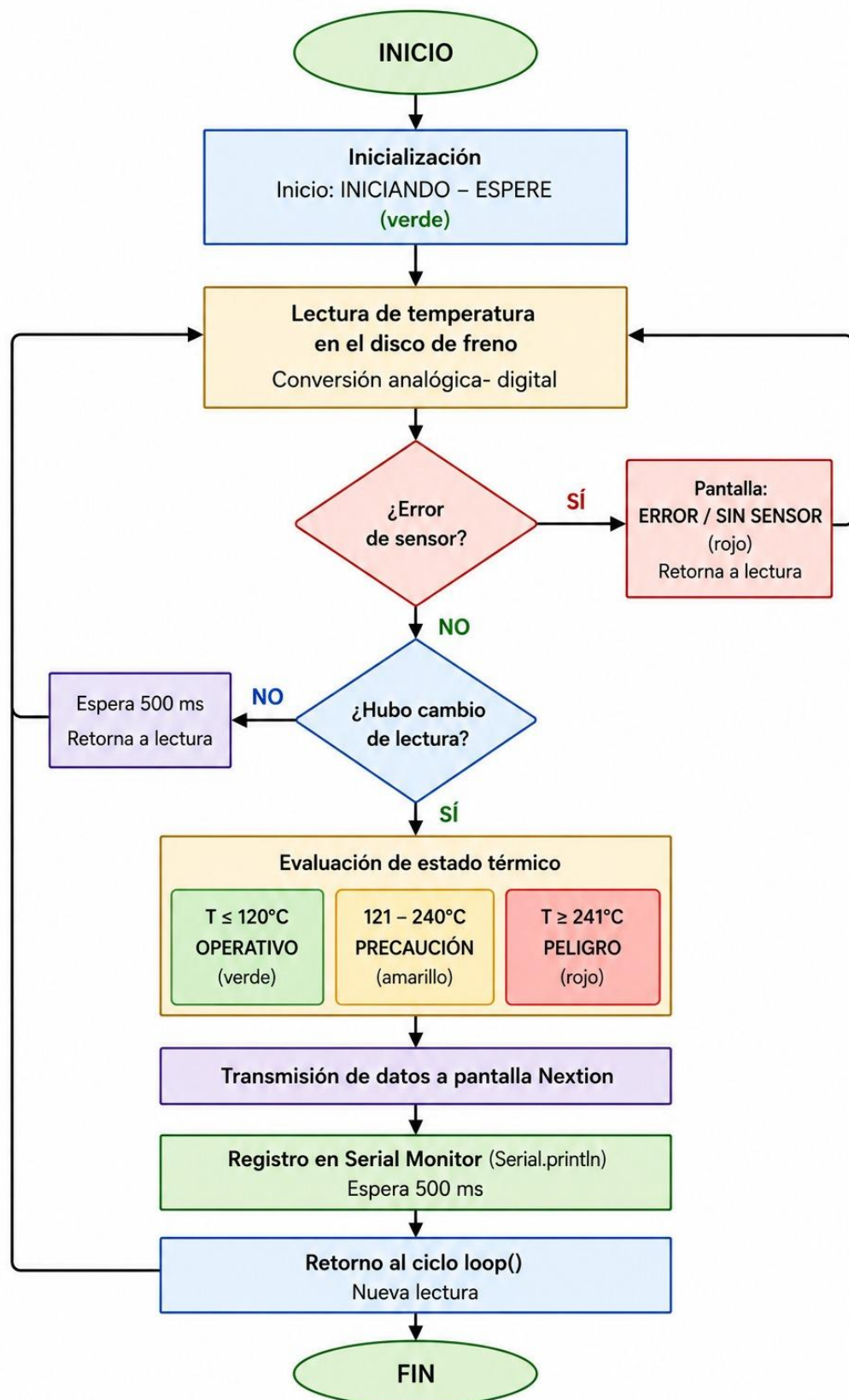


Ilustración 18. Flujograma de funcionamiento del prototipo experimental para monitoreo de temperatura en el disco de frenos

9. Clasificación del Tipo de Frenado Aplicado en las Pruebas Experimentales

Tabla 2.

Criterios para la clasificación del tipo de frenado aplicado en las pruebas experimentales con referencia a SAE J2522

Tipo de Frenado	Velocidad Inicial	Velocidad Final	Descripción del criterio
Suave	≈ 50 km/h	≈ 35 km/h	Presión leve sobre el pedal de freno; desaceleración gradual sin detenerse completamente.
Moderado	≈ 70 km/h	≈ 45 km/h	Presión media sobre el pedal; desaceleración notoria sin frenada de emergencia, similar a condiciones de descenso en pendiente controlada.
Duro	≈ 90 km/h	≈ 30 km/h	Presión alta y sostenida sobre el pedal; desaceleración brusca y rápida, simula situaciones de frenado de emergencia o descenso pronunciado con carga.

Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar que en ninguna de las pruebas se llevara a cabo una frenada completa sino reducciones parciales de velocidad, relacionadas con las condiciones reales de frenada en descenso, donde el conductor usa el freno de manera intermitente para controlar el frenado en pendientes.

10. Estimación de la Contribución del Prototipo a la Reducción de Siniestros

Con el propósito de dimensionar el impacto potencial del prototipo desarrollado se ha realizado una estimación de la contribución que este sistema podría tener en la reducción de la siniestralidad y por lo tanto de fallecidos y lesionados atribuible a fallos del sistema de frenos, para de esta manera cumplir con el objetivo general de la investigación. Esta estimación se fundamenta en el cruce de la incidencia de daños mecánicos en accidentes en Ecuador según el INEC (2025) con la proporción de fallas de frenos dentro de los daños mecánicos total documentada por Montero et al., (2022) del 65%.

Los datos de siniestralidad en Ecuador, INEC (2025) reportó un total de 20.346 accidentes de tránsito durante el año 2025. El rango que se utilizará para medir la contribución será del 0,63% al 1,23, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Daños mecánicos, valores absolutos y porcentajes 2024

Trimestre	Total nacional	Daños mecánicos (absoluto)	Daños mecánicos (%)
I	4.759	30	0,63%
II	4.939	53	1,07%
III	5.378	66	1,23%
IV	5.270	56	1,06%
TOTAL	20.346	205	1,01%

Fuente: INEC (2025) elaboración propia

El cálculo de los fallecidos y lesionados prevenibles se realiza con base en los datos del INEC con las siguientes fórmulas:

$$Tasa\ fallecidos\ por\ siniestros = \frac{Total\ fallecidos}{Total\ siniestros} = \frac{2.354}{20.354} \approx 0.1157$$

En 2025, la tasa de fallecidos fue de aproximadamente 11.57 por cada 100 siniestros.. Además, se evitarían las lesiones graves de cientos de personas que ocupan camas hospitalarias estimado con la fórmula:

$$Tasa\ lesionados\ por\ siniestros = \frac{Total\ lesionados}{Total\ siniestros} = \frac{17.932}{20.354} \approx 0.8813$$

En promedio, por cada siniestro ocurrido en 2025, resultaron lesionadas 0,8813 personas, en otras palabras la tasa de lesionados por siniestro fue de aproximadamente de 88,13 por cada 100 accidentes.

Si con el prototipo se logran prevenir menos de 205 siniestros, se estarían salvando vidas al año y previniendo lesionados por accidentes de tránsito, de esta manera se presenta la contribución del proyecto de manera cuantitativa y objetiva

$$Fallecidos\ evitados = Siniestros\ prevenibles \times tasa\ de\ fallecidos\ por\ siniestro$$

$$Lesidos\ evitados = Siniestros\ prevenibles \times tasa\ de\ lesionados\ por\ siniestro$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos, nos han permitido identificar una relación directa entre la intensidad de frenado, la presencia de carga vehicular y el incremento de la temperatura en los discos de freno en la camioneta usada; a medida que aumentó la exigencia mecánica del sistema, también se incrementó la acumulación térmica generada por la fricción entre las pastillas de freno y el disco.

En las pruebas realizadas sin carga, el frenado suave representó una temperatura máxima de 65,50°C, lo que lo mantiene dentro de un rango térmico bajo y estable; por otro lado, durante el frenado moderado, la temperatura aumentó hasta 95 °C, evidenciando una mayor acumulación de energía térmica producto del incremento en la fuerza de frenado que se aplicó y por otra parte, en el frenado duro alcanzó una temperatura máxima de 278,25 °C, lo que ha demostrado una acumulación considerable de calor en el sistema de frenos.

1. Resultados Generales de Temperaturas Máximas Registradas

Tabla 4.

Resultados generales de temperatura máxima registrada según tipo de frenado y condición de carga

Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)	Nivel térmico alcanzado	Comportamiento observado	Interpretación técnica
Sin carga	Suave	65,5	Bajo	Incremento térmico estable y controlado	El sistema de frenos operó dentro de parámetros normales, manteniendo una adecuada disipación de calor y sin riesgo de sobrecalentamiento.
Sin carga	Moderado	95	Moderado	Mayor acumulación térmica debido al incremento de fricción	El aumento de temperatura se relaciona con una mayor exigencia mecánica del sistema durante el proceso de frenado.
Sin carga	Duro	278,25	Alto	Elevada generación de calor durante frenadas bruscas	El sistema alcanzó temperaturas cercanas a rangos críticos, evidenciando una importante acumulación térmica en el disco de freno.
Con carga (+ 450 kg al balde)	Suave	220,75	Alto	Incremento considerable de temperatura aun con frenado leve	La carga vehicular aumentó significativamente la energía térmica generada por el sistema de frenos.

Con carga (+ 450 kg al balde)	Moderado	305	Crítico	Acumulación acelerada y sostenida de calor	El sistema alcanzó temperaturas asociadas al inicio del fenómeno de fading térmico en materiales de fricción semimetálicos.
Con carga (+ 450 kg al balde)	Duro	432,75	Extremadamente crítico	Máximo sobrecalentamiento registrado durante las pruebas	Se evidenció una condición severa de sobrecalentamiento que puede comprometer la capacidad de frenado y la seguridad del vehículo.

Fuente: Elaboración propia

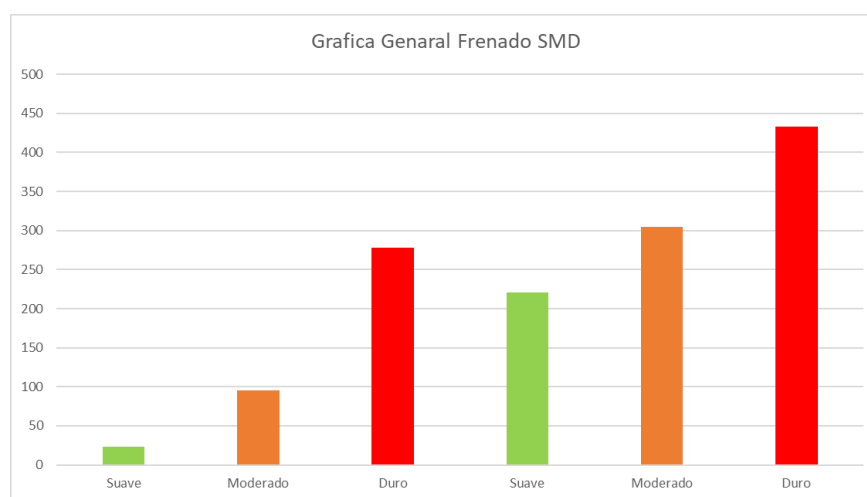


Ilustración 19. Gráfica General comparativa con SIN Carga/ CON carga

2. Comparativas Individuales

2.1. Frenado Suave

Cuando el vehículo operó con carga, las temperaturas que se registraron fueron significativamente superiores respecto a las pruebas que se realizaron sin carga, debido a que en el frenado suave se alcanzaron 220 °C, lo que evidencia un aumento de temperatura debido al aumento de masa vehicular, ya que, incrementa la energía cinética que debe disiparse mediante fricción.

Tabla 5.

Comparativas de temperatura máxima frenado suave, sin carga vs. con carga

Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)	Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)
Sin carga	Suave	65,5	Con carga	Suave	220,75
	Moderado			Duro	
	Duro			Moderado	

Fuente: Elaboración propia

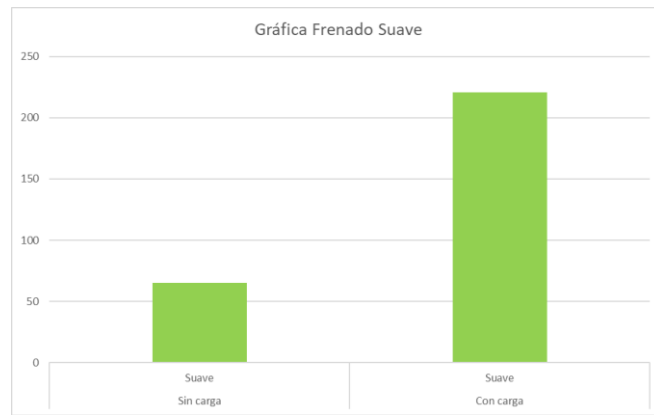


Ilustración 20. Comparativa Frenado Suave

2.2.Frenado Moderado

En las pruebas de frenado moderado con carga se registró una temperatura máxima de 305 °C; este valor es el inicio del fenómeno conocido como Fading térmico; bajo estas condiciones, los materiales de fricción empiezan a perder progresivamente eficiencia debido a que se sobrecalientan.

Tabla 6.

Comparativa de temperatura máxima frenado moderado, sin carga vs. con carga

Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)	Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)
Sin carga	Moderado	95	Con carga	Moderado	305
	Suave			Suave	
	Duro			Duro	

Fuente: Elaboración propia

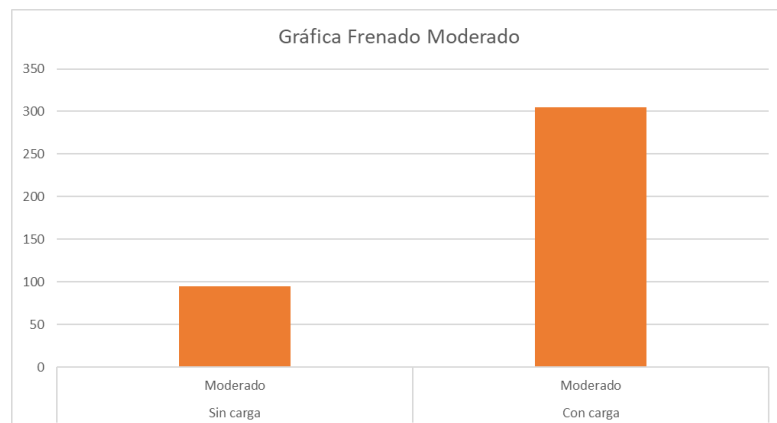


Ilustración 21. Comparativa Frenado Moderado

2.3. Frenado Duro

La condición más crítica del estudio correspondió al frenado duro con carga, donde se registró una temperatura máxima de 432 °C, este valor representa un estado extremo de sobrecalentamiento de frenos y demuestra la posibilidad de pérdida de capacidad de frenado.

Tabla 7

Comparativa de temperatura máxima frenado duro, sin carga vs. con carga

Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)
Sin carga	Duro	278,25
	Moderado	
	Suave	

Condición del vehículo	Tipo de frenado	Temperatura máxima registrada (°C)
Con carga	Duro	432,75
	Moderado	
	Suave	

Fuente: Elaboración propia

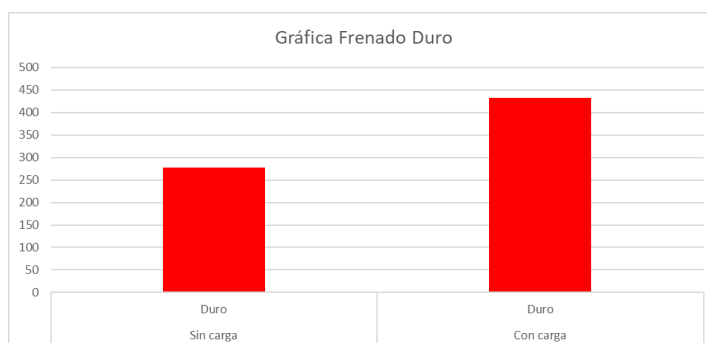


Ilustración 22. *Comparativa Frenado Duro*

Los resultados que se obtuvieron validan los principios de transferencia de calor aplicados en el sistema de frenado automotriz, lo que evidencia la importancia de sistemas inteligentes de monitoreo térmico para que se puedan prevenir accidentes en vehículos, especialmente en vehículos categoría N1 y en rutas con pendientes muy pronunciadas o de frenado continuo.

3. Cálculos Teóricos y Comparación con los Resultados Experimentales

Para realizar los cálculos teóricos para cada condición de prueba, aplicamos las Ecuaciones 1 y 2 del marco teórico, para ello se ocuparon los siguientes datos:

3.1. Datos Utilizados para los Cálculos

- Masa del vehículo sin carga (mv): 1.650 kg
- Masa del vehículo con carga (mvc): $1.650 + 450 = 2.100$ kg
- Masa del disco de freno (m freno): 8 kg
- Calor específico del material (C específico): 460 J/(kg·°C)

- Temperatura inicial / ambiental (T0): 23°C
- Factor de distribución de frenado delantero: 70% (los frenos delanteros absorben aproximadamente el 70% de la energía cinética total)
- Factor por disco individual (1 de 2 discos delanteros): 50%
- Factor combinado aplicado al disco izquierdo monitoreado: $0,70 \times 0,50 = 0,35$

3.2. Velocidades de Prueba

- Frenado suave: 50 km/h a 35 km/h (13,89 m/s a 9,72 m/s)
- Frenado moderado: 70 km/h a 45 km/h (19,44 m/s a 12,50 m/s)
- Frenado duro: 90 km/h a 30 km/h (25,00 m/s a 8,33 m/s)

3.3. Cálculos sin Carga ($m = 1.650 \text{ kg}$)

Frenado Suave (50 km/h a 35 km/h):

Ecuación 1: Balance energético

$$Q = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (13,89^2 - 9,72^2)$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (192,93 - 94,48)$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times 98,45 = 81.221 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 81.221 \times 0,35 = 28.427 \text{ J}$$

Ecuación 2: Incremento de temperatura:

$$\Delta T = Q_{\text{disco}} / m_{\text{freno}} \times C_{\text{específico}}$$

$$\Delta T = 28.427 / (8 \times 460) = 28.427 / 3.680 = 7,72^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = T_0 + \Delta T = 23 + 7,72 = 30,72^\circ\text{C}$$

Frenado Moderado (70 km/h a 45 km/h):

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (19,44^2 - 12,50^2)$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (377,91 - 156,25) = \frac{1}{2} \times 1.650 \times 221,66 = 182.870 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 182.870 \times 0,35 = \mathbf{64.004 \text{ J}}$$

$$\Delta T = 64.004 / 3.680 = 17,39^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = 23 + 17,39 = 40,39^\circ\text{C}$$

Frenado Duro (90 km/h a 30 km/h):

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (25^2 - 8,33^2)$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 1.650 \times (625 - 69,39) = \frac{1}{2} \times 1.650 \times 555,61 = 458.378 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 458.378 \times 0,35 = 160.432 \text{ J}$$

$$\Delta T = 160.432 / 3.680 = 43,59^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = 23 + 43,59 = 66,59^{\circ}\text{C}$$

3.4. Cálculos con Carga ($m = 2.100 \text{ kg}$)

Frenado Suave (50 km/h a 35 km/h):

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 2.100 \times 98,45 = 103.373 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 103.373 \times 0,35 = 36.180 \text{ J}$$

$$\Delta T = 36.180 / 3.680 = 9,83^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = 23 + 9,83 = 32,83^{\circ}\text{C}$$

Frenado Moderado (70 km/h a 45 km/h):

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 2.100 \times 221,66 = 232.743 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 232.743 \times 0,35 = 81.460 \text{ J}$$

$$\Delta T = 81.460 / 3.680 = 22,13^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = 23 + 22,13 = 45,13^{\circ}\text{C}$$

Frenado Duro (90 km/h a 30 km/h):

$$Q_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times 2.100 \times 555,61 = 583.391 \text{ J}$$

$$Q_{\text{disco}} = 583.391 \times 0,35 = 204.187 \text{ J}$$

$$\Delta T = 204.187 / 3.680 = 55,48^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{teórica}} = 23 + 55,48 = 78,48^{\circ}\text{C}$$

3.5. Tabla comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada

Tabla 8.

Comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada según el tipo de frenado

Condición	Frenado	Q Total (J)	Q Disco (J)	ΔT Teórico ($^{\circ}\text{C}$)	T Teórica ($^{\circ}\text{C}$)	T Experimental ($^{\circ}\text{C}$)	Diferencia ($^{\circ}\text{C}$)
Sin carga	Suave	81.221	28.427	7,72	30,72	65,50	34,78
Sin carga	Moderado	182.870	64.004	17,39	40,39	95	54,61
Sin carga	Duro	458.378	160.432	43,59	66,59	278,25	211,66

Con carga (+450 kg)	Suave	103.373	36.180	9,83	32,83	220,75	187,92
Con carga (+450 kg)	Moderado	232.743	81.460	22,13	45,13	305	259,87
Con carga (+450 kg)	Duro	583.391	204.187	55,48	78,48	432,75	354,27

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias observadas entre los valores teóricos y experimentales se deben a los siguientes factores:

- La Ecuación 2 considera únicamente la energía cinética disipada en un único evento de frenado, sin considerar la acumulación térmica que se produce entre frenadas sucesivas.
- El coeficiente de transferencia de calor por convección disminuye durante los instantes de frenado intenso, limitando la disipación de calor.
- La acumulación progresiva de calor en el disco durante un recorrido genera una temperatura base superior a 23°C, estas diferencias confirman que el modelo teórico de balance energético infravalora la temperatura real bajo condiciones de frenado continua en pendiente (Belhocine & Bouchetara, 2012). Reforzando la necesidad del sistema de monitoreo de temperatura en el disco de frenos implementado.

4. Discusión

Los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales permitieron analizar el comportamiento térmico del sistema de frenos en un vehículo categoría N1 bajo seis diferentes condiciones de operación (3 tipos de frenado en dos estados de carga), evidenciando una relación directa entre la intensidad del frenado, la carga vehicular y el incremento de temperatura en el disco de freno; las temperaturas registradas demostraron que el sistema experimenta una acumulación progresiva de calor conforme aumenta la exigencia mecánica, validando los principios físicos de conversión de energía cinética en energía térmica descritos. En las pruebas realizadas sin carga, las temperaturas máximas alcanzadas durante el frenado suave y moderado se mantuvieron dentro de rangos operativos relativamente seguros, registrándose valores de 65,50 °C y 95 °C respectivamente, los resultados evidencian que bajo condiciones normales de operación y menor demanda de frenado, el sistema es capaz de disipar adecuadamente el calor generado por fricción; sin

embargo durante el frenado duro sin carga se registró una temperatura máxima de 278,25 °C, demostrando un incremento térmico considerado asociado a frenado bruscos y repetitivos. Los resultados obtenidos con carga evidenciaron un comportamiento térmico significativamente más severo, en frenado suave con cargas se registró una temperatura máxima de 220,75 °C, valor considerablemente superior respecto al mismo tipo de frenado sin carga, confirmando que el aumento de masa vehicular incrementa la energía cinética que debe disipar el disco de freno durante el frenado generando mayores niveles de calor en el disco y las pastillas de freno. Durante las pruebas de frenado moderado con cargas, se alcanzó una temperatura máxima de 305 °C, coincidiendo con los rangos críticos para el inicio del fenómeno de Fading térmico en materiales de fricción semimetálicos; según (Girdhar, 2021) temperaturas superiores a 300 °C, pueden provocar una reducción progresiva del coeficiente de fricción, reduciendo, la eficiencia del sistema de frenado y aumentando el riesgo de accidentes en descensos prolongados. La condición más crítica del estudio correspondió al frenado duro con carga, donde se registró una temperatura máxima de 432,75 °C, representando un estado severo de sobrecalentamiento y evidencia experimentalmente la posibilidad de degradación térmica del material de fricción bajo condiciones extremas de operación.

Con el propósito de validar los modelos teóricos de transferencia de calor mediante las mediciones experimentales, se calcularon las temperatura teóricas esperadas para cada condición de prueba aplicando la *Ecuación 1 y 2* del Marco Teórico; los parámetros que se usaron fueron: Masa sin carga y con carga, masa del disco de freno, calor específico del material, temperatura inicial 23°C, factor de distribución al disco monitoreado de 0,35 ; además que las velocidades de prueba correspondieron a reducciones parciales sin detención completa: frenado suave de 50 a 35 km/h, moderado de 70 a 45 km/h y duro de 90 a 30 km/h. Tal como se manifiesta en la *Tabla 10 (Comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada según el tipo de frenado)*, los valores experimentales superan considerablemente a los teóricos en las seis condiciones evaluadas, con diferencias que oscilan entre 34,78°C en frenado suave sin carga y 354,27°C en el frenado duro con carga; esta discrepancia se debe 3 diferentes factores: (a) La Ecuación 2 considera únicamente la energía cinética disipada en un único evento de frenado, sin considerar la acumulación térmica que se produce entre frenadas sucesivas. (b) El coeficiente de transferencia de calor por convección disminuye durante los instantes de frenado intenso, limitando la disipación de calor. (c) La acumulación progresiva de calor en el disco durante un recorrido genera una temperatura base superior a 23°C, estas diferencias confirman que el

modelo teórico de balance energético infravalora la temperatura real bajo condiciones de frenado continua en pendiente (Belhocine & Bouchetara, 2012).

Los valores registrados son consistentes con los estudios desarrollados por (Bouchetara & Belhocine, 2012) quienes demostraron que los sistemas de frenos sometidos a cargas elevadas y frenados continuos presentan acumulaciones térmicas críticas capaces de afectar el desempeño del vehículo; así mismo los resultados obtenidos validan experimentalmente los modelos de transferencia de calor aplicados al sistema de frenado, donde la conducción, convección y radiación, participan directamente en el comportamiento térmico del disco, además se observó que durante frenados intensos, la generación de calor supera temporalmente la capacidad de disipación térmica del sistema, provocando incrementos acelerados de temperatura.

En relación con el tercer objetivo específico, el funcionamiento del prototipo desarrollado permitió evaluar la eficacia del sistema de alerta temprana para detectar las condiciones térmicas críticas en tiempo real; el sistema se activó correctamente la alerta de PELIGRO a partir de los 241°C, tanto en el frenado duro sin carga (278,25°C), como en todas las condiciones que superaron el umbral de temperatura, demostrando mediante integración de la termocupla tipo K, el módulo MAX6675, y el microcontrolador ESP32, la viabilidad técnica del sistema para aplicaciones automotrices de monitoreo preventivo; además el sistema evidenció la capacidad de detectar condiciones térmicas críticas antes de alcanzar niveles de riesgo extremo, lo cual representa una ventaja importante en términos de seguridad vial.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que las condiciones geográficas presentes en rutas con pendientes pronunciadas, como la (Av. Maldonado - Loma de Puengasí) representan escenarios de alta exigencia térmica para los sistemas de frenos de vehículos categoría N1; por esta razón, la implementación de sistemas inteligentes de monitoreo térmico puede contribuir significativamente a la prevención de fallos mecánicos, la reducción del fading térmico y la disminución de accidentes de tránsito relacionados con el sobrecalentamiento del sistema de freno.

Tal y como se planteó en la metodología para lograr el objetivo de estimar una contribución de reducción de la siniestralidad, y por lo tanto de mortalidad y lesiones causada por accidentes de tránsito por falla mecánica entre estas de los frenos, a continuación en la Tabla 9 se muestra la lógica del cálculo del porcentaje total de accidentes que se podrían prevenir y los números absolutos estimados.

Tabla 9.

Estimación de la contribución del sistema de monitoreo térmico en la reducción de siniestros atribuibles al sistema de frenos

Variable	Estimación Mínima	Estimación Máxima	Fuente
Accidentes anuales Ecuador	20.346	20.346	INEC (2025)
Incidencia de fallas mecánicas (todas)	0,63%	1,23%	INEC (2025), estimación propia
Accidentes por fallas mecánicas (todas)	128	250	Mínimo: $20.346 \text{ accidentes} \times 0,63 = 1.017,3 \text{ accidentes}$ Máximo: $20.346 \text{ accidentes} \times 0,12 = 2.441,52 \text{ accidentes}$
Proporción del sistema de frenos dentro de fallas mecánicas	65,5%	65,5%	Montero et al. (2022)
Accidentes atribuibles al sistema de frenos	84	164	Escenario mínimo: $128 \times 0,655 = 84 \text{ accidentes}$ Escenario máximo: $164 \times 0,655 = 164 \text{ accidentes}$
Porcentaje del total de accidentes	0,41%	0,81%	Escenario mínimo: $84 \div 20.346 = 0,41\%$ Escenario máximo: $164 \div 20.346 = 0,81\%$

Fuente: INEC (2025), Montero et al. (20022). Elaboración propia

El prototipo no puede prevenir todos los accidentes, pero sí tiene el potencial de incidir en una fracción de este grupo (65,5%). El rango de 84 a 164 siniestros es una cifra pequeña en términos relativos (0,41% - 0,81%), pero absolutamente relevante en el contexto de daños mecánicos, dado que estamos atacando la principal causa dentro estos. Si se previenen se estaría reduciendo entre el 41% y el 81% de todos los siniestros por daños mecánicos (205 en 2025). La conclusión estadística es que aunque el 0,41 - 0,81% parece pequeño frente al total nacional, representa la mayoría absoluta de los siniestros por daños mecánicos, lo que lo convierte en un blanco de intervención muy concentrado y efectivo.

4.1 Cálculo de Fallecidos Evitados

Escenario mínimo

$$84 \times 0,1157 = 9,72 \approx 10 \text{ fallecidos}$$

Escenario máximo

$$164 \times 0,1157 = 18,98 \approx 19 \text{ fallecidos}$$

El resultado de la tasa de mortalidad de siniestros de tránsito por falla mecánica con el prototipo evitaría entre 10 y 19 fallecidos *in situ* al año.

4.2 Cálculo de Lesionados Evitados

Escenario mínimo

$$84 \times 0,8813 = 74,03 \approx 74 \text{ lesionados}$$

Escenario máximo

$$164 \times 0,8813 = 144,53 \approx 145 \text{ lesionados}$$

El resultado de la tasa de lesiones de siniestros de tránsito por falla mecánica con el prototipo evitaría entre 74 y 145 lesionados al año.

4.3 Análisis en el Contexto Internacional

Tabla 10.

Comparación de la contribución con estimaciones internacionales

Fuente	Contexto	Proporción de fallas de frenos en accidentes totales
CITA y TRL (2025)	Gran Bretaña (2025)	6,8% de las colisiones fatales por defectos en los frenos
NHTSA (2018)	EE.UU. (promedio nacional)	$\approx 2,2\%$ (22% de defectos $\times$ 10% de accidentes por defectos)
Haq et al. (2023)	Wyoming (EE.UU. terrenomontañoso)	$\approx 2,5\%$ (25% de defectos $\times$ 10% de accidentes por defectos)
Enimola (2025)	Nigeria	$\approx 10,8\%$ (24% fallas $\times$ 45% frenos/neumáticos)

Fuente: Elaboración propia

La investigación de la CITA y TRL (2025) sobre la relación entre defectos vehiculares identificados en inspecciones técnicas y aquellos documentados en análisis de colisiones revela que los defectos de frenos son identificados como factor contribuyente en el 6,8% de las investigaciones en profundidad de colisiones fatales en Gran Bretaña, en comparación con solo el 2,2% en investigaciones estándar en EE.UU u, lo que sugiere que la contribución real de las fallas de frenos podría ser mayor que la reportada en estadísticas convencionales en América. Cabe destacar que el estudio de Montero et al. (2022) identificó que, en Ecuador, el subregistro de accidentes por fallas mecánicas es significativo debido a que los conductores suelen llegar a acuerdos para evitar la detención de los vehículos y el pago de multas correspondientes, lo que subestima la incidencia real de estos fenómenos.

CONCLUSIÓN

El prototipo demostró viabilidad operativa en condiciones reales, siendo capaz de registrar, procesar y visualizar en tiempo real las variaciones térmicas generadas durante el frenado, mediante la integración de la termocupla Tipo K, el módulo MAX6675 y el ESP32 junto a la pantalla Nextion, validando así la funcionalidad del sistema de alerta temprana desarrollado para la prevención de fallos mecánicos en el sistema de frenos. Los resultados experimentales obtenidos en la ruta Av. Morán Valverde-Loma de Puengasí confirmaron que existe una relación directa entre la intensidad de frenado, la carga vehicular y el incremento de temperatura en el disco de freno; en condiciones sin carga, las temperaturas máximas registradas fueron de 65,5°C para frenado suave, 95°C para frenado moderado y 278,25°C para frenado duro, mientras que con una carga adicional de 450 kg, los valores se elevaron significativamente a 220,75°, 305°C y 432,75°C respectivamente, evidenciando que el aumento de masa vehicular incrementa considerablemente la energía cinética que debe disiparse mediante la fricción en el sistema de frenos. Se verificó experimentalmente la ocurrencia del fenómeno de fading térmico bajo condiciones de frenado moderado y duro con carga, donde las temperaturas alcanzadas de 305 °C y 432,75°C superan el umbral crítico de 300°C establecidos para los materiales de fricción predominantes en vehículos categoría N1, condición que provoca una reducción progresiva del coeficiente de fricción y compromete directamente la capacidad de frenado del vehículo, representando un riesgo significativo para la seguridad vial en rutas con pendientes pronunciadas (Girdhar, 2021).

La comparación entre las temperaturas calculadas mediante la Ecuación 1 y 2, con los valores experimentales registrados por el prototipo, sintetizada en la Tabla 10 (Comparativa entre la temperatura teórica calculada y temperatura experimental registrada según el tipo de frenado), permitió validar el comportamiento cualitativo de los modelos de transferencia de calor aplicados al sistema de frenos; los valores teóricos resultaron consistentemente inferiores a los experimentales, con diferencias que oscilan entre 34,78°C y 354,27°C según la condición evaluada; discrepancia que confirma que el modelo de balance energético subestima la temperatura real en condiciones de frenado continuo en pendiente, dado que no contempla la acumulación térmica residual entre eventos de frenado sucesivos ni el evento de fading térmico sobre el coeficiente de fricción, resultados que son coherentes con los estudios previos sobre comportamiento térmicos en sistemas de freno bajo cargas elevadas y frenados continuos (Belhocine & Bouchetara, 2012).

La eficacia del sistema de alerta temprana fue evaluada a partir de los umbrales térmicos programados en el ESP32, los cuales definen 3 estados de operación: OPERATIVO para temperaturas iguales o mayores a 120°C, PRECUACIÓN para el rango entre 121°C y 240°C, y PELIGRO para temperaturas superiores a 241°C; umbrales establecidos a partir de la norma ISO 26867:2009 y los rangos críticos de los materiales de fricción semimetálicos predominantes en vehículos de categoría N1 (Limpert, 2011). Durante las pruebas realizadas, el sistema activo el estado de PELIGRO en el frenado duro sin carga (278,25°C) y en la temperaturas que superaron el umbral de 240°C, demostrando que el prototipo es capaz de detectar condiciones térmicas críticas en tiempo real antes de que se produzca el fading térmico, reduciendo la capacidad de frenado del vehículo; con ello se confirma la eficacia del sistema de alerta temprana como herramienta de prevención de fallos relacionados con la temperatura en disco de freno, en vías con pendientes pronunciadas. La ruta Av. Morán Valverde – Loma de Puengasí demostró ser un escenario de alta exigencia térmica para el sistema de frenos de vehículos categoría N1, confirmando la pertinencia de su selección como ruta experimental y respaldando técnicamente la necesidad de implementar sistemas de monitoreo térmico preventivo en este tipo de vías, documentadas como puntos de alta siniestralidad asociada a fallos mecánicos dentro del DMQ (Artieda Azuero, 2024).

Finalmente, la implementación del sistema inteligente de monitoreo térmico de bajo costo representa una solución técnica y económicamente viable para la detección temprana de condiciones críticas en el sistema de frenos de vehículos de carga liviana categoría N1 en Ecuador, contribuyendo a la reducción de siniestralidad por fallos mecánicos en rutas con condiciones geográficas exigentes y aportando evidencia experimental aplicable a la mejora de la seguridad vial en el Ecuador, pues el presente trabajo no solo valida experimentalmente los modelos teóricos de transferencia de calor aplicados al sistema de frenos y demuestra la eficacia de un sistema de alerta temprana de bajo costo, sino que también cuantifica su potencial impacto en seguridad vial. El sistema de monitoreo térmico desarrollado contribuye directamente a la prevención de una fracción específica pero significativa de la siniestralidad vial en Ecuador, entre 84 y 164 accidentes anuales atribuibles al sistema de frenos (entre el 0.41 y el 0.81% del total de siniestros), posicionándolo como una contribución tangible y medible a la reducción de accidentes por fallos mecánicos.

En términos de víctimas esto se traduce en la prevención de 10 a 19 fallecidos in situ y de 74 a 144 lesionados anualmente, lo que constituiría un avance sustancial hacia el cumplimiento de las metas de seguridad vial del país, incluyendo la meta del Plan Nacional de Desarrollo para 2029 y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS

3) "Reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo". El sistema de monitoreo térmico desarrollado contribuye directamente a esta meta al prevenir fallos en el sistema de frenos que derivan en siniestros con consecuencias fatales o de alta severidad; y, por tanto reducción de la mortalidad por accidentes de tránsito (Organización Mundial de la Salud, 2023). Por lo tanto, invertir en la mejora y el mantenimiento preventivo de los sistemas de frenado no solo es una medida de seguridad vial efectiva, sino también una intervención costo-efectiva con un alto retorno social y económico.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamowicz, A., & Grzes, P. (2011). Analysis of disc brake temperature distribution during single braking considering coefficient of friction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(5-6), 1133-1141. https://hal.science/hal-00723969/file/PEER_stage2_10.1016%252Fj.applthermaleng.2010.12.016.pdf.
- AEADE. (2014). *Anuario 2014*. <https://aeade.net/wp-content/uploads/2016/11/ANUARIO-2014.pdf>
- AEADE. (2023). *Anuario 2023*. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2024/03/AEADE-2023.pdf>.
- Artieda Azuero, A. B. (Febrero de 2024). *Diseño de una rampa de frenado para la Avenida Simón Bolívar, tramo intercambiador Morán Valverde – Puengasí, cantón Quito, provincia de Pichinch*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27182>.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015, 25 de septiembre). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (Resolución A/RES/70/1) [cita textual: (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015)]. <https://www.cedhnl.org.mx/bs/vih/secciones/planes-y-programas/Agenda-2030-y-los-ODS.pdf>.
- 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>.
- Bochetara, M., & Belhocine, A. (2012). *Thermal analysis of a solid brake disc*. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.029>.
- Choi, J., & Lee, I. (2012). Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(9), 2849-2856. <https://www.semanticscholar.org/paper/Finite-element-analysis-of-transient-thermoelastic-Choi-Lee/8c78f98f4866fdc001644fcb848d3a749f7fca76>.
- CITA & TRL. (2025, January 29). *Relationship between vehicle defects checked in roadworthiness inspections and those identified in collision analyses*. CITA International Motor Vehicle Inspection Committee. <https://citainsp.org/2025/01/30/cita-hosts-a-webinar-with-trl-key-findings-on-vehicle-defects-and-road-safety/>
- Enimola, O. (2025, August 3). Expert trains corporate drivers on improving road safety through effective vehicle maintenance. *Independent Newspaper Nigeria*. Recuperado

de <https://independent.ng/expert-trains-corporate-drivers-on-improving-road-safety-through-effective-vehicle-maintenance/>

- García-León, R. (2017). Análisis termomecánico de un disco de freno ventilado para un vehículo liviano mediante simulación por elementos finitos. *Ingeniería Mecánica*, 20(3), 141-150.
- Gillespie, T. (2021). *Fundamentals of vehicle dynamics (Revised ed.)*. AE International.
- Girdhar, P. R. (2021). *Design and analysis of brake discs to improve performance in fade condition*. <https://doi.org/10.1063/5.0036212>.
- Haq, M. T., Ampadu, V.-M. K., & Ksaibati, K. (2023). An investigation of brake failure related crashes and injury severity on mountainous roadways in Wyoming. *Journal of Safety Research*, 84, 7-17.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentos de transferencia de calor (5ª ed.)*. Pearson Educación.
- INEC. (2024). *Estadísticas de Transporte (ESTRA)*. Ecuador en cifras. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2024/i_trimestre/2024_RESULTADOS_SINIESTROS_IT.pdf.
- INEC. (2025). *Estadísticas de Transporte (ESTRA)*. Ecuador en cifras. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2025/iv_trimestre/2025_RESULTADOS_SINIESTROS_IVT.pdf
- INEN. (2020). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2185: Materiales de fricción para sistemas de frenado de vehículos automotores. Requisitos*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-053-1R.pdf>.
- International Organization for Standardization. (2009). *ISO 26867:2009 - Road vehicles - Brake lining friction materials - Fading behaviour test procedure*. ISO
- Limpert, R. (2011). *Brake design and safety (3rd ed.)*. SAE International.
- López Naranjo, C., & Paucar Paredes, J. (2013). *Diseño, construcción e implementación de un sistema de monitoreo de temperatura del funcionamiento de frenos y velocidad del vehículo aplicado a autobuses interprovinciales*. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Digital UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4281>.
- Montero, J., Muño, Muñoz, J., Arenas, B., & Alén, C. (2022). Identification of the mechanical failure factors with potential influencing road accidents in Ecuador.

International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(13), 7787.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19137787>.

NHTSA. (2018). *National Motor Crash Causation Survey (NMVCCS)*. U.S. Department of Transportation

Organización Mundial de la Salud. (2023). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*. OMS.

Secretaría Nacional de Planificación. (2025, agosto 22). *Secretaria Nacional de Planificación entrega a la Asamblea el Plan Nacional de Desarrollo 2025-2029* [Comunicado de prensa]. Asamblea Nacional del Ecuador. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes-programas-e-instrumentos/?id=50678>

United Nations Economic Commission for Europe. (2023). *UN Regulation No. 13-H – Uniform provisions concerning the approval of passenger cars with regard to braking*. Official Journal of the European Union L 60. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:42023X0401>

.

ANEXOS

ANEXO 1: Modelos más vendidos en Ecuador (AEADE, 2014)

AEADE | ANUARIO 2014

el sector en cifras SECCIÓN 2

Modelos más vendidos

Automóviles

MARCA	MODELO	UNIDADES
CHEVROLET	SAIL	11.514
CHEVROLET	AVEO FAMILY	9.386
CHEVROLET	AVEO EMOTION	3.643
KIA	RIO R	2.469
HYUNDAI	ACCENT	2.444

Van's

MARCA	MODELO	UNIDADES
CHEVROLET	N300	1.183
HYUNDAI	H1	860
CHERY	CHERY PRACTIVAN	648
KIA	CARNIVAL	476
DFSK	C37 CITY VAN	473

Camionetas

MARCA	MODELO	UNIDADES
CHEVROLET	D - MAX	10.657
MAZDA	BT-50	6.440
TOYOTA	HILUX	2.521
FORD	F - 150	1.076
NISSAN	NP 300 Frontier	1.021

Camiones

MARCA	MODELO	UNIDADES
CHEVROLET	NLR	1.458
HINO	FC9	640
CHEVROLET	NPR	564
HINO	XZU640	541
CHEVROLET	NMR	525

Suv's

MARCA	MODELO	UNIDADES
CHEVROLET	GRAND VITARA	9.597
KIA	SPORTAGE	4.277
HYUNDAI	TUCSON ix	2.928
TOYOTA	FORTUNER	1.979
NISSAN	XTRAIL	1.218

Buses

MARCA	MODELO	UNIDADES
HINO	AK08R5A	842
HYUNDAI	COUNTY	196
VOLKSWAGEN	17210 OD	30
YUTONG	ZK6129HE	30
FAW	CA6440A45	26

ANEXO 2: Adecuación de la camioneta en la fosa



ANEXO 3: Adecuación del cobertor del disco de freno



ANEXO 4: Paso del cableado por la carrocería



ANEXO 5: Adecuación del cableado por la mesa superior



ANEXO 6: Colocación del guardapolvo



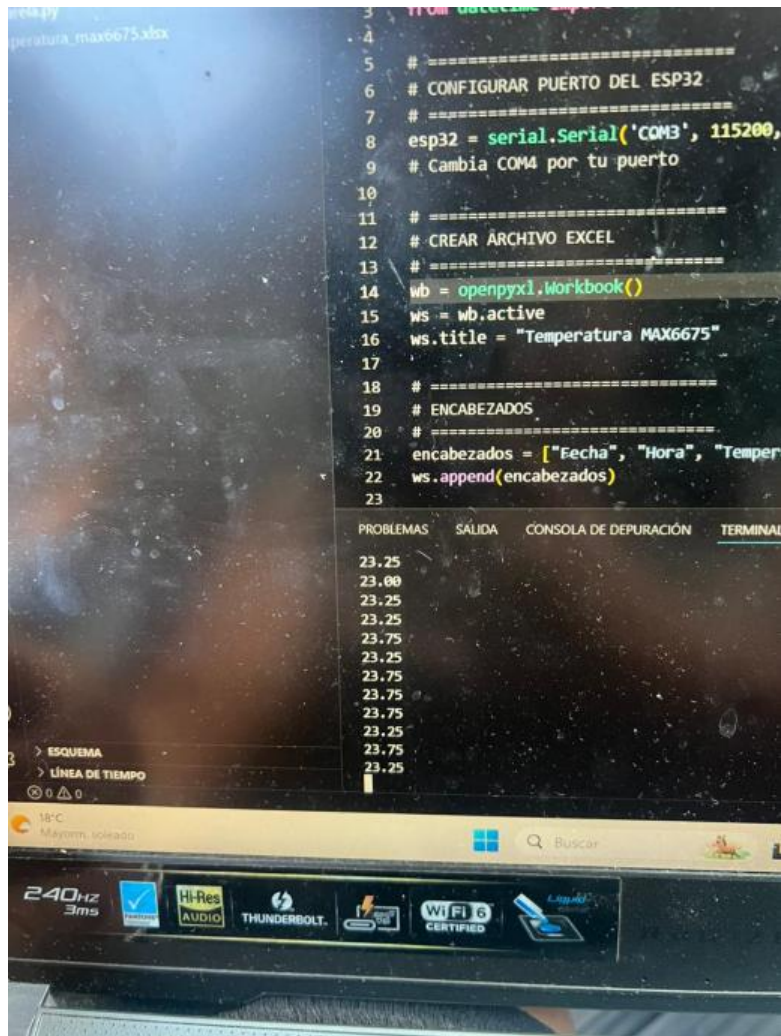
ANEXO 7: Ajuste del guardapolvo



ANEXO 8: Ubicación de la termocupla junto al disco



ANEXO 9: Funcionamiento de la programación de Python



ANEXO 10: Registro de Datos en EXCEL

EXCEL PROTOTIPO - Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

¿Qué desea hacer?

Aptos Narrow · 11 | **A A** | **Ajustar texto** | General | Formato condicional | Dar formato como tabla + celda + Estilos de | Insertar Eliminar Formato + Celdas

Pegar | Cortar | Copiar | Copiar formato | Fuente | Alineación | Número | Ordenar y filtrar + seleccionar + Buscar y modificar + Autosuma + Rellenar + Borrar +

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Fecha	Hora	Temperatura °C												
2	2026-05-09	15:57:47	90.50												
3	2026-05-09	15:57:48	100.25												
4	2026-05-09	15:57:49	114.75												
5	2026-05-09	15:57:50	85.75												
6	2026-05-09	15:57:51	115.00												
7	2026-05-09	15:57:52	120.25												
8	2026-05-09	15:57:53	88.00												
9	2026-05-09	15:57:54	207.75												
10	2026-05-09	15:57:55	133.50												
11	2026-05-09	15:57:56	116.00												
12	2026-05-09	15:57:57	140.75												
13	2026-05-09	15:57:58	190.75												
14	2026-05-09	15:57:59	84.50												
15	2026-05-09	15:58:00	75.25												
16	2026-05-09	15:58:01	220.75												
17	2026-05-09	15:58:02	102.50												
18	2026-05-09	15:58:03	188.00												
19	2026-05-09	15:58:04	145.00												
20	2026-05-09	15:58:05	158.25												
21	2026-05-09	15:58:06	135.50												
22	2026-05-09	15:58:07	105.50												
23	2026-05-09	15:58:08	99.75												
24	2026-05-09	15:58:09	205.50												
25	2026-05-09	15:58:10	147.00												
26	2026-05-09	15:58:11	170.00												
27	2026-05-09	15:58:12	146.25												

PRUEBA 1 FD MA/ANA1 Prueba tentativa 2 FD MA/ANA2 Prueba tentativa 3 FD Prueba tarde 1 FS

ANEXO 11: Plug de conexión a la Pantalla



ANEXO 12: Estructura del Prototipo en la carcasa



ANEXO 13: Pantalla en prueba de ruta (faltan detalles)



ANEXO 14: Indicador de temperatura (por ajustar)



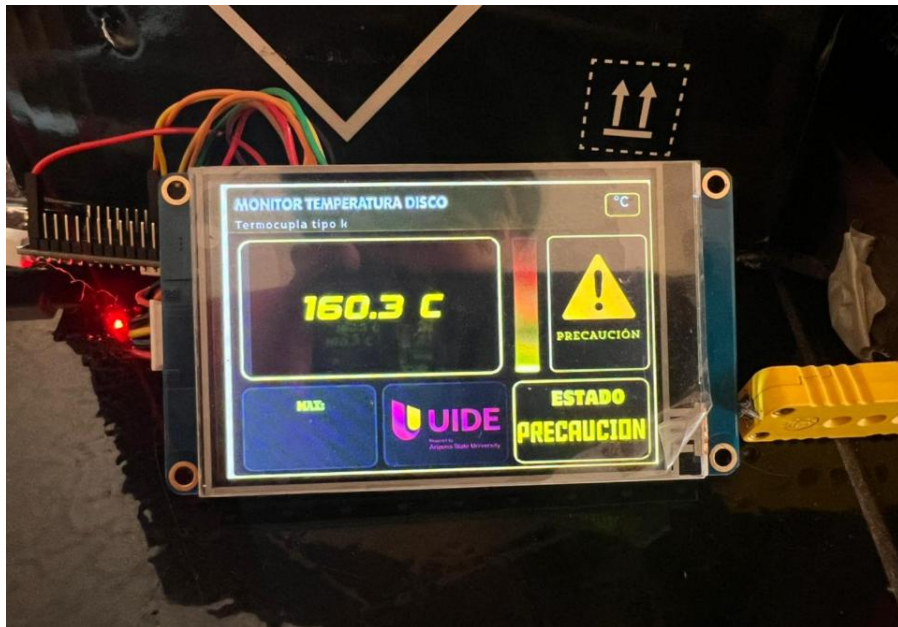
ANEXO 15: Inicio de las pruebas con carga



ANEXO 16: Indicador de temperatura “OPERATIVO”



ANEXO 17: Indicado de temperatura "PRECAUCIÓN"



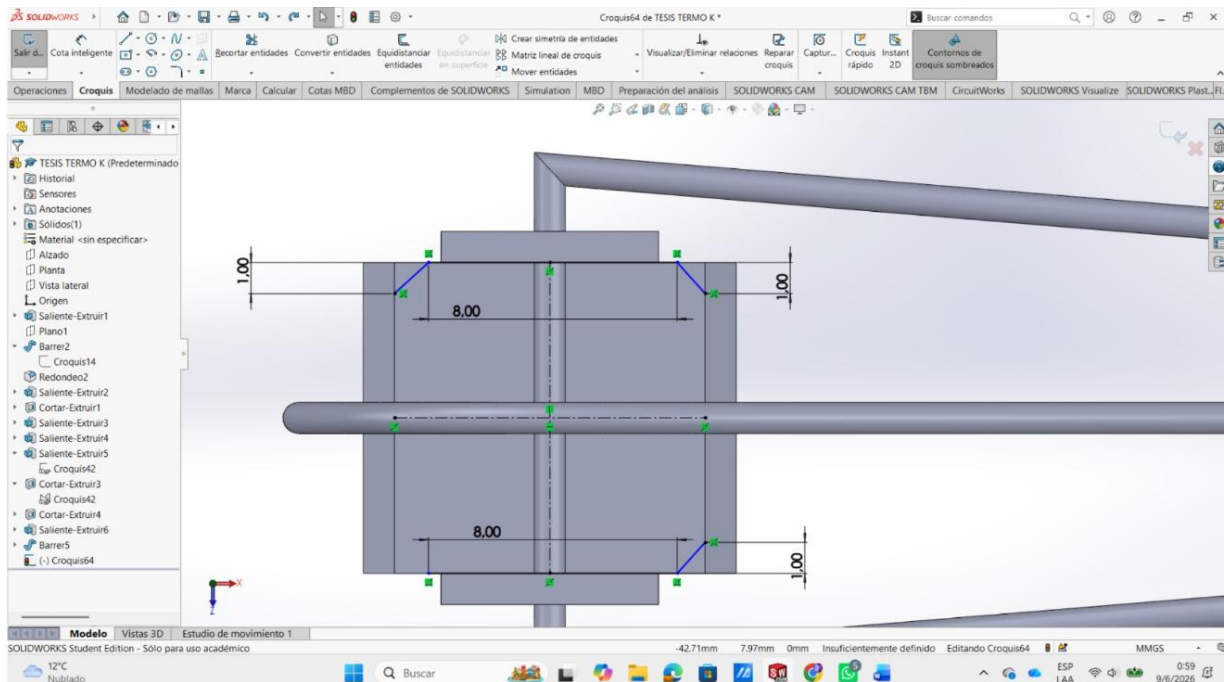
ANEXO 18: Indicador de temperatura "PELIGRO"



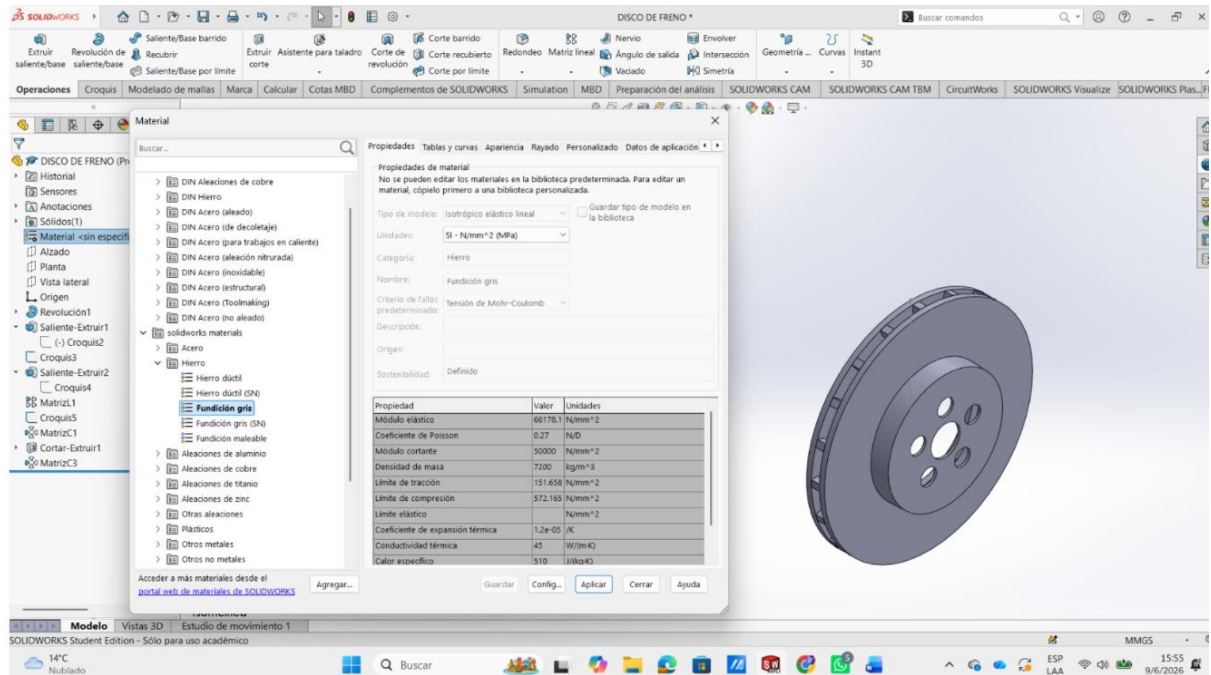
ANEXO 19: Posible modelo matemático para analizar variación la temperatura de enfriamiento

$T = 432,78^{\circ}\text{C}$ CQU CARGA
 $T_{\infty} = 23^{\circ}\text{C}$
 $k = -0,05$
 $\frac{dT}{dt} = -0,05(T - 23)$
 $\int \frac{dT}{T - 23} = \int -0,05 dt$
 $\ln(T - 23) = -0,05t + C$
 $T - 23 = e^{-0,05t + C}$
 $T - 23 = e^{-0,05t} \cdot e^C$
 $T - 23 = 409,72 \cdot e^{-0,05t}$
 $T = 23 + 409,72 \cdot e^{-0,05t}$
 $T = 411,61^{\circ}\text{C}$
 $CDDA \text{ MIN} \rightarrow \text{SE ENFRIA } \geq 11,10^{\circ}\text{C}$

ANEXO 20: Diseño de termocupla tipo K en SOLIDWORKS



ANEXO 20: Diseño de disco de freno en SOLIDWORKS



ANEXO 21: Ensamblaje de termocupla y disco en SOLIDWORKS

