

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**Propuesta de un sistema para medir la eficiencia del freno
convencional en vehículos livianos**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por:

Bilclinton Santos Sotelo Camones

iD [0009-0008-3886-3123](https://orcid.org/0009-0008-3886-3123)

Asesor

Dr. Aurelio Marcelo Padilla Ríos

iD [0009-0007-6270-6171](https://orcid.org/0009-0007-6270-6171)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Sotelo, 2025)
Referencia/Reference	Sotelo, B. (2025). <i>Propuesta de un sistema para medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Con mucho cariño quiero dedicar el presente proyecto de tesis a mis padres y hermanos. Sus palabras de motivación y consejos me fortalecieron, los considero parte fundamental en mi camino.

A mi novia Maritza, mi compañera de vida que siempre me alentó a seguir adelante y así poder culminar mi etapa de elaboración de tesis.

A mi Universidad, le dedico mi proyecto de tesis, como fruto de los conocimientos adquiridos en mi proceso de estudiante.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la fuerza y bendición para no rendirme y seguir adelante por más dificultades que se hayan presentado en el camino.

Le agradezco a mi querida familia por su amor y confianza, depositada en mí, me instruyeron en el camino de la superación y ahora que después de un largo camino puedan ver el resultado de su gran apoyo.

Por último quiero manifestar mi agradecimiento a mi guía de tesis, Aurelio Padilla por su orientación, paciencia y dedicación en mis etapas del proyecto de tesis.

Resumen

El objetivo de esta investigación es proponer un sistema que permita medir, de forma precisa y controlada, la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1, utilizando un vehículo real como plataforma de ensayo en las instalaciones del INTRAFIM-UNI. Nuestra hipótesis es que una correcta identificación de parámetros clave, con instrumentos de medición y componentes mecánicos, permite evaluar con claridad el desempeño del sistema de frenos convencional antes y después del mantenimiento preventivo. El tipo de investigación es aplicada, nivel correlacional, enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental. Los parámetros principales de este estudio son presión hidráulica, temperatura de fricción, masa del vehículo, velocidad, distancia de frenado y coeficientes de fricción y adherencia. A través de instrumentos y equipos instalados sobre el vehículo, se realizan pruebas dinámicas reales que permiten comparar el comportamiento del sistema en ambos escenarios. Los resultados muestran una mejora significativa en la eficiencia de frenado posterior al mantenimiento, lo que valida las hipótesis planteadas. Asimismo, se comprueba que el sistema de medición opera adecuadamente en un entorno controlado, cumpliendo con los requisitos técnicos. De forma complementaria, el análisis térmico evidencia una menor asimetría de temperaturas entre los frenos, lo que indica una mayor uniformidad en la distribución del esfuerzo de frenado. En conjunto, el sistema diseñado constituye un aporte valioso para futuros estudios en ingeniería automotriz, especialmente en el diagnóstico, mantenimiento y evaluación de sistemas de freno convencional, aportando información útil para la toma de decisiones técnicas basadas en evidencia.

Palabras clave: sistema, eficiencia de frenado, frenos convencionales, mantenimiento preventivo, análisis térmico

Abstract

The objective of this research is to propose a system that allows for the accurate and controlled measurement of the efficiency of conventional braking systems in category M1 light vehicles, using a real vehicle as a test platform at the INTRAFIM-UNI facilities. Our hypothesis is that a correct identification of key parameters, with measuring instruments and mechanical components, allows for a clear assessment of conventional braking system performance before and after preventive maintenance. The research is applied, correlational, quantitative, and quasi-experimental in design. The main parameters of this study are hydraulic pressure, friction temperature, vehicle mass, speed, braking distance, and coefficients of friction and adhesion. Real dynamic tests are performed using instruments and equipment installed on the vehicle, allowing for a comparison of system performance in both scenarios. The results show a significant improvement in post-maintenance braking efficiency, validating the hypotheses. It also verifies that the measurement system operates properly in a controlled environment, meeting technical requirements. Additionally, the thermal analysis shows less temperature asymmetry between the brakes, indicating greater uniformity in braking force distribution. Overall, the designed system constitutes a valuable contribution to future studies in automotive engineering, especially in the diagnosis, maintenance, and evaluation of conventional braking systems, providing useful information for evidence-based technical decision-making.

Keywords: system, braking efficiency, conventional braking, preventive maintenance, thermal analysis

Tabla de contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Antecedentes de la investigación	1
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio	9
1.3 Formulación del problema	10
1.3.1 Problema General.....	10
1.3.2 Problemas Específicos	10
1.4 Justificación e importancia	10
1.5 Objetivo del estudio.....	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos.....	11
1.6 Hipótesis	12
1.6.1 Hipótesis general	12
1.6.2 Hipótesis específica.....	12
1.7 Variables y operacionalización de variables	13
1.7.1 Operacionalización de variables	13
1.8 Metodología de la investigación	14
1.8.1 Unidad de análisis	14
1.8.2 Tipo, Enfoque, Nivel de Investigación	14
1.8.3 Diseño de la Investigación.....	14
1.8.4 Fuentes de Información.....	15
1.8.5 Población y Muestra.....	15
1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	15
1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos.....	16
Capítulo II. Marco Teórico y Marco Conceptual	17
2.1 Marco teórico	17
2.1.1 Estándares y Normas	17
2.1.2 Fundamentos físicos de frenado.....	18
2.1.3 Sistema de freno vehicular	29
2.1.4 Bancos de prueba existentes.....	63
2.1.5 Conceptos estadísticos para manejo de datos.....	67
2.2 Marco Conceptual: Definición de conceptos o términos	70

Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación	71
3.1 Fase 1: Identificación de parámetros clave para evaluar la eficiencia del sistema de frenos y diseño conceptual.....	72
3.2 Fase 2: Selección de equipos e instrumentos de medición para la evaluación del sistema de frenos convencional del vehículo.....	74
3.3 Fase 3: Ensamblaje de los componentes del sistema de medición y validación operativa para evaluar el frenado antes y después del mantenimiento.....	81
Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados. . 91	
4.1 Valores medidos y datos calculados.....	91
4.1.1 Detalle de los cálculos realizados para la obtención de la eficiencia de frenado antes del mantenimiento preventivo.....	91
4.1.2 Detalle de los cálculos realizados para la obtención de la eficiencia de frenado después del mantenimiento preventivo.....	96
4.1.3 Análisis térmico del sistema de frenos a partir de la energía cinética corregida y temperaturas superficiales medidas sin mantenimiento preventivo.....	100
4.1.4 Análisis térmico del sistema de frenos a partir de la energía cinética corregida y temperaturas superficiales medidas con mantenimiento preventivo.....	105
4.2 Prueba de normalidad	106
4.3 Contrastación de las Hipótesis con la prueba de normalidad.....	107
4.4 Análisis e Interpretación de Resultados.....	109
4.5 Discusión de Resultados	118
Conclusiones	122
Recomendaciones	124
Referencias	125
Anexos.....	128

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Coefficientes de adherencia para diferentes superficies de rodadura</i>	22
Tabla 2 <i>Coefficientes de adherencia según velocidad del vehículo</i>	22
Tabla 3 <i>Valores típicos y rangos de coeficientes de arrastre</i>	24
Tabla 4 <i>Características técnicas de líquidos de freno</i>	41
Tabla 5 <i>Composición de las pastillas de freno</i>	61
Tabla 6 <i>Selección de instrumentos adecuados</i>	76
Tabla 7 <i>Diseño conceptual del sistema de medición de eficiencia</i>	90

Lista de Figuras

Figura 1	Condiciones de frenado de un vehículo.....	20
Figura 2	Coeficiente aerodinámico en diferentes modelos de vehículos.....	24
Figura 3	Esquema de fuerzas que actúan en las llantas del vehículo.....	25
Figura 4	Esquema de proporcionalidad en un vehículo	27
Figura 5	Distribución II del circuito de frenos.....	30
Figura 6	Distribución X del circuito de frenos.....	30
Figura 7	Distribución HI del circuito de frenos	31
Figura 8	Distribución LL del circuito de frenos.....	31
Figura 9	Distribución HH del circuito de frenos.....	32
Figura 10	Componentes del sistema de freno convencional de doble circuito.....	33
Figura 11	Pedal suspendido y pedal de piso (integrado al módulo de freno).....	34
Figura 12	Unidad servofreno de vacío de doble cámara	35
Figura 13	Cilindro maestro con resorte de pistón cautivo	37
Figura 14	Cilindro maestro con válvula central.....	38
Figura 15	Depósito de líquido de freno.....	39
Figura 16	Cañerías de cobre y mangueras flexibles.....	40
Figura 17	Líquidos de frenos más comerciales a nivel nacional	42
Figura 18	Freno de tambor simplex con freno de estacionamiento integrado (ruedas traseras).....	44
Figura 19	Tipos de pivotes en el freno zapata.....	46
Figura 20	Freno de tambor con pivotes (tipo simplex).....	47
Figura 21	Freno de tambor (tipo dúplex)	48
Figura 22	Freno de tambor (tipo Doble Dúplex).....	48
Figura 23	Freno de tambor (tipo Servo).....	49
Figura 24	Freno de tambor (tipo Dúo-Servo).....	50
Figura 25	Mecanismo de ajuste manual en el cilindro de rueda	51
Figura 26	Cilindro de rueda de simple efecto	52
Figura 27	Esquema de componentes de freno de tambor	52
Figura 28	Tipos de calipter en freno de disco.....	53
Figura 29	Vista de corte de sello de pistón.....	54
Figura 30	Vista de resorte expansor.....	54
Figura 31	Pistón de freno (posicionamiento)	55

Figura 32	<i>Vista corte calípter fijo</i>	56
Figura 33	<i>Vista corte calípter flotante</i>	57
Figura 34	<i>Vista corte calípter deslizante</i>	59
Figura 35	<i>Forro con zapata de freno fijado</i>	60
Figura 36	<i>Pastilla de frenos con placa de soporte</i>	60
Figura 37	<i>Tipos de ventilación de disco de freno</i>	63
Figura 38	<i>Banco de rodillos (frenómetro)</i>	65
Figura 39	<i>Elementos del frenómetro de rodillos</i>	65
Figura 40	<i>Esquema de componentes de un frenómetro de rodillos</i>	66
Figura 41	<i>Frenómetro de placas</i>	67
Figura 42	<i>T de Student para dos muestras relacionadas</i>	68
Figura 43	<i>Vehículo Datsun modelo JNL710</i>	72
Figura 44	<i>Cámara Termográfica FLIR E6</i>	77
Figura 45	<i>Medidor láser Bosch GLM 120c</i>	78
Figura 46	<i>Transductor de presión Estink de 0 – 35 bar</i>	78
Figura 47	<i>Adaptador Tee de conexión roscada</i>	79
Figura 48	<i>Controlador universal Novus N3000</i>	79
Figura 49	<i>Fuente/convertidor DC/DC con salida aislada</i>	80
Figura 50	<i>Instalación de adaptadores tee y transductores de presión en el eje posterior</i>	82
Figura 51	<i>Instalación de adaptadores tee y transductores de presión en el eje delantero</i>	83
Figura 52	<i>Válvula dosificadora del sistema de frenos</i>	83
Figura 53	<i>Control de velocidad de vehículo, aplicativo móvil</i>	84
Figura 54	<i>Bomba de frenos, servofreno de vacío, frenos de disco y de tambor</i>	85
Figura 55	<i>Pastilla de frenos nueva de la marca FRENOSA</i>	87
Figura 56	<i>Nueva bomba de freno con depósito de líquido</i>	88
Figura 57	<i>Inspección de cañerías de freno</i>	88
Figura 58	<i>Cálculo de la eficiencia mecánica sin mantenimiento preventivo del vehículo</i>	95
Figura 59	<i>Cálculo de la eficiencia mecánica con mantenimiento preventivo del vehículo</i>	99
Figura 60	<i>Análisis térmico y medición de temperaturas de los frenos con la cámara Termográfica antes del mantenimiento preventivo</i>	103
Figura 61	<i>Delta de temperatura en los discos de freno</i>	104
Figura 62	<i>Medición de temperaturas de los frenos con la cámara Termográfica después del mantenimiento preventivo</i>	105

Figura 63	<i>Resultado de la prueba de normalidad</i>	106
Figura 64	<i>Eficiencia de frenado Pre_Prueba sin Mantenimiento del sistema de frenos</i>	110
Figura 65	<i>Eficiencia de frenado Pre_Prueba con Mantenimiento del sistema de frenos</i>	110
Figura 66	<i>Eficiencia de frenado entre Pre y Post Prueba Sin / Con Mantenimiento (en barras).....</i>	111
Figura 67	<i>Eficiencia de frenado entre Pre y Post Prueba Sin / Con Mantenimiento (en lineal)</i>	111
Figura 68	<i>Análisis de variables de presión hidráulica Vs. Eficiencia de frenado sin mantenimiento.....</i>	113
Figura 69	<i>Análisis de variables de presión hidráulica Vs. Eficiencia de frenado con mantenimiento.....</i>	113
Figura 70	<i>Análisis de variables de Eficiencia de frenado Vs. Distancia de frenado sin mantenimiento.....</i>	114
Figura 71	<i>Análisis de variables de Eficiencia de frenado Vs. Distancia de frenado con mantenimiento</i>	114
Figura 72	<i>Temperatura de los frenos de cada rueda antes del mantenimiento.....</i>	116
Figura 73	<i>Temperatura de los frenos de cada rueda después del mantenimiento.....</i>	117
Figura 74	<i>Comparación de la eficiencia de frenado antes y después del Mantenimiento.....</i>	119

Introducción

Los sistemas de freno son un componente esencial para la seguridad activa de los vehículos, ya que permiten reducir la velocidad o detener el automóvil de manera controlada ante diversas condiciones de operación. Su correcto funcionamiento no solo protege la integridad de conductor y acompañantes, sino que también contribuye a la prevención de accidentes y al cumplimiento de normativas técnicas de tránsito. Debido a que constantemente está expuesto al desgaste y a variaciones en las condiciones de carga y conducción, resulta fundamental evaluar periódicamente su eficiencia, tanto para garantizar un desempeño óptimo como para tomar decisiones técnicas basadas en evidencia. En ese contexto, esta investigación propone un sistema que permita medir de forma práctica y controlada la eficiencia del sistema de frenos, utilizando un vehículo real como plataforma experimental.

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos que recorren paso a paso el desarrollo de la investigación. El primer capítulo plantea el contexto general del estudio, presentando la problemática, su importancia y la formulación del problema. También se detallan los objetivos propuestos, la hipótesis principal junto a sus hipótesis específicas, así como el tipo, nivel y diseño metodológico de la investigación. Esta sección sienta las bases para comprender por qué y cómo se desarrolló el estudio.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico y conceptual, donde se abordan los fundamentos técnicos del sistema de frenos, los parámetros de medición utilizados y los conceptos clave que dan sustento al diseño experimental. También se

incluyen definiciones esenciales que permitirán interpretar correctamente los datos obtenidos en los ensayos.

El tercer capítulo está dedicado al desarrollo del trabajo. Aquí se describen las tres fases principales de la investigación: la identificación de parámetros clave, la selección de instrumentos de medición, el ensamblaje del sistema y puesta en funcionamiento del sistema de medición de eficiencia dentro del INTRAFIM-UNI. Este capítulo fue clave para validar que el sistema operaba correctamente y en condiciones seguras.

El cuarto capítulo recoge los resultados de los ensayos realizados. Se comparan los datos obtenidos antes y después del mantenimiento, y se aplican herramientas estadísticas para contrastar las hipótesis formuladas. A partir de este análisis, se interpreta cómo influye el mantenimiento en la eficiencia del frenado, destacando la mejora alcanzada tras las acciones correctivas.

Finalmente, se presentan las recomendaciones para futuras investigaciones y las conclusiones respecto a los objetivos planteados y las referencias utilizadas en esta investigación.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Antecedentes de la investigación

Carrasco, Exzar (2019)¹ investigó la problemática de la poca eficiencia del sistema de freno del tipo tambor en vehículos de transporte público con una cilindrada de 800 cm³, identificando que la falta de ventilación y la acumulación de calor debido a la fricción reducen de forma progresiva la capacidad de frenado del vehículo. La justificación evidenció su importancia en los aspectos: social, al contribuir en la disminución de accidentes; económico, al minimizar costos de mantenimiento; ambiental, al disminuir los residuos contaminantes asociados al desgaste por fricción de las zapatas; y técnico, al permitir comparar la eficiencia real de los dos sistemas de freno (disco y tambor) bajo los parámetros del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). El objetivo principal fue analizar el desempeño de los sistemas de freno de disco y de tambor para optimizar la eficiencia de frenado en estos vehículos, bajo la hipótesis de que un cambio de sistema permitiría mejorar la eficiencia del frenado. De tal modo, La investigación fue de tipo aplicada, con nivel explicativo y enfoque cuantitativo, utilizando un diseño cuasi experimental que incluyó dos vehículos: el primero contaba con frenos de tambor y el otro fue adaptado con frenos de disco. La técnica de recolección de datos se llevó a cabo por observación directa y mediciones utilizando un frenómetro BD600S6095. Los resultados obtenidos mostraron que el sistema de frenos de disco tuvo mayor eficiencia de frenado, menor desequilibrio entre ruedas y mantenimiento menos costoso, llegando a un punto de equilibrio debido a su mayor disipación, en comparación con el frenado de tambor. En la discusión, el autor resalta la importancia del conocimiento de los materiales de fricción y del mantenimiento preventivo para garantizar la seguridad del vehículo y la de los

¹ **Carrasco Exzar (2019)**. Análisis comparativo del freno de tambor y freno de disco para optimizar la eficiencia del sistema de frenos en vehículo de servicio público de 800 cm³ de cilindrada. [Tesis para título profesional, Universidad Cesar Vallejo].

ocupantes. Se concluyó que el sistema de freno tipo disco es más eficiente y recomendable para el tipo de vehículos de transporte público que se utilizaron y se recomendó dar a conocer los resultados y los beneficios de implementación de dicha mejora.

Chiroque, José (2020)² investigó el problema de la ineficiencia y la falta de seguridad en los sistemas de frenos que los automóviles livianos y pesados, las principales razones de estas insuficiencias en el sistema de frenado son la falta de innovación tecnológica, el uso de componentes de baja calidad y el mantenimiento inadecuado, lo que ocasionaba una mayor distancia de frenado y una disminución del control vehicular, aumentando los riesgos de accidentes. Desde esa perspectiva, La justificación mostró su valor en el aspecto social, al contribuir con el bienestar de los ocupantes y la seguridad vial; en el aspecto económico, al disminuir los costos por fallas recurrentes; y en el ambiental, al optimizar el uso de energías durante la operación del automóvil. El objetivo principal fue analizar el performance y seguridad a diversos sistemas de freno, con el fin de determinar cuál ofrecía mejores resultados en ambos aspectos, basándose de la hipótesis de que una comparación detallada permitiría identificar el sistema más óptimo. La investigación fue de tipo aplicada, con un nivel explicativo, bajo un enfoque cuantitativo y utilizando un diseño no experimental. La población fue automóviles livianos y pesados fabricados a partir del año 2014, y la muestra estuvo constituida de vehículos con freno hidráulico moderno. Para la recopilación de la información se usaron técnica de observación y revisión documental, con el soporte de fichas técnicas y guías de observaciones. Los resultados prácticamente claros mostraron que los sistemas de freno regenerativos, los de disco ventilado y los de tipo electrónico ofrecen mejores resultados, es decir, más eficiencia, menos desgaste y mejor respuesta a las situaciones críticas. En la discusión, se enfatizó que estos superan a sus predecesores por mucho, siguiendo los estudios recientes de innovación en la industria automotriz. Por ende, la recomendación

² **Chiroque José (2020)**. Análisis de los sistemas de frenos de un vehículo - determinación del sistema de frenos óptimo. [Tesis para título profesional, Universidad Cesar Vallejo].

presentada consistió en que la elección del sistema de freno ideal dependería del tipo el coche y de las condiciones de uso. Por lo tanto, se recomienda la implementación de las tecnologías del freno regenerativo y el del freno electrónico, así como un aumento del mantenimiento preventivo para un parque automotor más seguro y eficiente.

Correa, Moisés et al (2020)³ investigaron el problema del alto índice de accidentes de tránsito provocados por fallas en los sistemas de frenos hidráulicos en vehículos livianos, una situación que afecta seriamente tanto a la seguridad vial como a los costos asociados a daños materiales. La investigación se justifica no solo por su impacto social, al buscar reducir los siniestros, sino también en el ámbito económico, al intentar disminuir las pérdidas ocasionadas, y en el técnico, al proponer tecnologías de monitoreo preventivo. El objetivo planteado fue diseñar e implementar un sistema de supervisión capaz de monitorear en tiempo real la presión hidráulica del sistema de frenos, partiendo de la hipótesis de que su instalación podría reducir significativamente la probabilidad de accidentes mediante alertas inmediatas ante cualquier falla de presión. El estudio fue de tipo aplicada, de nivel explicativo, desarrollado bajo un enfoque cuantitativo y con un diseño no experimental. Para la recolección de datos se utilizaron el análisis documental y encuestas dirigidas a conductores de la región Lambayeque, buscando recoger sus percepciones y experiencias. La muestra estuvo constituida por el sistema diseñado y simulado, que integró sensores de presión, un microcontrolador ATMEGA32, pantalla LCD, módulo Bluetooth y alertas visuales a través de luces LED. Entre los resultados más relevantes, se evidenció que un 82% de los conductores encuestados consideró que el sistema propuesto ayudaría a reducir accidentes provocados por fallos en el sistema de frenos, destacándose también su capacidad para detectar valores fuera del rango óptimo. En la discusión se concluyó que la propuesta es técnicamente viable, mejora la capacidad de respuesta del conductor ante emergencias y coincide con hallazgos previos de la

³ **Correa, Moisés et al (2020)**. Diseño e implementación de un sistema de supervisión de frenos hidráulicos en los vehículos livianos [Tesis para título profesional, Universidad Cesar Vallejo].

literatura especializada en seguridad vehicular. Finalmente, se recomendó implementar el sistema de supervisión de forma progresiva en vehículos de transporte liviano y trabajar en futuras versiones que incorporen mejoras en la conectividad.

Rojas, Vicente et al (2020)⁴ investigaron el problema del sobrecalentamiento en los discos de freno convencionales durante el proceso de frenado, una situación que comprometía tanto la seguridad como la eficiencia del sistema, sobre todo en condiciones de frenado continuo. La justificación de la presente investigación radica en la necesidad de mejorar la disipación térmica de un sistema de freno a costos óptimos y de fácil acceso, no solo para mejorar la seguridad vial, sino también para disminuir el desgaste del sistema. Con dicho proceso, se planteó el objetivo de rediseñar un disco de freno convencional ventilado, adaptándolo a un diseño hiperventilado mediante trabajos de mecanizado, con la intención de optimizar la disipación de calor y acortar la distancia de frenado. La hipótesis estableció que un disco hiperventilado sería capaz de transferir mejor el calor generado por fricción, mejorando así el rendimiento general del sistema de frenado. El estudio fue de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo, de nivel comparativo y diseño experimental. Los datos fueron recolectados desde la observación instrumental e instrumentación con sensores infrarrojos MLX90614 conectados a la tarjeta Arduino, cuyos datos posteriormente fueron procesados con la ayuda de la plataforma LabVIEW. La muestra se conformó de discos originales, discos ventilados y el disco rediseñado, instalados en la camioneta Chevrolet Dmax 4 × 4; en este lugar fueron medidos los datos respectivos. Los resultados evidenciaron que los discos hiperventilados operaban en un rango térmico menor (80 a 100 °C) en comparación con los discos convencionales (90 a 130 °C) y, además, lograban reducir la distancia de frenado de 37 metros a solo 25 metros. En La discusión se destacó la mejora notable en los parámetros tanto térmicos como funcionales

⁴ **Rojas, Vicente et al (2020)**. Análisis de la eficiencia de un disco de freno convencional ventilado con respecto a un disco hiperventilado mediante mecanizado [Artículo Científico, Universidad Politécnica Salesiana].

del nuevo diseño, validándose así que el mecanizado es una estrategia efectiva para aumentar la eficiencia del frenado. Finalmente, se concluyó que el rediseño del disco influye de manera significativa a mejorar la disipación de calor, reduce tanto el tiempo como la distancia de frenado y mejora la seguridad del vehículo, justificando su implementación pese al incremento del 30 % en el costo. Se recomienda, para futuros trabajos, analizar la concentración de esfuerzos axiales con la finalidad de evaluar su durabilidad estructural.

Yugsi, Kevin et al (2021)⁵ investigaron el problema de la desigual eficiencia de frenado en vehículos con freno de zapatas en el mercado ecuatoriano, imputable a la variabilidad en la calidad de los empaques de fricción nacionales e importados, afectando no solo el rendimiento sino también a la seguridad en condiciones de manejo reales. La justificación se basa en la necesidad de verificar que los materiales alternativos acogidos cumplen con los estándares de la norma EC13H para, de este modo, garantizar la seguridad vial y brindar opciones más confiables y económicas al material original. El objetivo de la investigación radica en evaluar de forma comparativa eficiencia de frenado de empaques originales, nacionales y regionales para vehículos tipo N1, con pruebas en condiciones de laboratorio y campo. A partir de la hipótesis de que los empaques alternativos compiten o superan el desempeño del original sin riesgo de seguridad, el estudio se desarrolló como una investigación aplicada, de nivel descriptivo-comparativo, con enfoque cuantitativo y diseño cuasi experimental. Las técnicas aplicadas fueron la observación directa y las pruebas de frenómetro siguiendo la normativa EC13H mediante un vehículo referencia camioneta VW Amarok. Los resultados indicaron que el empaque regional logró una eficiencia de 66,4 % en el eje posterior sin carga mostrando un buen comportamiento en temperatura máxima de 66,88 °C; el empaque local logró una eficiencia de 61,8 % con media carga presentando una medición ligeramente menor de temperatura,

⁵ **Yugsi, Kevin et al (2021)**. Estudio eficiencia en frenado con empaques de fricción local e importados en vehículos de categoría N1 bajo norma EC13H [Artículo de investigación, Universidad Internacional del Ecuador].

66,08 °C y mejorando el frenado de 6,1 segundos y la distancia recorrida de 13,4 metros a 90 km/h mostrando una mejor eficiencia que el empaque regional. En la discusión, se indicó que ambos empaques son técnicamente viables y representan opciones alternativas al material original, sin embargo, el regional logró mejor agarre bajo condición de carga. Finalmente, se concluyó que ambos empaques alternativos cumplen con los requerimientos de la normativa y ofrecieron un buen comportamiento en seguridad eficiencia, por lo que se propuso su homologación e implementación regular en el mercado nacional.

Calderón, Sebastián et al (2022)⁶ investigaron la problemática de la contaminación ambiental producida por lo vehículos de combustión interna y la necesidad de adecuar los sistemas de freno a las nuevas configuraciones tecnológicas de los vehículos eléctricos, cuya eficiencia era poco conocida y no estaba estandarizada. Esta investigación se justificó en la urgencia de reducir las emisiones de CO₂; además, optimizar la seguridad y eficiencia energética en la transición a energías limpias, y la adaptación de los sistemas de freno a estas nuevas condiciones. El objetivo fue determinar la eficiencia de los sistemas de frenado en vehículos eléctricos, en particular el frenado regenerativo, para comprender cómo funciona, sus ventajas y desventajas. La hipótesis sostenía que el freno regenerativo no solo aumenta la eficiencia de la energía regenerativa recuperando energía cinética, sino que también disminuiría el desgaste total del vehículo y su consumo energético general. El estudio es de tipo aplicada, con enfoque cualitativo, nivel descriptivo y diseño no experimental, ya que se basó en la revisión de artículos científicos. Por lo tanto, la técnica de recolección de datos empleada fue la observación, y el análisis de fuentes secundarias especializadas. Los resultados mostraron que los frenos regenerativos, transforman de manera eficiente la energía de frenado en electricidad y prolongan la vida útil del sistema y reducen las emisiones, pero siguen dependiendo de frenos tradicionales si las baterías

⁶ **Calderón, Sebastián et al (2022)**. Eficiencia del sistema de frenos en vehículos eléctricos

[Artículo de investigación, Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio].

están completamente cargadas. En la discusión, los autores resaltaron que el sistema de freno regenerativo es eficiente, sostenible y adecuado para las necesidades de movilidad eléctrica. Finalmente se concluyó que la eficiencia del sistema regenerativo es positiva e idóneo con el desempeño y la sostenibilidad de los automóviles eléctricos y se recomienda que los fabricantes mejoren dinámicamente la relación entre este sistema y los frenos convencionales, es decir, desarrollar sistemas híbridos que combine lo mejor de ambos tipos de freno para alcanzar un alto rendimiento del sistema.

Lema, Antonio & Pinos, Leonardo (2023)⁷ investigaron el problema de la alta tasa de motocicletas que no superan la Revisión Técnica Vehicular (RTV) en Cuenca por fallas en el sistema de frenos, lo cual compromete la seguridad vial y evidencia una falta de criterios técnicos sobre la eficiencia de distintos tipos de pastillas de freno. La investigación se justificó por su impacto técnico, al identificar materiales que mejoren el rendimiento del sistema de frenos; social, al reducir riesgos de accidentes; y económico, al optimizar el mantenimiento de motocicletas de uso urbano. El objetivo fue analizar la eficiencia del frenado en la motocicleta Axxo Tracker 250 mediante pruebas dinámicas y computacionales con tres tipos de pastillas (gama baja, media y alta) en superficies de asfalto y grava. La hipótesis sostenía que las pastillas de gama alta garantizarán la eficiencia de frenado exigida en comparación con los otros niveles. El estudio es de tipo aplicada, de nivel explicativo, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Se aplican pruebas computacionales en Autodesk Inventor y ANSYS para simular deformación y temperatura del disco, y pruebas dinámicas siguiendo la norma SAE J1263. La recolección de datos incluyó la observación directa y la medición instrumental de tiempo, distancia, y temperatura. Los resultados muestran que, en asfalto, las pastillas de gama alta alcanzan una eficiencia de frenado del 83.82 %, frente al 76.29 % de las de gama baja; en grava, los

⁷ **Lema, Antonio & Pinos, Leonardo (2023)**. Análisis de la eficiencia del frenado mediante pruebas dinámicas y computacionales para la motocicleta AXXO Tracker 250 [Tesis para título profesional, Universidad Politécnica Salesiana].

valores son 70.17 % y 52.09 %, respectivamente. En la discusión se confirmó que las pastillas cerámicas, las de alta gama, brindan una mayor estabilidad, menor distancia de frenado y mejor comportamiento térmico, reflejando una ventaja a nivel técnico. Se concluyó que en la eficiencia de frenado influyen significativamente el tipo de pastilla, la temperatura y el tiempo de frenado. se recomienda implementar las pastillas de gama alta las motocicletas urbanas y hacer nuevos estudios con más variables y tipos de superficie.

Caicedo, Jimmy & Palacios, Walter (2024)⁸ investigaron el problema del aumento de accidentes de tránsito en Ecuador, provocado en parte por fallas en el sistema de frenos, donde la eficiencia del frenado se ve influenciada por el tipo de material utilizado en las pastillas, sin que existiera suficiente evidencia comparativa sobre su desempeño. La investigación se justificó socialmente por el avance en la seguridad vial a la que conduce el hallazgo, técnicamente por la identificación del compuesto óptimo para lograr frenados eficientes y económicamente por la toma de decisiones más fundamentadas en cuanto al mantenimiento. El objetivo fue comparar la eficiencia de frenado de un vehículo liviano incorporando pastillas de freno con el material de tres compuestos, orgánico, semimetálico o composite y cerámico. La hipótesis planteó que el tipo del compuesto influye en la eficiencia del frenado y el material semi metálico presenta mejores resultados. La investigación es del tipo aplicada, nivel descriptivo-comparativo, con enfoque cuantitativo y un diseño experimental. Se emplea como técnica de recolección de datos la observación instrumental mediante pruebas en un frenómetro calibrado, siguiendo los parámetros establecidos por la norma ISO 21069-2. Los resultados obtenidos mostraron que la eficiencia más alta corresponde al material semi metálico (74,77 %), seguida del compuesto de cerámica (71,07 %), y al último, las pastillas de orgánico (65,17 %). En la discusión se destacó la superioridad del compuesto semimetálico, y se muestran los

⁸ **Caicedo, Jimmy & Palacios, Walter (2024)**. Análisis de la eficiencia del frenado utilizando distintos materiales de fricción en los elementos frenantes en un vehículo tipo automóvil [Artículo de investigación, Instituto Superior Tecnológico Luis Tello].

resultados comparativos de otros estudios, que también revelan las variaciones considerables de la eficiencia por el tipo de compuesto. En conclusión, se confirmó que el compuesto es un factor directo a la eficiencia del frenado, por lo que se recomienda a los conductores el uso de las pastillas semi metálicas para asegurar la máxima seguridad en los vehículos livianos, así como la continuación de las investigaciones que permitan revelar los demás factores de influencia en el desempeño del sistema de frenos.

1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

En el Instituto de Transportes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (INTRAFIM-UNI), no existe un sistema que permita medir experimentalmente la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de la categoría M1. Este tipo de sistema se caracteriza por emplear frenos de disco con pastillas en el eje delantero y frenos de tambor con zapata en el eje posterior.

La ausencia de este equipamiento impide la realización de prácticas y estudios técnicos en los que sea posible medir o registrar los parámetros clave como la distancia de frenado, fuerza de frenado, temperatura, presión hidráulica en las cañerías del líquido de freno, velocidad inicial y masa vehicular. Todo lo anterior responde a que no se dispone de tecnología e infraestructura adecuada para evaluar el desempeño de los sistemas de frenos bajo condiciones controladas. Como consecuencia, las actividades académicas e investigativas se realizan en un enfoque puramente teórico o simulado con la ausencia total de la validación práctica, el aprendizaje experimental queda de lado, restringiendo el análisis técnico riguroso requerido en el ámbito del transporte y la seguridad vial.

Asimismo, la carencia de este sistema impide que docentes, personal técnico o usuarios autorizados del Instituto puedan contar con un espacio adecuado para realizar evaluaciones técnicas del sistema de frenos para los que cuentan con vehículos livianos de la categoría M1. Actualmente, no existe un lugar dentro del INTRAFIM-UNI que permita verificar, bajo condiciones controladas y con respaldo técnico, el estado real del sistema de frenado convencional, lo cual limita la posibilidad de validar su funcionamiento, detectar fallos preventivamente o generar datos útiles para fines formativos o de mantenimiento.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿De qué manera se mide la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI?

1.3.2 Problemas Específicos

- a. ¿Cuáles son los parámetros clave que se identifican para la evaluación de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1?
- b. ¿Qué tipo de equipos mecánicos y de instrumentación se requieren para el sistema de medición de eficiencia?
- c. ¿Cuáles son los procesos necesarios para el ensamblaje de los componentes que forman parte del sistema de medición y su posterior aplicación en la evaluación de la eficiencia de los frenos convencional antes y después del mantenimiento preventivo?

1.4 Justificación e importancia

La investigación resuelve una necesidad específica identificada en el INTRAFIM-UNI, que es la falta de un sistema que permita medir experimentalmente la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. Esta carencia limita, no solo al desarrollo de habilidades prácticas en los estudiantes, sino que también impide recopilar información técnica relevante y confiable que permita validar el funcionamiento real del sistema de frenos en un entorno académico, operativo y de investigación.

Justificación tecnológica

Desde un enfoque tecnológico, esta investigación plantea el diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un sistema capaz de evaluar parámetros clave como la temperatura de los frenos, distancia de frenado, la presión hidráulica, la velocidad inicial y la masa del vehículo. Este equipamiento se implementará para incorporar conocimiento mecánico e instrumental y consolidar una solución técnica innovadora para las pruebas de frenado en un entorno controlado. Esto también ayudará en la validación empírica de

modelos teóricos y simulaciones computacionales, incentivando una cultura de investigación basada en datos reales y no en teorías o supuestos.

Justificación económica

Esta propuesta requiere una inversión con alto potencial de retorno para la institución, debido a que, la existencia de un sistema de medición permitirá ofrecer servicios de medición y diagnóstico de frenos a terceros, incluyendo a vehículos particulares de docentes, personal técnico, así como externos autorizados. Esto podría generar ingresos a través de convenios, asesorías o servicios especializados, contribuyendo a la sostenibilidad económica del instituto. Además, disminuirá la necesidad de acudir a centros externos para la realización de pruebas experimentales, mejorando el uso de recursos y fortaleciendo la autonomía técnica del INTRAFIM-UNI.

Justificación social

Esta investigación tiene gran relevancia por el impacto que genera en la formación integral de los estudiantes en ingeniería mecánica y transporte. El sistema de medición facilitará a los alumnos desarrollar competencias prácticas en análisis de seguridad vehicular, mantenimiento preventivo y diagnóstico técnico de sistemas de frenado, los cuales son de vital importancia para su futuro profesional. Asimismo, contribuirá a mejorar la cultura de seguridad vial, al permitir la detección temprana de fallas en sistemas de frenos y el desarrollo de investigaciones aplicadas para el transporte seguro.

1.5 Objetivo del estudio

1.5.1 Objetivo general

Proponer un sistema para medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Identificar los parámetros clave que deben evaluarse para medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.
- b. Determinar el tipo de equipos mecánicos e instrumentos necesarios para el sistema de medición de eficiencia.

- c. Describir los procesos requeridos para el ensamblaje de los componentes del sistema de medición y su aplicación en la comparación del desempeño de los frenos convencional antes y después de un mantenimiento preventivo.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

El sistema propuesto permite medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.

1.6.2 Hipótesis específica

- a. La identificación de los parámetros clave permite una evaluación precisa de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.
- b. La selección adecuada de equipos mecánicos e instrumentos de medición garantiza el correcto funcionamiento del sistema de medición de eficiencia de frenado.
- c. El ensamblaje correcto de los componentes mecánicos y de instrumentación asegura la operatividad del sistema para evaluar el comportamiento de los frenos convencionales antes y después de un mantenimiento preventivo.

1.7 Variables y operacionalización de variables

1.7.1 Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Propuesta de un sistema de medición (VI)	Es el diseño técnico y funcional de un conjunto de dispositivos e instrumentos que permiten registrar, procesar y analizar parámetros físicos asociados al proceso de frenado, con el propósito de evaluar el desempeño del freno convencional en vehículos livianos.	Implementación de un sistema experimental compuesto por sensores, instrumentación y componentes físicos que permiten medir variables como presión hidráulica, temperatura, velocidad y distancia de frenado bajo condiciones controladas.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Arquitectura funcional 2. Selección instrumental 3. Protocolos de instalación 4. Capacidad de Medición de datos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura montada según esquema. 2. Tipo de sensores instalados 3. Procedimiento ensamblado según pasos definidos 4. Lectura de parámetros sin errores 	Categoría / Técnica-descriptiva
Eficiencia del freno convencional (VD)	Capacidad del sistema de freno para detener el vehículo de manera segura, en el menor tiempo y distancia posible, bajo distintas condiciones operativas.	Relación entre los datos registrados en el sistema y el desempeño del frenado.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desempeño del frenado 2. Energía cinética liberada 3. Fuerza de frenado 4. Comportamiento térmico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Distancia de frenado (m) 2. Velocidad del vehículo (m/s) 3. Presión hidráulica líquido de freno (bar) 4. Temperatura de los frenos (°C) 	metros, metros por segundo, bar, °C

1.8 Metodología de la investigación

La investigación tiene un enfoque metodológico que permite vincular el planteamiento del problema con los objetivos trazados, a través procedimientos. Se ha determinado el nivel y tipo de investigación más adecuado, así como el diseño metodológico que encaminará la ejecución del estudio. Asimismo, se identifican de forma concreta la unidad de análisis, la población y muestra seleccionada, las fuentes de información, las técnicas e instrumentos para la recolección de datos, y los métodos de procesamiento y análisis aplicables. Este enfoque permite garantizar confiabilidad de los resultados, facilitando la validez de la hipótesis y el cumplimiento de los objetivos, en el contexto de un sistema para medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.

1.8.1 Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación es el sistema de medición propuesto para evaluar la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. Este sistema es externo al vehículo y se compone de instrumentos e indicadores que registran parámetros físicos del proceso de frenado, como la presión hidráulica, la temperatura, la velocidad y la distancia de frenado, bajo condiciones controladas.

1.8.2 Tipo, Enfoque, Nivel de Investigación

La presente tesis se orienta a una investigación del tipo aplicada, ya que se busca resolver una necesidad específica mediante el diseño de un equipo de medición. Tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos. El nivel de investigación es explicativo correlacional, ya que, se pretende establecer la relación entre los distintos parámetros del sistema de freno con los resultados obtenidos en las pruebas.

1.8.3 Diseño de la Investigación.

El diseño de investigación utilizado es cuasiexperimental, ya que se trabaja con una variable independiente para validar como influye en la variable dependiente. Aunque no se

manipulan todos los factores externos (humedad y temperatura del ambiente), las pruebas se ejecutaran bajo condiciones controladas dentro del entorno académico del INTRAFIM.

1.8.4 Fuentes de Información.

- Fuentes primarias: Valores obtenidos a través del sistema de medición, con el uso de sensores y equipos de medición aplicados sobre un vehículo liviano de categoría M1.
- Fuentes secundarias: Normas, artículos científicos, tesis de otros autores, documentos institucionales relacionados con sistemas de freno y diseño de bancos de prueba y manuales de la carrera de Ingeniería Mecánica.

1.8.5 Población y Muestra.

- La población de la investigación está conformada por los vehículos livianos de categoría M1 del parque automotor.
- La muestra utilizada para la tesis es un vehículo en específico de la marca Datsun, modelo JNL710 que cuenta con sistema de freno convencional, sobre el cual se aplicaron las pruebas experimentales.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

Para la recolección de datos se utilizaron las siguientes técnicas e instrumentos:

- Técnica de observación instrumental directa: para captar los valores de los parámetros medibles y el comportamiento del sistema de frenos durante las pruebas.

Instrumentos utilizados:

- Trasmisor de presión 0-35 bar (presión hidráulica).
- Controlador universal (lectura presión).
- Cámara Termográfica FLIR E6 (medición de temperatura).
- App móvil de velocidad.
- Medidor Láser Bosch

1.8.7 Análisis y Procesamiento de Datos.

Los datos obtenidos serán organizados y procesados en tablas dinámicas de Excel, aplicando fórmulas matemáticas y físicas correspondientes para poder determinar la relación entre los parámetros medidos (temperatura, presión, distancia, tiempo) y la eficiencia del sistema de frenado convencional. Los resultados permitirán verificar la funcionalidad del sistema de medición como herramienta para estudios técnicos y académicos.

Capítulo II. Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1 Marco teórico

El sistema de frenos es uno de los subsistemas más importantes para la seguridad de un vehículo, ya que permite reducir y anular el desplazamiento de forma controlada por parte del conductor. Para estudio de la eficiencia del frenado, se requiere comprender los principios mecánicos y físicos, el análisis de los materiales que estarán en constante fricción, y la aplicación normas o estándares. Este marco teórico fundamenta la investigación en teorías de la dinámica vehicular, principios hidráulicos, estudio de materiales, construyendo así las bases para la propuesta para medir la eficiencia del frenado.

2.1.1 Estándares y Normas

ISO 611:2003. Norma Internacional, que nos ofrece un lenguaje técnico donde se definen los principales términos relacionados con el sistema de frenado de vehículos, incluyendo componentes como el sistema de frenos servicio, emergencia y estacionamiento. Asimismo, cuenta con conceptos relacionados con los mecanismos de control, transmisión y disipación de energía que forman parte del proceso de frenado. Esta base terminológica resulta una base importante para comprender técnicamente cómo está compuesto un sistema de frenos y evaluar su desempeño en distintas condiciones (International Organization for Standardization, 2003).

49 CFR 571.135. Norma de seguridad vial en Estados Unidos, aplicable a sistemas de freno hidráulicos en vehículos livianos, Detalla los criterios de diseño y procedimientos de ensayo para garantizar el desempeño seguro de los frenos, incluyendo las pruebas de distancia de frenado, funcionamiento de los frenos tanto en condiciones normales como de emergencia, y la resistencia al reducción de capacidad de frenado por temperatura, con el fin de garantizar la seguridad de los pasajeros y la estabilidad del vehículo (U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2024).

D.S. N° 025-2008-MTC. Reglamento Nacional de Vehículos en el Perú. Establece los requisitos mínimos de seguridad que son obligatorios para la circulación de los vehículos automotores, incluyendo las especificaciones que deben cumplir los sistemas de frenos, con el objetivo de garantizar un funcionamiento seguro y correcto, de acuerdo con la categoría y el uso del vehículo (Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC], 2008).

R.D. N° 11581-2008-MTC/15. Resolución Directoral donde se aprueba los procedimientos de revisión e inspección técnica vehicular en el Perú. Detalla los métodos y los criterios de evaluación que deben cumplir los sistemas de frenos, tales como la eficiencia, simetría y estado actual de operatividad, asegurando con esto la seguridad de los vehículos en circulación (MTC, 2008).

2.1.2 Fundamentos físicos de frenado

Segunda ley de Newton

La Segunda Ley de Newton constituye el fundamento de la dinámica vehicular y es esencial para comprender el proceso de frenado. Esta ley establece que la fuerza neta aplicada en una dirección sobre un objeto proporcional a la aceleración que adquiere en la misma dirección. En el caso del frenado, esta fuerza está opuesta al sentido de movimiento del vehículo, por lo que, se genera una desaceleración. La relación se detalla mediante la ecuación 1.

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

donde:

F = fuerza neta aplicada, N

m = masa del vehículo, kg

a = aceleración (negativa durante el frenado), m/s^2

Esta ley permite determinar la magnitud de la fuerza de frenado necesaria para obtener una desaceleración definida, considerando la masa total del vehículo. El cumplimiento de esta condición es importante para asegurar que el vehículo se detenga en una distancia segura y controlada (Gillespie, 1992).

Energía Cinética de movimiento y trabajo realizado en el frenado.

En el proceso de frenado, el sistema de frenos transforma la energía cinética del vehículo en calor mediante la fricción. Esta disipación térmica se genera principalmente entre las superficies de contacto, como tambor-zapata o disco-pastilla. La cantidad de energía que se transforma depende de la velocidad y la masa del vehículo, como se expresa a continuación en la ecuación 2.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2)$$

donde:

E_k = energía cinética, J

m = masa del vehículo, kg

v = velocidad del vehículo antes del frenado, m/s

El trabajo desarrollado por el sistema de frenos para detener el vehículo es igual a la energía cinética inicial, tal como vemos en la ecuación 3.

$$U_w = F \cdot d_f \quad (3)$$

donde:

U_w = trabajo realizado por los frenos, J

F = fuerza promedio de frenado, N

d_f = distancia de frenado, m

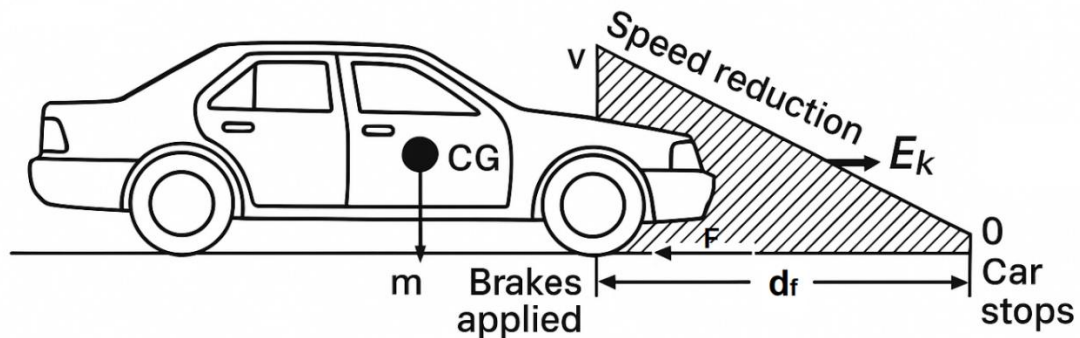
Igualando ambas fórmulas matemáticas, se obtiene fuerza de frenado media o promedio, tal como se detalla en la siguiente ecuación 4:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot d_f} \quad (4)$$

Esta ecuación es fundamental para el correcto dimensionamiento de los componentes del sistema de freno, ya que calcula la fuerza que debe generar el sistema para detener por completo el vehículo de forma segura a una determinada distancia de frenado, tal como se visualiza en Figura 1 (Heisler, 2002).

Figura 1

Condiciones de frenado de un vehículo



Nota. Advanced Vehicle Technology (p. 450), por Heisler H., 2002, Butterworth Heinemann.

Fuerza de fricción y coeficiente de fricción

La eficiencia de frenado es directamente proporcional al coeficiente de fricción (μ) entre la llanta y la superficie de rodadura. A continuación, se detalla la ecuación 5 que describe esta relación.

$$\mu = \frac{F_f}{N} \quad (5)$$

donde:

F_f = fuerza de fricción, N

μ = coeficiente de fricción (adimensional)

N = fuerza normal sobre las ruedas, N

El coeficiente de fricción está determinado por la naturaleza de las superficies de contacto (suelo y llantas), y es muy importante para calcular la fuerza de frenado generada por el sistema. Por lo que es importante entender cómo se comporta la fricción durante el proceso de detención, ya que, en condiciones reales el coeficiente de fricción es menor a uno debido a la adhesión insuficiente entre la llanta y la superficie de rodadura (Heisler, 2002).

Eficiencia de frenado con respecto a la fricción

La eficiencia del frenado es un valor fundamental para comprender el desempeño del sistema de frenos del vehículo. Se define matemáticamente como la relación entre la

fuerza frenado que se puede generar en el sistema y el peso del vehículo, tal como se detalla en la siguiente ecuación 6.

$$\eta = \frac{F}{W} \cdot 100\% \quad (6)$$

donde:

η = eficiencia de frenado, %

F = fuerza de frenado, N

W = peso del vehículo, N

La eficiencia de frenado por lo general es menor al 100%, debido a factores externos como la adherencia limitada en la superficie o carretera y los neumáticos, la pendiente de la vía, o un sistema de frenos sin mantenimiento. Estos factores se reflejan en el factor de adhesión y la condición de la superficie (Heisler, 2002).

Coefficiente de adherencia

El coeficiente de adherencia (μ_a) es un equivalente del coeficiente de fricción, pero en la práctica, el μ_a se utiliza para mostrar el límite real de adherencia en condiciones de frenado, considerando que el neumático debe permanecer girando de forma controlada hasta que el vehículo se detenga, evitando así el deslizamiento, los valores del μ_a varían en función del tipo de superficie y su estado, según como se muestra en la Tabla 1 (Heisler, 2002).

Tabla 1*Coefficientes de adherencia para diferentes superficies de rodadura*

Item	Material	Condición	Coefficiente adherencia (μ)
1	Concreto, asfalto grueso	Seco	0,8
2	Asfalto, betún arenado	Seco	0,6
3	Concreto, asfalto grueso	Húmedo	0,5
4	Asfalto	Húmedo	0,4
5	Asfalto arenado	Húmedo	0,3
6	Asfalto arenado	Graso	0,25
7	Asfalto, nieve compactada	Graso	0,2
8	Asfalto, nieve compactada	Seco	0,15
9	Hielo	Húmedo	0,1

Nota. Adaptado de Advanced Vehicle Technology (p. 452), por Heisler H., 2002, Butterworth Heinemann.

La fuerza de fricción generado por la adherencia del neumático y la fuerza de frenado siempre están opuesto al sentido de movimiento del vehículo, por lo que, cuanto mayor sea el valor de estas fuerzas, el vehículo tendrá un mejor frenado. A continuación, se muestra los diferentes valores de coeficientes de adherencia de los neumáticos sobre calzadas de asfalto seco y mojado en la Tabla 2.

Tabla 2*Coefficientes de adherencia según velocidad del vehículo*

Item	Velocidad (Km/hr)	Estado de los neumáticos	Calzada asfaltada seca	Calzada asfaltada mojada
1	< 50	Nuevo	0.8	0.65
		Usado	0.9	0.5
2	< 50 ; 80 >	Nuevo	0.75	0.6
		Usado	0.85	0.2
3	< 80 ; 120 >	Nuevo	0.7	0.55
		Usado	0.8	0.2

Nota. Adaptado de Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209, por García R. et al, 2018, INGE CUC. Vol. 14.

Distancia de frenado

El desempeño del frenado puede ser descrito mediante la segunda ley de Newton en la dirección longitudinal que desacelera, se presenta la ecuación 7 que calcula la distancia de frenado (Gillespie, 1992).

$$d_f = \frac{m.v^2}{g.F_r} \quad (7)$$

donde:

d_f = distancia de frenado, m

v = velocidad inicial antes de aplicar los frenos, m/s

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

F_r = fuerza de frenado, N

Efecto de la resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica tiene un papel importante en la dinámica de frenado, cuando se tienen altas velocidades por parte del vehículo. El arrastre aerodinámico se calcula como una función cuadrática de la velocidad del vehículo, y su efecto es notorio a medida que la velocidad va aumentando. A continuación, se detalla la ecuación 8.

$$F_a = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (8)$$

donde:

F_a = fuerza aerodinámica, N

C_d = coeficiente de arrastre (adimensional)

ρ = densidad del aire

A = área frontal del vehículo

v = velocidad del vehículo

La contribución de la resistencia aerodinámica al proceso de frenado reduce la distancia de detención, teniendo en cuenta que esta resistencia aumenta con la velocidad del vehículo, los valores del coeficiente de fricción se detallan en la siguiente Tabla 3 (Gillespie, 1992).

Tabla 3

Valores típicos y rangos de coeficientes de arrastre

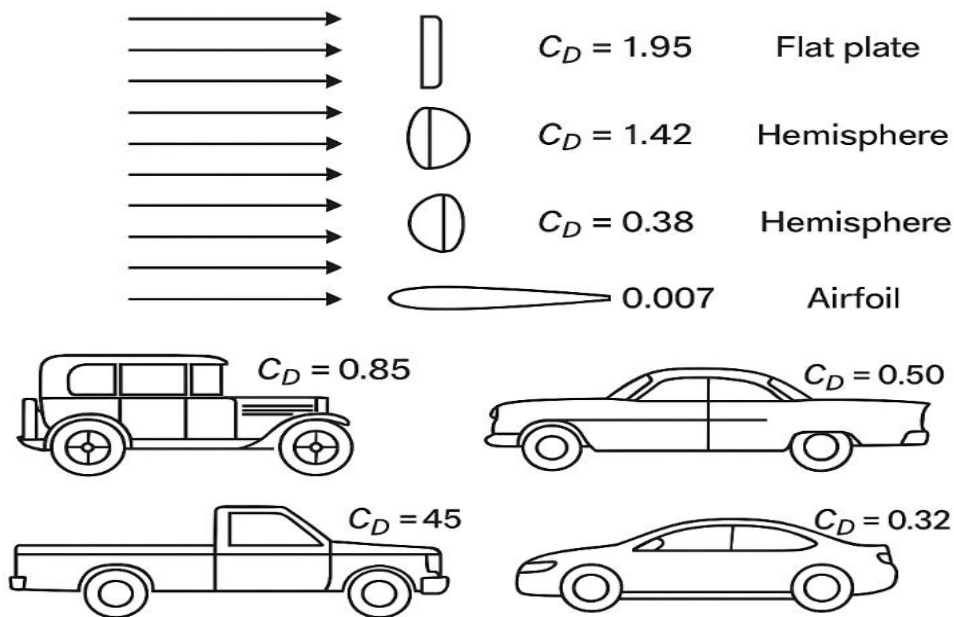
Item	Tipo de Vehículo	Coefficiente de Arrastre (C_D)
1	Vehículo livianos	0.22 – 0.4
2	Coche deportivo	0.28 – 0.4
3	Furgoneta ligera	0.35 – 0.45
4	Buses	0.40 – 0.8
5	Camiones articulados	0.55 – 0.8
6	Camión con remolque	0.7 – 0.9

Nota. Adaptado de Advanced Vehicle Technology (p. 593), por Heisler H., 2002, Butterworth Heinemann.

El coeficiente de arrastre varía ampliamente según el perfil aerodinámico del vehículo, considerando que el aire que se aproxima a la carrocería no tiene ningún componente lateral, es decir, que se mueve en línea recta a lo largo del eje longitudinal del vehículo. A continuación, se muestra la Figura 2.

Figura 2

Coefficiente aerodinámico en diferentes modelos de vehículos



Nota. Adaptado de Advanced Vehicle Technology, por Heisler H., 2002, Butterworth Heinemann.

Fuerzas que actúan en las llantas del vehículo

Las llantas vehiculares están sometidas a un conjunto de fuerzas que actúan de forma simultánea y determinan el comportamiento dinámico. Estas fuerzas principales se muestran en la Figura 3 (Herrera & Zambrano, 2014).

Figura 3

Esquema de fuerzas que actúan en las llantas del vehículo



- Fuerza motriz, es la que se genera por el motor y se transmite a través del neumático para producir el movimiento del vehículo.
- Fuerza de guiado lateral, es la que permite mantener la dirección del vehículo, asegurando su estabilidad durante el desplazamiento.
- Fuerza de adherencia, es la que depende del peso y actúa sobre el neumático, dependiendo de las características del contacto entre el neumático y la superficie de rodamiento.
- Fuerza de frenado, es la que actúa en sentido opuesto al movimiento de la rueda.
- Fuerza normal, generada sobre los neumáticos tanto del eje delantero como del eje posterior, es la fuerza encargada de empujar a las llantas y se genera por el peso

total del vehículo, siendo el valor total de fuerza normal igual al peso ejercido, pero en sentido opuesto.

Transmisión del peso durante el proceso de frenado

Durante el proceso de frenado, ocurre una transferencia de peso significativa hacia los ejes del vehículo. Este fenómeno se explica a partir del principio enunciado por Blaise Pascal, quien estableció que los líquidos sometidos a presión ejercen una fuerza uniforme en todas las direcciones. Es por esta propiedad, que los fluidos como el líquido de frenos se utilizan para transmitir fuerzas dentro del sistema hidráulico del vehículo, funcionando como un medio incompresible. La relación entre la presión y la fuerza ejercida se expresa en la ecuación 13.

$$P = \frac{F}{A} \quad (13)$$

donde:

P = presión hidráulica del sistema, Pa

F = fuerza ejercida en los frenos, N

A = área donde actual el líquido de freno, m²

Esto indica que la fuerza de frenado en cada neumático depende directamente de la presión hidráulica del sistema y del área del pistón que recibe dicha presión, por lo que al variar el diámetro del émbolo de cada rueda es posible modificar la fuerza de frenado generada, aun cuando la presión del sistema se mantenga constante. Por esta razón, en el diseño del sistema de frenos se emplean pistones de mayor diámetro en las ruedas delanteras y de menor diámetro en las traseras, lo que permite una distribución más eficiente de las fuerzas de frenado y contribuye a evitar el bloqueo de las ruedas posteriores durante un proceso de frenado exhaustivo (Herrera & Zambrano, 2014).

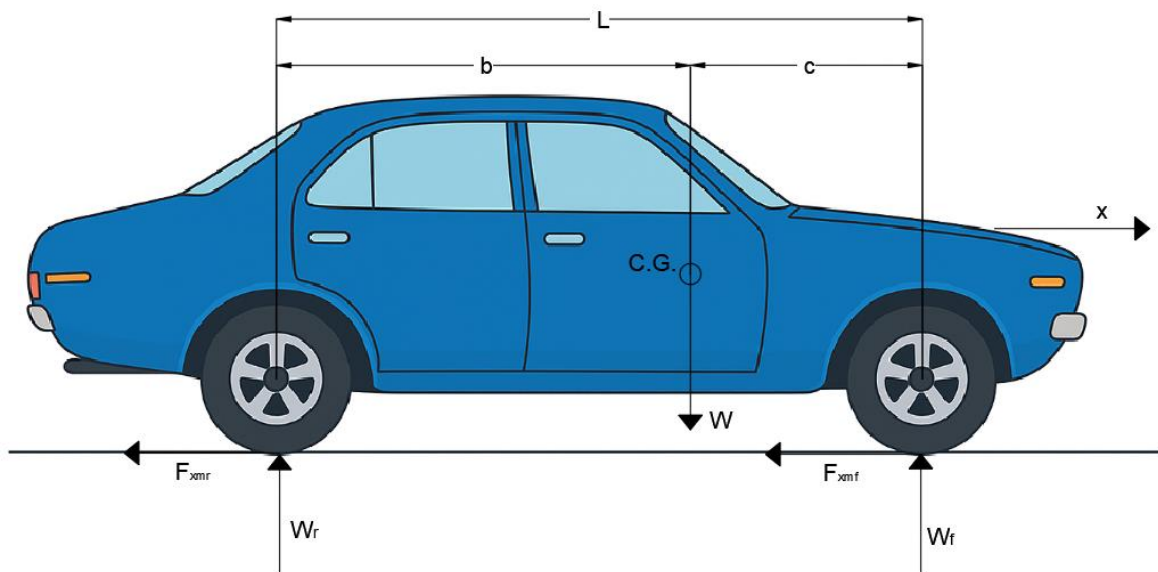
Proporcionamiento del frenado

La proporción de frenado se refiere a la distribución de la fuerza de frenado entre los ejes posterior y delantero del vehículo motorizado. Esta distribución depende de varios

factores, como la carga dinámica transferida entre los ejes y el coeficiente de fricción de cada eje. En el proceso de frenado, parte de la carga se transfiere de los ejes traseros a los delanteros debido a la desaceleración, lo que genera una variación en la fuerza disponible para frenar cada eje, ver Figura 3 (Heisler, 2002).

Figura 4

Esquema de proporcionalidad en un vehículo



La finalidad de analizar la proporción de frenado es evitar el bloqueo prematuro de cualquiera de los ejes durante el frenado, especialmente en condiciones extremas de carga o en superficies con diferente coeficiente de fricción. Un sistema bien diseñado ajusta la distribución de la fuerza de frenado para mejorar la eficiencia de frenado, por esto se presenta a continuación la siguiente ecuación 9 y 10 (Heisler, 2002).

$$W_f = \frac{c}{L} \cdot W + \frac{h}{g} \cdot W \cdot a_x \quad (9)$$

$$W_r = \frac{b}{L} \cdot W - \frac{h}{g} \cdot W \cdot a_x \quad (10)$$

donde:

W_f = carga estática en el eje delantero, N

W_r = carga estática en el eje posterior, N

c y b = distancias respecto al centro de gravedad del vehículo, m

h = altura del centro de gravedad del vehículo, m

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

a_x = desaceleración del vehículo, m/s²

Fuerza de frenado máxima por eje

La máxima fuerza de frenado sobre cada eje depende de la carga dinámica transferida y del coeficiente de fricción en cada uno de los ejes. La fórmula para la máxima fuerza de frenado en el eje posterior y delantero se detalla en la siguiente ecuación 11 y 12 (Heisler, 2002).

$$F_{xmf} = \mu_p \left(\frac{c}{L} \cdot W + \frac{h}{g} \cdot W \cdot a_x \right) \quad (11)$$

$$F_{xmr} = \mu_p \left(\frac{b}{L} \cdot W - \frac{h}{g} \cdot W \cdot a_x \right) \quad (12)$$

donde:

F_{xmf} = fuerza máxima de frenado en el eje delantero, N

F_{xmr} = fuerza máxima de frenado en el eje posterior, N

μ_p = coeficiente de fricción pico (adimensional)

Transferencia de Calor por convección

La transferencia de calor describe el proceso por el cual la energía térmica se transfiere de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura. En términos generales, la cantidad de calor absorbida por un cuerpo puede calcularse como se detalla en la ecuación 13.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

donde:

Q = Cantidad de calor liberado, J

m = masa del cuerpo, kg

C_p = calor específico del material o fluido, J/kg.°C

ΔT = variación de temperatura, °C

La energía liberada por el sistema de frenos proviene de la energía cinética del vehículo se transforma en energía calorífica, esta es disipada por los frenos del eje delantero y del eje posterior (García et al., 2018).

2.1.3 Sistema de freno vehicular

El sistema de frenos de un vehículo es uno de los mecanismos más críticos para la seguridad vial, ya que permite controlar y detener el automóvil de forma precisa. Junto con el sistema de dirección y cambio de marchas, el frenado es una de las acciones más frecuentes durante la conducción. Por esta razón, el diseño de los componentes del sistema debe garantizar que el esfuerzo ejercido por el conductor sobre el pedal se transmita de manera óptima, asegurando una respuesta rápida y efectiva con la menor variación posible en la fuerza aplicada (Reif, 2014).

Circuitos de frenado

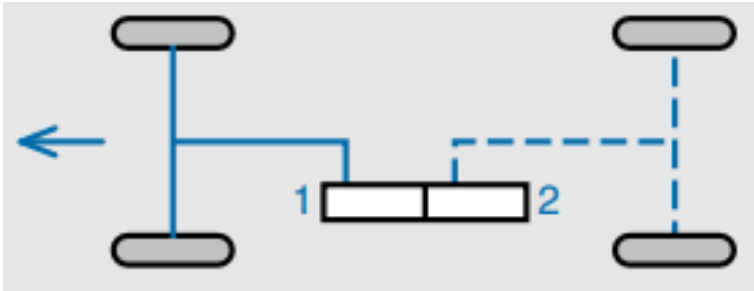
La normativa actualmente vigente, considera que los vehículos deben contar con dos sistemas de frenos que trabajen de forma independiente. Uno de estos sistemas debe ser el principal, capaz de detener el vehículo bajo cualquier ocasión en la que el conductor lo requiera, mientras que el otro actúa como sistema auxiliar, sirviendo para bloquear las ruedas cuando el vehículo está estacionado.

Según la normativa DIN 74000 (1992), considerando solo circuito principal de frenos, existen diversas configuraciones disponibles y se exige una instalación del sistema de frenos principal con dos circuitos, los cuales se configuran de diferentes maneras utilizando letras, denominadas distribuciones HH, LL, HI, X y II. La forma de estas letras se asemeja, en gran medida, a la disposición de las cañerías que forman parte de sistema de frenos, con el circuito principal instalado entre los frenos delanteros y traseros del vehículo. Las configuraciones más empleadas en la distribución de los circuitos de freno son las siguientes:

- Distribución "II", El sistema de freno distribuye el circuito principal en el eje delantero y otro en el eje trasero, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Distribución II del circuito de frenos

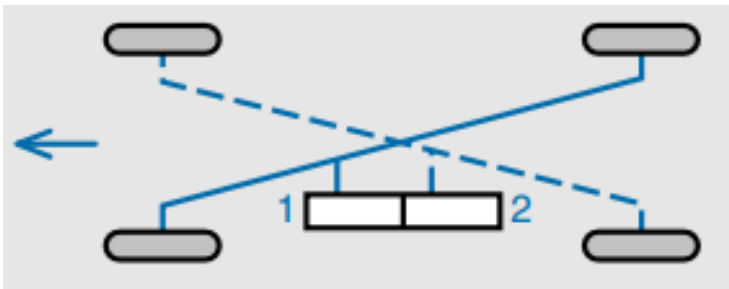


Nota. Adaptado de Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000), por Deutsches Institut für Normung, 1992.

- Distribución "X", En este caso, los circuitos de freno se distribuyen en diagonal, con cada uno actuando en una rueda del eje delantero y en el opuesto del eje trasero, tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Distribución X del circuito de frenos

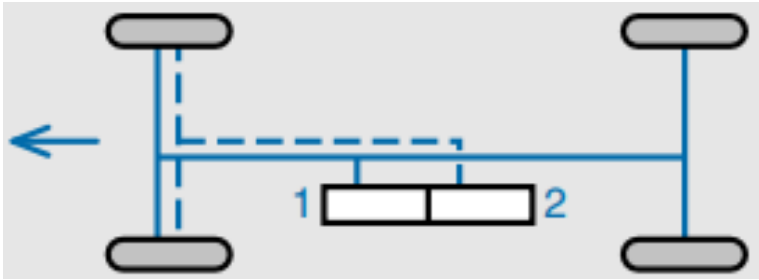


Nota. Adaptado de Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000), por Deutsches Institut für Normung, 1992.

- Distribución "HI", Los circuitos de freno se distribuyen en los ejes delantero y trasero, de manera que uno actúa en ambos ejes, mientras que el otro lo hace solo en el eje delantero, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Distribución HI del circuito de frenos

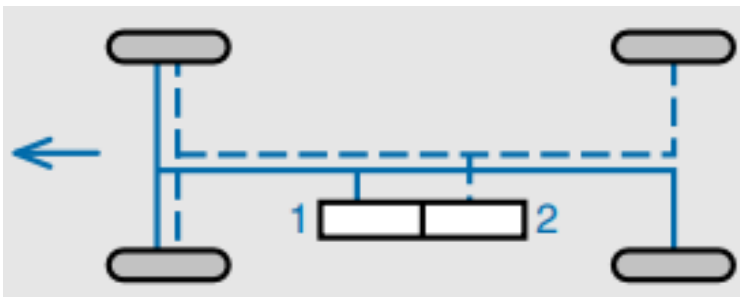


Nota. Adaptado de Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000), por Deutsches Institut für Normung, 1992.

- Distribución "LL", Similar a la distribución X, pero en este caso el sistema de freno en los ejes delantero y trasero se activa en una rueda de cada uno de ellos, tal como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Distribución LL del circuito de frenos



Nota. Adaptado de Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000), por Deutsches Institut für Normung, 1992.

- Distribución "HH", Los circuitos de freno se distribuyen de manera similar al anterior, pero aquí se activa uno en el eje delantero y otro en el trasero, con un control adicional para cada circuito, tal como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Distribución HH del circuito de frenos



Nota. Adaptado de Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000), por Deutsches Institut für Normung, 1992.

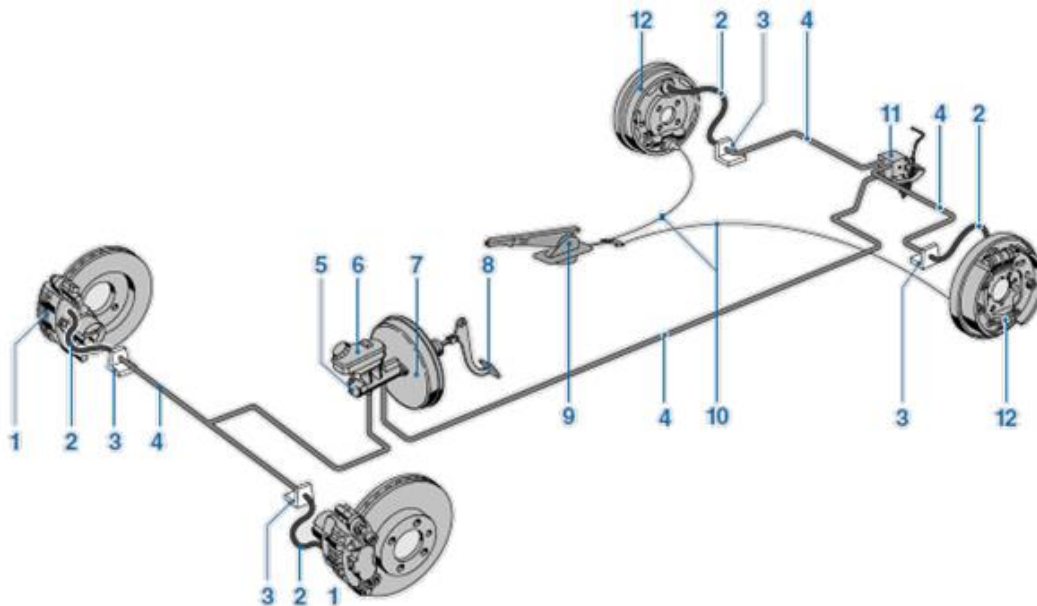
Estas configuraciones están relacionadas directamente en el comportamiento y seguridad del vehículo, permitiendo, según el caso, una distribución adecuada de la fuerza de frenado. Este diseño resulta crucial para garantizar la seguridad del vehículo, especialmente en condiciones extremas de carga o en superficies con distinto coeficiente de fricción.

Sistema de freno convencional de doble circuito y sus componentes

Un sistema de frenos hidráulico de doble circuito con configuración delantera/trasera y sin sistemas de asistencia electrónica. En este sistema, al accionar el pedal de freno, el conductor aplica presión que se transmite mediante una varilla de empuje al servofreno. Este elemento amplifica la fuerza generada por el conductor y la transmite al cilindro maestro. A continuación, se detalla la configuración del sistema de freno convencional y los elementos que lo conforman en la Figura 10.

Figura 10

Componentes del sistema de freno convencional de doble circuito



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 40), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

En este sistema, al accionar el pedal de freno (8), el conductor aplica presión que se transmite mediante una varilla de empuje al servofreno (7). Este elemento amplifica la fuerza generada por el conductor y la transmite al cilindro maestro (6).

El cilindro maestro convierte la fuerza mecánica en presión hidráulica, empujando el fluido de freno a través de dos cámaras separadas hacia las tuberías (4) y mangueras (2) de freno. Este fluido llega a los frenos de disco delanteros (1) y a los frenos de tambor traseros (12). En caso de que uno de los circuitos falle, el otro circuito sigue siendo funcional, asegurando un frenado de emergencia.

El sistema incluye un depósito de fluido de frenos (6), conectado al cilindro maestro (5), que compensa las variaciones de volumen del líquido por desgaste de las pastillas o temperatura. Además, la válvula reguladora de presión (11) ajusta la fuerza de frenado en el eje trasero, evitando el sobre frenado cuando se transfiere más peso al eje delantero durante una desaceleración intensa (Reif, 2014).

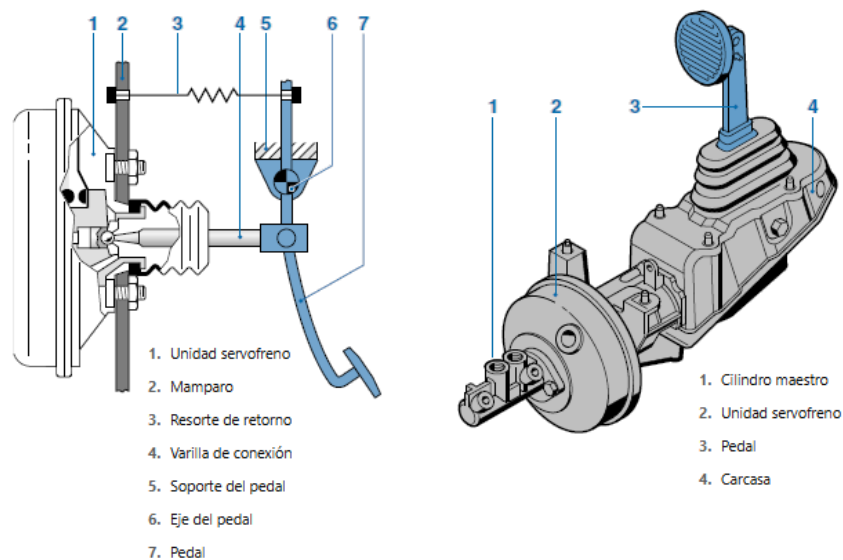
Por otro lado, el freno de estacionamiento está vinculado a los frenos traseros (12) y se acciona mediante una palanca de mano (9) y un cable de freno (10)

Pedal de freno

El pedal de freno cumple un rol fundamental en el sistema de frenado, ya que es el componente a través del cual el conductor transmite la fuerza al sistema hidráulico. Su diseño debe permitir una respuesta sensible y precisa ante la presión ejercida por el pie del conductor, garantizando así una acción de frenado segura y eficiente. Existen principalmente dos configuraciones de pedales de freno, tal como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Pedal suspendido y pedal de piso (integrado al módulo de freno)



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 41), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Pedal suspendido, es el más común en vehículos modernos, el pedal se encuentra suspendido y fijado a un soporte mediante un eje. Una vez que se libera el pedal, un resorte de retorno anclado al mamparo frontal del vehículo lo devuelve automáticamente a su posición neutral cuando no está en uso.

Pedal de piso (integrado al módulo de freno), el pedal, el servofreno y el cilindro maestro forman una unidad compacta ubicada generalmente bajo el piso del vehículo, en la zona de los pies del conductor. Para proteger estos componentes de la suciedad y la humedad, el conjunto se encuentra encapsulado en una carcasa sellada.

Durante el proceso de frenado, el conductor aplica presión al pedal, venciendo la resistencia del resorte de retorno. Esta acción permite que la fuerza se transmita al servofreno a través de una varilla de empuje, lo que activa el sistema hidráulico que finalmente acciona los frenos (Reif, 2014).

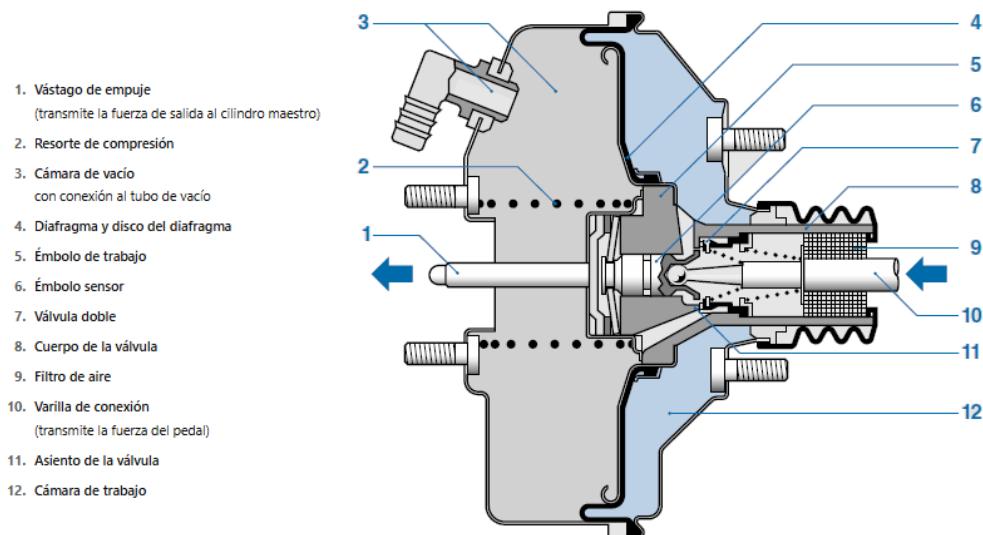
Unidad de servofreno

El servofreno es un componente esencial en el sistema de frenos, ya que se encarga de amplificar la fuerza que el conductor aplica sobre el pedal. Su función principal es reducir el esfuerzo físico necesario para frenar, sin comprometer la sensibilidad y respuesta del sistema.

En la mayoría de vehículos, el servofreno está acoplado al cilindro maestro, formando un solo conjunto. Esta unidad aprovecha fuentes de energía del propio vehículo, como el vacío del múltiple de admisión en motores de gasolina, o el vacío generado por una bomba en motores diésel. Existen dos tipos comunes de servofrenos: el de cámara dual y el de cámara cuádruple, siendo este último más potente, tal como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Unidad servofreno de vacío de doble cámara



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 42), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Durante la operación, al no estar pisado el pedal de freno, ambas cámaras del servofreno (cámara de trabajo y cámara de vacío) están conectadas al vacío. Al iniciar el frenado, se interrumpe esta conexión y se permite la entrada de aire atmosférico en la cámara de trabajo. La diferencia de presión resultante actúa sobre un diafragma, generando una fuerza adicional que se suma a la presión ejercida por el conductor.

Este aumento de fuerza facilita el desplazamiento del vástago del servofreno hacia el cilindro maestro, activando así el sistema hidráulico de frenos con menor esfuerzo físico por parte del conductor. Una vez que el pedal se libera, ambas cámaras vuelven a conectarse al vacío, restableciendo el sistema a su estado de reposo (Reif, 2014).

Cilindro maestro

El maestro, también conocido como cilindro maestro en tándem, es el componente encargado de transformar la fuerza mecánica que ejerce el conductor sobre el pedal de freno y que puede ser amplificada por el servofreno, si lo hubiera en presión hidráulica. Esta presión impulsa el líquido de frenos a través de los circuitos de frenado, en proporción a la fuerza ejercida, permitiendo así un control adecuado de la frenada.

De acuerdo con las normativas de seguridad, los vehículos deben contar con dos circuitos de freno independientes. Esta exigencia se cumple habitualmente mediante el uso de un cilindro maestro de tipo tándem, el cual incorpora en su interior dos cilindros maestros dispuestos en serie. De esta manera, si uno de los circuitos falla, el otro puede seguir funcionando y garantizar la presión necesaria para frenar el vehículo.

Existen varias versiones del diseño del cilindro maestro. Algunas más complejas, como el cilindro maestro graduado, el cilindro maestro de etapas múltiples o el cilindro Twintax, son utilizadas en casos muy específicos y no suelen encontrarse en vehículos convencionales (Reif, 2014).

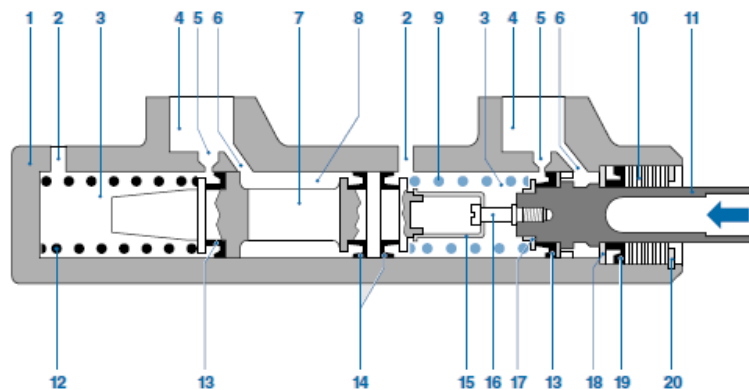
Cilindro maestro con resorte de pistón cautivo

Este diseño incluye un resorte de compresión que mantiene separados al pistón de empuje y al pistón flotante cuando el sistema está en reposo. Esta separación es clave para mantener un equilibrio hidráulico adecuado. El resorte empuja al pistón hasta una

posición inicial en la que su sello primario se encuentra más allá del orificio de equilibrado. Si esta condición no se cumpliera, el fluido de frenos podría igualar presiones entre los circuitos, impidiendo la correcta liberación de las pastillas o zapatas de freno, lo que comprometería la seguridad del sistema. A continuación se muestra la Figura 13.

Figura 13

Cilindro maestro con resorte de pistón cautivo



- | | |
|---|--|
| 1. Carcasa del cilindro | 11. Pistón de empuje (transmite la fuerza desde el servofreno) |
| 2. Salida de presión hacia el circuito de freno | 12. Resorte de compresión (circuito secundario) |
| 3. Cámara de presión | 13. Sello primario |
| 4. Hacia el depósito de líquido de freno | 14. Sello aislante |
| 5. Orificio de equilibrado | 15. Funda cautiva |
| 6. Taladro del esniffer | 16. Tornillo de retención |
| 7. Pistón flotante | 17. Anillo de soporte |
| 8. Cámara intermedia | 18. Disco de tope |
| 9. Resorte de pistón cautivo | 19. Sello secundario |
| 10. Funda plástica | 20. Anillo de retención |

Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 47), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Cuando se pisa el pedal de freno, el pistón de empuje y el pistón flotante se desplazan, superando el orificio de equilibrado y presurizando el fluido hacia los circuitos mediante las salidas del cilindro. A medida que la presión aumenta, el pistón flotante deja de estar controlado por el resorte y se mueve únicamente por acción de la presión del líquido de frenos (Reif, 2014).

Cilindro maestro con válvula central

Este tipo de cilindro maestro, es utilizado principalmente en vehículos con sistemas de frenos antibloqueo (ABS), es similar al modelo que incorpora un resorte de pistón

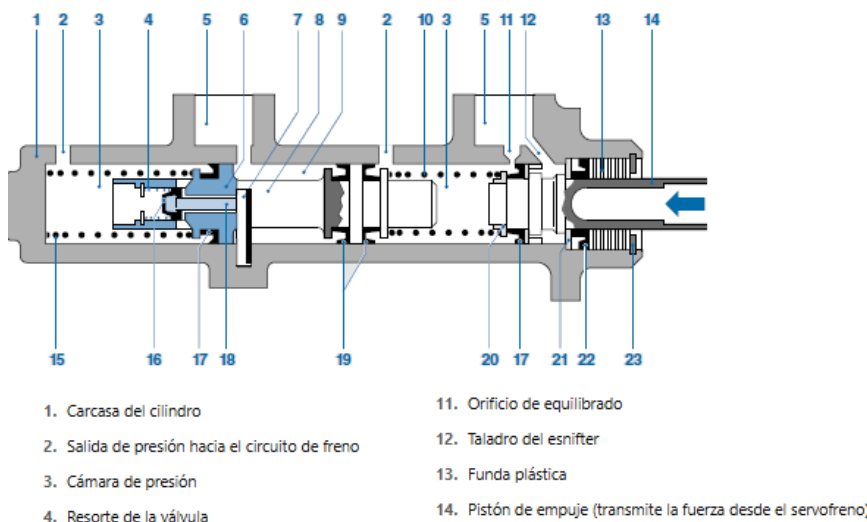
cautivo. Su principal característica es el uso de un pistón flotante que incluye una válvula central, la cual permite el retorno del líquido de frenos hacia el depósito cuando el sistema no está en uso, eliminando así la necesidad de un orificio de equilibrado en el circuito secundario.

El diseño incluye una cámara intermedia que se encuentra conectada de forma permanente con el depósito del líquido de frenos, facilitando el retorno del fluido cuando se libera el pedal. En sistemas ABS, existe el riesgo de que el pistón pase por el punto de equilibrado bajo alta presión, lo que podría dañar el sello primario. Por ello, estos cilindros suelen incorporar dos válvulas centrales para asegurar un funcionamiento estable y seguro.

Cuando se acciona el freno, ambos pistones se desplazan y generan presión sobre el líquido de frenos, enviándolo hacia los circuitos. A medida que la presión se incrementa, el pistón flotante deja de estar controlado por el resorte y pasa a moverse únicamente por la presión hidráulica del sistema. A continuación, se muestra la Figura 14 (Reif, 2014).

Figura 14

Cilindro maestro con válvula central



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 48), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Depósito de líquido de frenos

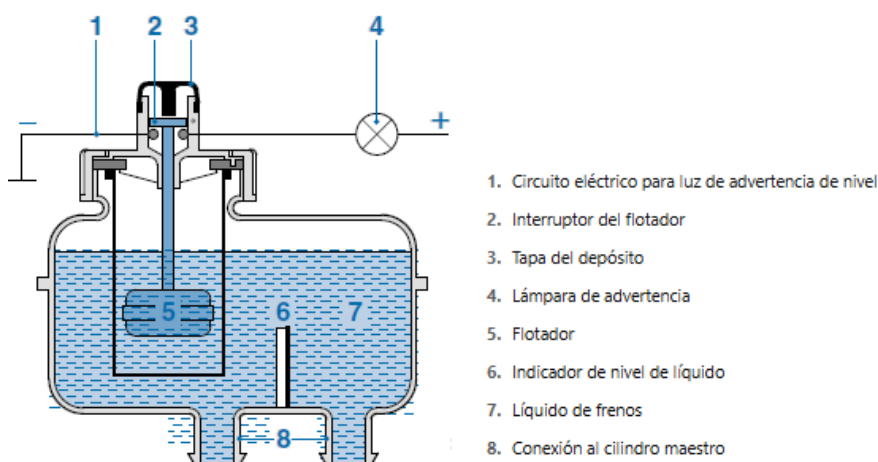
El depósito de líquido de frenos suele estar conectado directamente al cilindro maestro. Además de almacenar el fluido, actúa como un vaso de expansión que compensa

las variaciones de volumen en los circuitos hidráulicos, causadas por el desgaste de las pastillas, cambios de temperatura o la activación de sistemas como el ABS o ESP.

Este depósito está unido al cilindro maestro mediante dos salidas. Para detectar niveles bajos de líquido, el sistema utiliza un flotador que, al descender por debajo del nivel mínimo, cierra un circuito eléctrico a través de un interruptor, lo que activa una luz de advertencia en el tablero del vehículo. A continuación, se muestra la Figura 15 (Reif, 2014).

Figura 15

Depósito de líquido de freno



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 49), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Tuberías de freno

Las tuberías de freno son conductos metálicos rígidos que transportan el líquido de frenos desde el cilindro maestro hasta los frenos de cada rueda. Generalmente están instaladas por debajo de la carrocería del vehículo y forman parte esencial del sistema hidráulico de frenado.

Estas tuberías suelen estar fabricadas en cobre o acero, con un diámetro externo de aproximadamente 4.5 mm y un diámetro interno de 2.5 mm. Para protegerlas de la corrosión, suelen recubrirse con una capa plástica. Los extremos de cada segmento están ensanchados (abocardados) para permitir su conexión segura mediante uniones o acoples. Durante la instalación, se debe tener especial cuidado de que las tuberías no entren en

contacto con la carrocería ni con otros componentes del vehículo, salvo en los puntos de fijación previstos. Esto previene desgastes, vibraciones y posibles fugas (Reif, 2014).

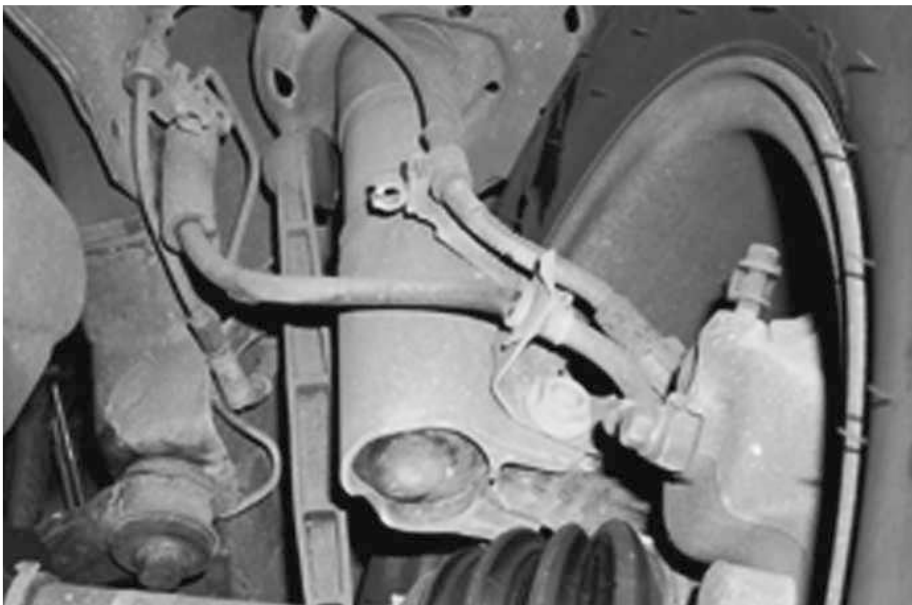
Mangueras de freno

Las mangueras de freno son elementos flexibles que permiten conectar las tuberías de cobre del sistema con los frenos ubicados en los neumáticos. Dado que las ruedas están en movimiento constante, estas mangueras permiten ese desplazamiento sin afectar el flujo del líquido de frenos. Están compuestas por una capa interna de caucho, refuerzos textiles para soportar la presión del fluido, una cobertura externa también de goma, y los terminales o conectores metálicos que permiten su acoplamiento.

La longitud y uso de estas mangueras están definidos por especificaciones técnicas que pueden variar según el tipo de vehículo. Las normativas exigen que no entren en contacto con partes móviles de la suspensión o de la carrocería, y que trabajen dentro de los rangos de presión y temperatura establecidos para garantizar su seguridad y durabilidad (Reif, 2014). A continuación se muestra la Figura 16, donde se visualiza las tuberías de cobre y las mangueras flexibles que forman parte del sistema de frenos.

Figura 16

Cañerías de cobre y mangueras flexibles



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 54), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Líquido de frenos

El líquido de frenos es un fluido hidráulico esencial en el sistema de frenado, ya que permite transmitir la fuerza ejercida sobre el pedal hasta los componentes encargados de detener el vehículo. Su formulación y calidad están reguladas por estándares internacionales como la norma SAE J1703, FMVSS 116 e ISO 4925, que establecen criterios técnicos relacionados con el punto de ebullición, la viscosidad, la compresibilidad, la no corrosividad, y la compatibilidad con materiales elastoméricos.

Uno de los parámetros más importantes es el punto de ebullición en equilibrio, el cual determina la resistencia del fluido ante el calor generado por el frenado continuo. En condiciones extremas, si el líquido alcanza su punto de ebullición, se pueden formar burbujas de vapor que provocan pérdida de presión y, por tanto, fallos en la frenada. Este riesgo se incrementa cuando el líquido ha absorbido humedad del ambiente, disminuyendo su punto de ebullición húmedo (ver Tabla 4), especialmente en fluidos a base de glicol, por lo que se recomienda su cambio cada uno o dos años. Según su punto de ebullición, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT, por sus siglas en inglés), clasifica los líquidos de frenos es: DOT3, DOT 4, DOT 5.1 (Siendo estos tres compatibles y se pueden mezclar entre ellos) y DOT 5 (elaborado en base a silicona y su uso es limitado).

Tabla 4

Características técnicas de líquidos de freno

Norma de ensayo	FMVSS 116			SAE J1703
Clasificación/versión	DOT 3	DOT 4	DOT 5 / DOT 5.1	11.83
Punto de ebullición en seco (mín.) °C	205	230	260	205
Punto de ebullición húmedo (mín.) °C	140	155	180	140
Viscosidad a -40 °C (mm ² /s)	1500	1800	900	1800

Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 55), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

El líquido de frenos debe tener una viscosidad adecuada y estable dentro de un amplio rango térmico (de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$) para garantizar una respuesta rápida, especialmente en vehículos con sistemas ABS. Además, debe presentar una compresibilidad mínima, ya que cualquier variación en su volumen ante la presión puede afectar el desempeño del frenado. Asimismo, debe ser químicamente compatible con los materiales internos del sistema, como sellos y juntas de caucho, evitando la hinchazón o deterioro de estos componentes. Por último, es fundamental que no sea corrosivo para los materiales del sistema de frenos, ni para otros componentes del vehículo como la pintura, dado que es habitual que estos fluidos sean higroscópicos y reactivos (Reif, 2014).

Estas características hacen que el diseño del líquido de frenos sea un equilibrio técnico entre distintas propiedades físico-químicas, ya que mejorar una de ellas puede comprometer otras (FMVSS 116, 2023). A continuación, se muestra los tipos de líquidos de freno más comerciales a nivel nacional en la Figura 17.

Figura 17

Líquidos de frenos más comerciales a nivel nacional



Nota. Adaptado de catálogo de productos de freno, por Frenosa, 2014.

Frenos de vehículos

Los vehículos utilizan principalmente dos tipos de frenos: frenos de disco y frenos de tambor. En la actualidad, la mayoría de automóviles nuevos cuentan con frenos de disco en el eje delantero, y existe una creciente tendencia a implementarlos también en el eje trasero. Ambos sistemas se basan en la fricción, ya que generan la fuerza de frenado al presionar pastillas o zapatas contra discos o tambores. El diseño del sistema debe responder a exigencias técnicas cada vez mayores, como distancias de frenado cortas, rápida respuesta, acumulación veloz de presión, distribución uniforme de la fuerza, control preciso, resistencia a la suciedad y a la corrosión, fiabilidad, durabilidad, resistencia al desgaste y facilidad de mantenimiento. Para lograr estas prestaciones sin aumentar excesivamente los costos, muchos vehículos pequeños o medianos combinan frenos de disco delanteros con frenos de tambor traseros. En cambio, los modelos de gama alta, deportivos o de lujo incorporan frenos de disco en las cuatro ruedas, debido a que estos soportan mejor las elevadas temperaturas generadas por el mayor peso y velocidad. Por ello, se presta especial atención a la conducción del calor, la ventilación de los frenos y la estabilidad del coeficiente de fricción de las pastillas.

Para evaluar el rendimiento de un sistema de frenos se utiliza el coeficiente de frenado C^* , el cual indica la relación entre la fuerza de frenado generada y la fuerza de aplicación. Este valor considera la eficiencia de transmisión interna y el coeficiente de fricción, que depende de parámetros como la presión de frenado, la temperatura y las propiedades de los materiales utilizados. De este modo, se obtiene una referencia objetiva del desempeño comparativo de distintos tipos de freno bajo condiciones similares (Reif, 2014).

Frenos de tambor

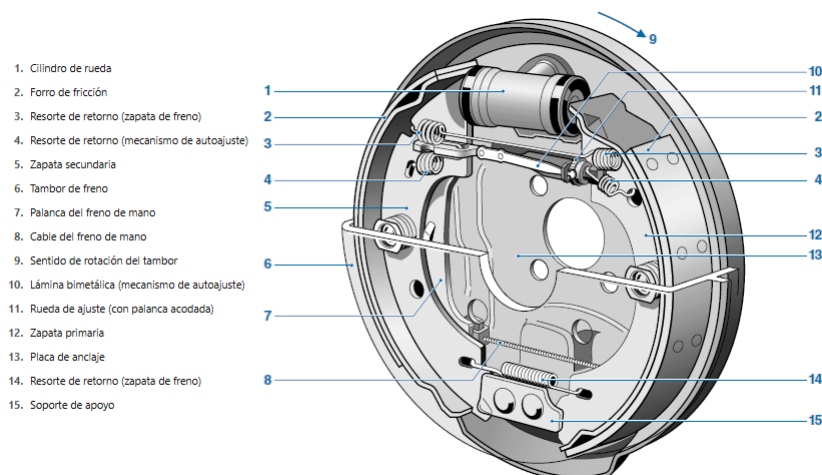
El freno de tambor es un tipo de sistema de frenado que genera la fuerza de frenado en la superficie interior del tambor mediante el contacto con zapatas accionadas desde el interior. Este principio parte de los frenos de tambor tipo “simplex”, que incluyen además un mecanismo integrado para freno de estacionamiento. En este sistema, un cilindro de

rueda de doble acción actúa sobre las zapatas del freno, haciendo que estas se expandan hacia el interior del tambor. La zapata primaria (de ataque) y la zapata secundaria (de reacción) presionan el forro de fricción contra la superficie del tambor. Las zapatas opuestas están sostenidas por un soporte que se conecta al anclaje del freno. Este tipo de freno también puede ser utilizado como freno de estacionamiento mediante una palanca manual y un cable de accionamiento.

Para asegurar un rendimiento constante a lo largo del tiempo, este tipo de freno incorpora un mecanismo de ajuste automático que mantiene constante el espacio entre las zapatas y el tambor cuando los frenos no están aplicados (ver Figura 18). Este mecanismo auto compensador está compuesto por varios elementos clave: la funda de presión, el tornillo de ajuste y su rueda, los resortes de retorno, una lámina bimetálica, la palanca acodada y la palanca de ajuste. Esta última se encuentra conectada a la funda de presión de forma que puede flexionarse y permitir que el trinquete de ajuste engrane con la rueda correspondiente (Reif, 2014).

Figura 18

Freno de tambor simplex con freno de estacionamiento integrado (ruedas traseras)



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 58), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Funcionamiento del autoajuste en frenos de tambor

En modo de reposo, los resortes de retorno mantienen a las zapatas del freno separadas del tambor, lo que también impide el movimiento de la palanca acodada al estar

en contacto con el tornillo de ajuste y la funda de presión. En esta posición, no hay acción de frenado ni movimiento en el mecanismo de autoajuste.

Cuando la temperatura dentro del tambor de freno es inferior a 80 °C y se acciona el freno hidráulico, los pistones del cilindro de rueda empujan las zapatas hacia el interior del tambor, generando fricción. Simultáneamente, los resortes de retorno separan el tornillo de ajuste y la rueda de ajuste de la funda de presión, permitiendo que la palanca acodada se libere. En este punto, si existe una holgura mayor a la especificada entre el tambor y las zapatas, el mecanismo se activa automáticamente. La palanca de ajuste empuja hacia arriba a la palanca acodada, la cual, al inclinarse, hace engranar el trinquete en la rueda de ajuste. Esto provoca un leve giro que desenrosca el tornillo de ajuste y aumenta mínimamente la longitud del sistema, restableciendo el ajuste adecuado entre zapata y tambor.

Sin embargo, cuando la temperatura del freno supera los 80 °C, producto de frenadas prolongadas o exigentes, la holgura puede incrementarse más allá de los límites deseados. En tales condiciones, el mecanismo de autoajuste queda inhabilitado, ya que la lámina bimetálica se deforma y bloquea la palanca acodada en su posición, impidiendo cualquier corrección automática. Esto evita ajustes incorrectos bajo condiciones térmicas extremas (Reif, 2014).

Freno de mano

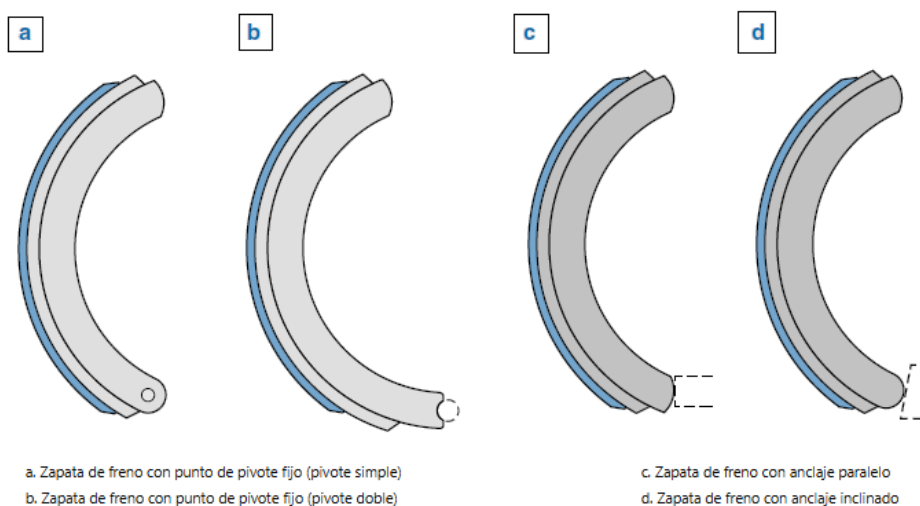
El freno de mano utiliza un cable conectado a la palanca mecánica ubicada dentro de la zapata secundaria. Al accionarse, esta palanca gira desde su eje superior, presionando primero la zapata trasera contra el tambor. A través del mismo mecanismo de autoajuste, y haciendo palanca sobre el tornillo de ajuste, también empuja la zapata delantera, asegurando así un contacto firme y uniforme de ambas zapatas con el tambor. Este diseño permite que el freno de mano aproveche el mismo sistema de autoajuste para mantener una eficacia constante sin necesidad de ajustes manuales frecuentes (Reif, 2014).

Tipos de freno de tambor

Los frenos de tambor se pueden clasificar según la forma en que las zapatas están montadas y se articulan dentro del sistema. Existen principalmente dos configuraciones: los frenos de tambor con zapatas de pivote fijo y los frenos de tambor con zapatas deslizantes, que pueden tener anclajes paralelos o inclinados (ver Figura 19). Las zapatas de pivote fijo tienden a desgastarse de forma desigual, ya que no se autorregulan ni se centran como las zapatas deslizantes. Además, estas suelen presentar un comportamiento de "auto inhibición" en la zapata secundaria, lo que significa que esta reduce parte de la fuerza de frenado aplicada (contrario al efecto auto-reforzante). Por el contrario, los sistemas con zapatas deslizantes empleados en configuraciones como simplex, dúplex, doble dúplex, servo y doble servo permiten una mejor distribución del frenado y no presentan esta característica inhibidora. Actualmente, la mayoría de vehículos modernos con frenos de tambor utilizan este segundo tipo de diseño, debido a su mayor eficacia y uniformidad en el rendimiento del frenado (Reif, 2014).

Figura 19

Tipos de pivotes en el freno zapata



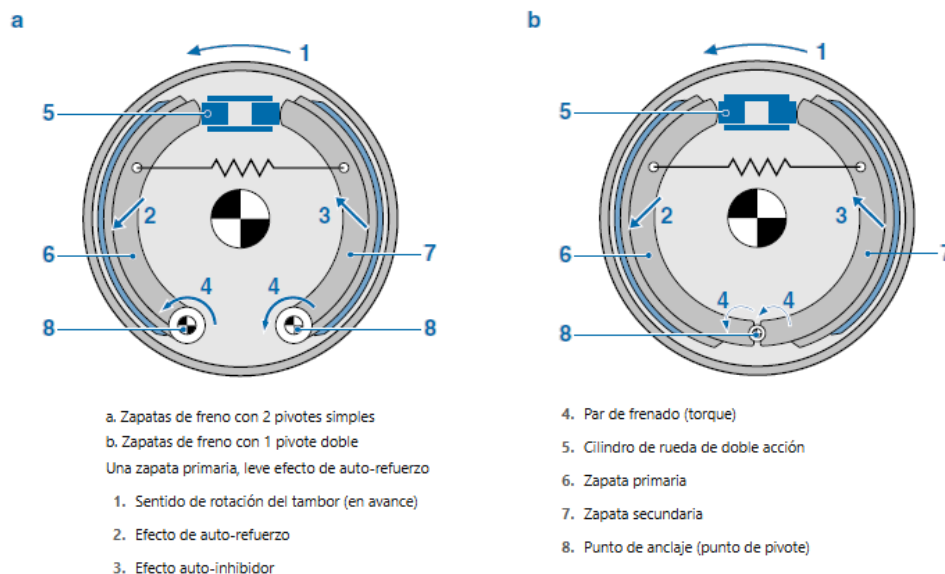
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 60), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Freno de tambor (tipo simplex)

El freno simplex utiliza un cilindro de rueda de doble efecto que acciona dos zapatas de freno. Estas zapatas están montadas sobre puntos de pivote, que pueden ser dobles o simples, dependiendo del diseño (ver Figura 21). Cuando el vehículo avanza, la zapata delantera actúa como auto-reforzante, mientras que la zapata trasera cumple una función auto-inhibidora. Al invertir la dirección, los efectos se invierten. Este sistema es de uso común y proporciona un efecto de auto-refuerzo moderado con un factor de auto refuerzo entre 2 y 4 (Reif, 2014).

Figura 20

Freno de tambor con pivotes (tipo simplex)



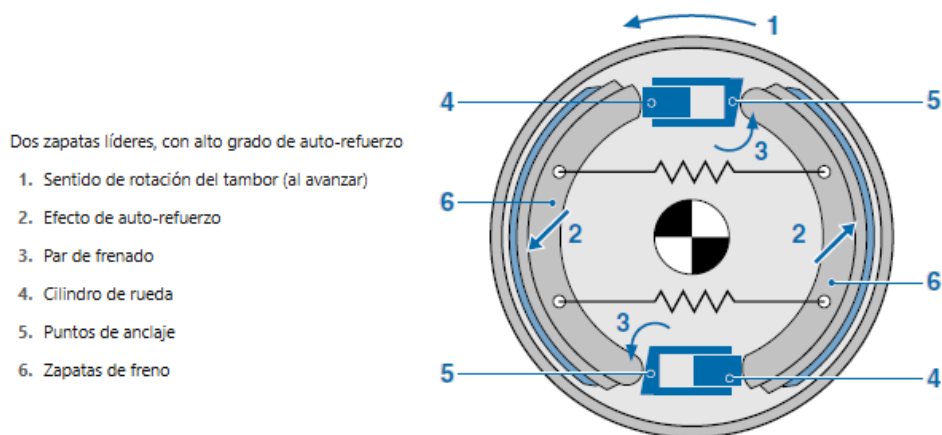
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 60), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Freno de tambor (tipo dúplex)

El sistema dúplex incorpora dos cilindros de rueda de simple efecto, cada uno actuando sobre una zapata. Ambas zapatas son del tipo deslizante y están ancladas en la parte trasera del freno, permitiendo que cada una actúe de manera auto-reforzante durante el avance (ver Figura 21). No obstante, al frenar en reversa, no se genera efecto de auto-refuerzo. Este tipo de freno es más eficiente en marcha hacia adelante que el sistema simplex, con un factor de auto-refuerzo de hasta 6 (Reif, 2014).

Figura 21

Freno de tambor (tipo dúplex)



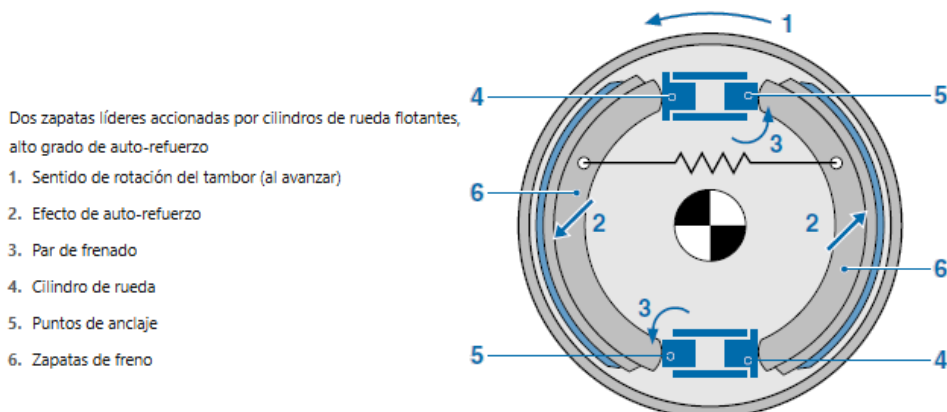
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 61), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Freno de tambor (tipo Doble Dúplex)

El freno doble dúplex utiliza dos cilindros de rueda de doble efecto, que accionan zapatas deslizantes ancladas contra el cilindro opuesto (ver Figura 22). Este diseño permite que ambas zapatas trabajen como auto-reforzantes tanto en avance como en reversa, lo que convierte al doble dúplex en un sistema altamente eficaz para cualquier sentido de marcha. Su factor de auto-refuerzo también puede alcanzar hasta 6, brindando un rendimiento de frenado superior (Reif, 2014).

Figura 22

Freno de tambor (tipo Doble Dúplex)



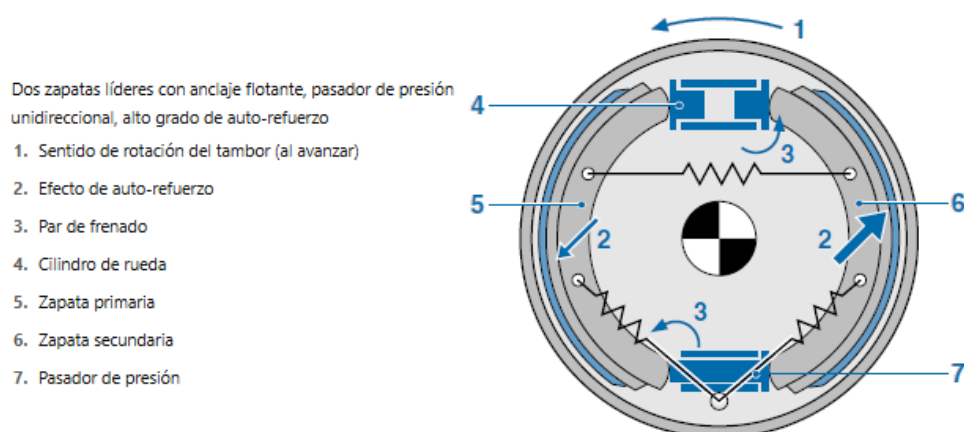
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 61), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Freno de tambor (tipo Servo)

El freno servo está compuesto por un solo cilindro de doble efecto que acciona dos zapatas de tipo deslizante. A diferencia de los sistemas anteriores, las zapatas no se anclan sobre un punto fijo, sino que lo hacen contra un pasador flotante que permite su desplazamiento en una sola dirección (ver Figura 23). Cuando el vehículo avanza, la fuerza de reacción generada por la zapata primaria se transmite a la zapata secundaria, amplificando el efecto de auto-refuerzo. En reversa, este sistema actúa como un freno simplex. Su factor de auto-refuerzo puede llegar también hasta 6, ofreciendo una respuesta potente y progresiva (Reif, 2014).

Figura 23

Freno de tambor (tipo Servo)



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 61), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Freno de tambor (tipo Dúo-Servo)

El freno dúo-servo emplea un cilindro de rueda de doble acción que acciona dos zapatas de freno deslizantes. A diferencia del sistema servo convencional, en este diseño las zapatas se apoyan sobre un pasador flotante que puede desplazarse en ambas direcciones. Esto permite que, tanto al avanzar como al retroceder, la fuerza de reacción generada por la zapata primaria se transmita a la zapata secundaria, aumentando significativamente el efecto de auto-refuerzo (ver Figura 24). De esta manera, el freno dúo-

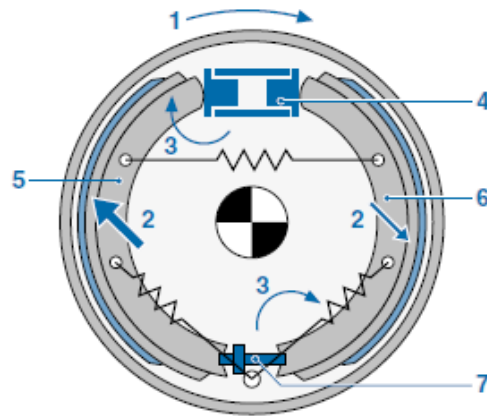
servo logra una potencia de frenado superior a la del sistema servo simple, con un factor de auto-refuerzo que puede alcanzar valores de hasta 6. (Reif, 2014).

Figura 24

Freno de tambor (tipo Dúo-Servo)

Similar al freno servo, excepto que el pasador de presión se mueve en ambas direcciones; efecto de auto-refuerzo tanto al avanzar como al retroceder

1. Sentido de rotación (al retroceder)
2. Efecto de auto-refuerzo
3. Par de frenado
4. Cilindro de rueda
5. Zapata secundaria
6. Zapata primaria
7. Pasador de presión (soporte de anclaje)



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 62), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Efectos de auto-refuerzo y mecanismos de ajuste en frenos de tambor

Una característica importante de los frenos de tambor es el efecto de auto-refuerzo (self-augmenting effect), el cual se presenta cuando la fuerza efectiva de frenado supera a la que genera directamente el cilindro maestro. Esto ocurre debido a la fricción entre la zapata primaria y el tambor, que genera un par de fuerza adicional alrededor del punto de pivote de la zapata, ayudando a presionar con más fuerza contra el tambor y aumentando así la capacidad de frenado del sistema.

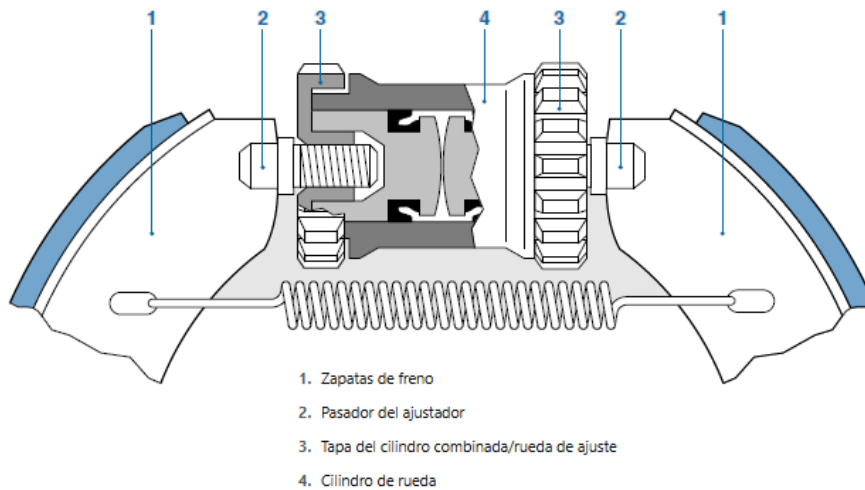
En los frenos tipo simplex, la zapata secundaria también puede generar un efecto contrario, conocido como auto-inhibición, donde se reduce la fuerza total de frenado al oponerse al empuje hidráulico. Este fenómeno no ocurre en otros tipos de frenos como el dúplex, dúo-dúplex o servo.

Dado que los forros de freno se desgastan con el uso, el espacio entre las zapatas y el tambor tiende a aumentar, lo que afecta la eficacia del frenado. Para evitarlo, los frenos de tambor cuentan con mecanismos de ajuste que compensan este desgaste y aseguran una distancia constante tal como se observa en la Figura 25.

- Mecanismos de ajuste manuales en el cilindro de rueda.
- Mecanismos de ajuste manuales en los puntos de anclaje.
- Mecanismos de ajuste automáticos.

Figura 25

Mecanismo de ajuste manual en el cilindro de rueda



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 62), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

El mecanismo de ajuste en frenos de tambor como los tipos simplex, dúplex y servo, puede estar integrado en el cilindro de rueda de doble efecto. En estos casos, la tapa del cilindro y la rueda de ajuste (elemento 3) poseen en el centro una rosca para insertar un pasador roscado de ajuste (elemento 2), el cual tiene una ranura en la cabeza que permite alojar la zapata de freno (elemento 1). A través de un orificio en la placa posterior del freno, se puede introducir un destornillador para girar la rueda de ajuste (3) y así modificar el espacio entre las zapatas y el tambor de freno (Reif, 2014).

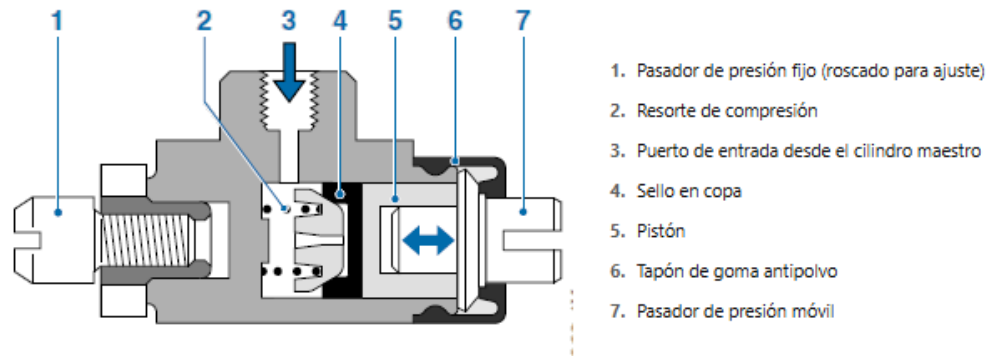
Cilindro de rueda del freno de tambor

En los frenos de tambor, el cilindro de rueda transmite la presión hidráulica generada en el cilindro maestro hacia las zapatas de freno, empujándolas contra el tambor mediante pistones y pasadores de presión. Un resorte mantiene estos pasadores en contacto con las zapatas, mientras que un tapón de goma protege el cilindro contra polvo

y humedad. Cabe resaltar que existen cilindro de rueda tanto de simple efecto como de doble efecto, en la Figura 26 se muestra un cilindro de simple efecto (Reif, 2014).

Figura 26

Cilindro de rueda de simple efecto

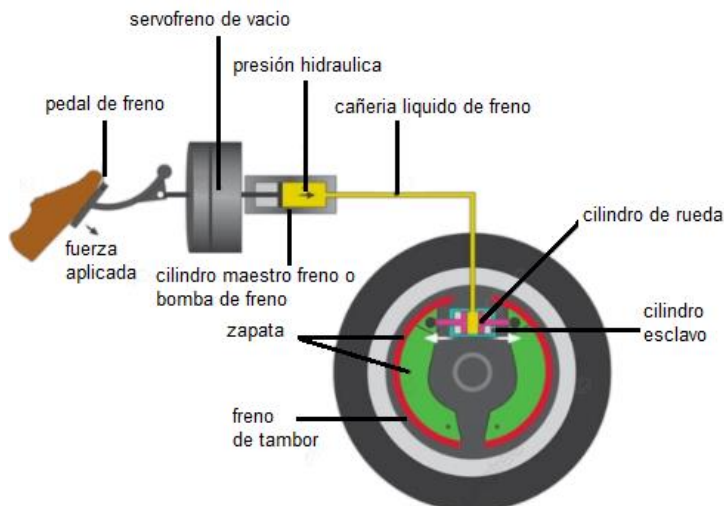


Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 63), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

A continuación, se presenta el esquema de componentes que forman parte de los frenos de tambor tal como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Esquema de componentes de freno de tambor



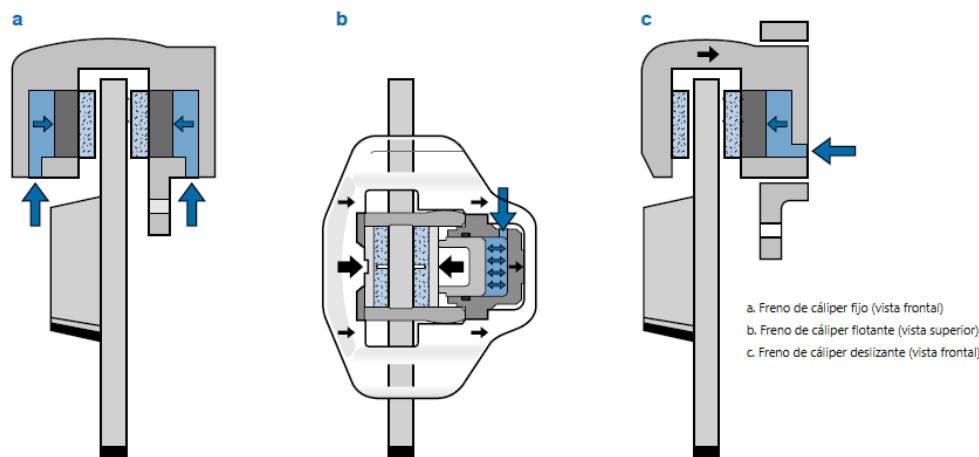
Frenos de disco y sus componentes

Los frenos de disco generan la fuerza de frenado aplicando presión sobre un disco que gira con la rueda. Este sistema utiliza un cáliper en forma de “U”, fijado a partes no rotativas del vehículo. Según su diseño, existen tres tipos principales (ver Figura 28): el

calieter fijo, que emplea dos pistones para presionar las pastillas desde ambos lados del disco; el caliper flotante, en el que un solo pistón empuja una pastilla y, por reacción, el cuerpo del caliper se desplaza para aplicar la otra; y el cáliper deslizante, una variación del flotante donde el cuerpo móvil del cáliper aplica indirectamente presión al lado opuesto del disco (Reif, 2014)

Figura 28

Tipos de calieter en freno de disco



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 64), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Sello de pistón

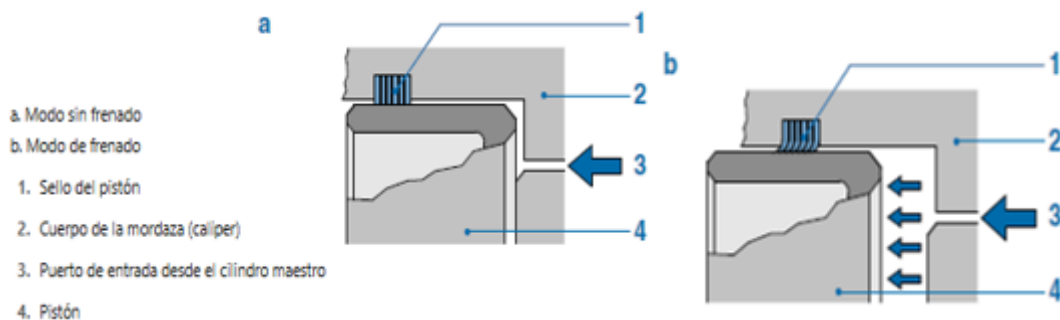
Un elemento esencial de este sistema es el sello de goma del pistón, que además de mantener la estanqueidad hidráulica, ajusta automáticamente el espacio entre la pastilla y el disco. Este sello, al deformarse durante el frenado, actúa como un resorte, permitiendo que el pistón regrese ligeramente a su posición original al liberar el freno, evitando así el roce continuo con el disco y asegurando una correcta distancia de trabajo entre los componentes (Disco y pastilla) que es aproximadamente 0.15 mm, este margen permita una libre rotación del disco durante el traslado del vehículo.

Con el desgaste progresivo de las pastillas de freno, el pistón debe recorrer mayor distancia para mantener el contacto con el disco. En este proceso, el sello se desliza gradualmente sobre el pistón (ver Figura 29), permitiendo que este se extienda más allá de su posición original. Este movimiento permite una autorregulación continua del espacio

entre la pastilla y el disco sin necesidad de ajustes manuales. De esta forma, el sistema mantiene una distancia constante entre ambos componentes, asegurando un frenado eficiente y evitando que el disco roce innecesariamente cuando el freno no está activado (Reif, 2014).

Figura 29

Vista de corte de sello de pistón



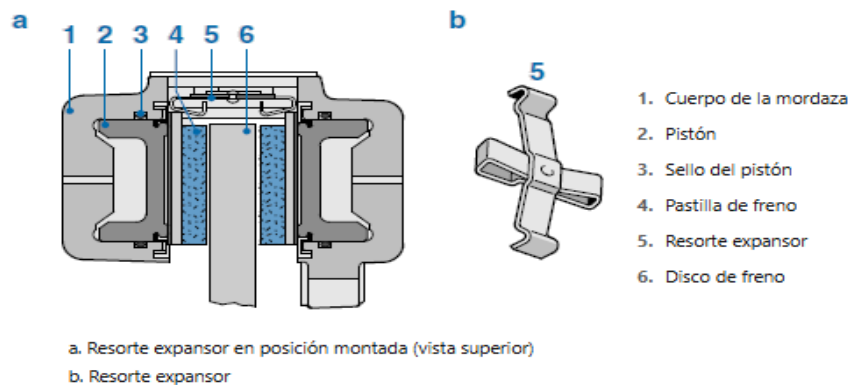
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 65), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Resorte expansor

En los frenos de disco con mordaza fija, se utiliza un resorte expansor con forma de cruz cuya función principal es mantener las pastillas de freno presionadas contra los pistones, al mismo tiempo que facilita el retroceso de las pastillas una vez finalizada la frenada. A continuación, se detalla el resorte expansor en la Figura 30.

Figura 30

Vista de resorte expansor



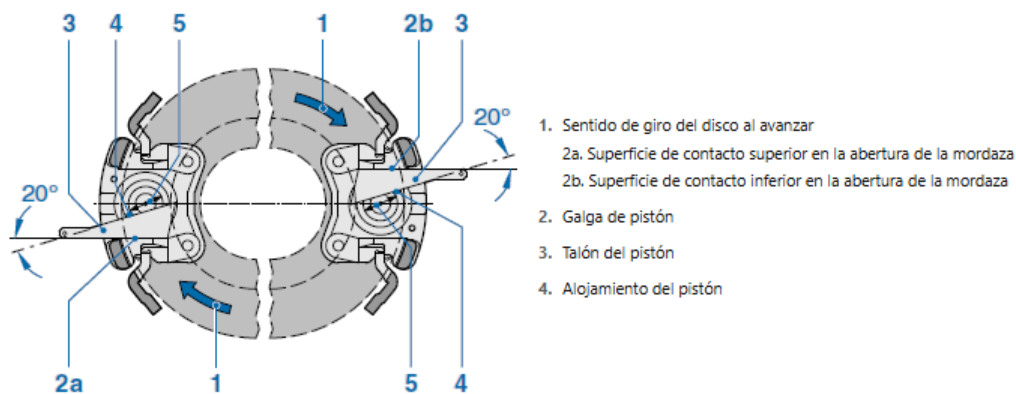
Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 65), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Posicionamiento del pistón de freno

Cuando los pistones de los frenos de disco (ya sean de tipo mordaza fija o flotante) presentan un pequeño sobresaliente o talón de aproximadamente 3 mm en el borde de ataque de la pastilla, es necesario orientarlos con un ángulo de 20° respecto a la horizontal, empleando una galga de posicionamiento (ver Figura 31). Esta configuración permite que la presión aplicada por el pistón sobre la pastilla se distribuya de manera más uniforme, reduciendo el desgaste irregular de los bordes. También puede lograrse un efecto similar si el pistón está descentrado entre 2 y 6 mm hacia el borde posterior de la pastilla. Esta disposición mejora la uniformidad del desgaste y, adicionalmente, contribuye a reducir el ruido generado durante la frenada.

Figura 31

Pistón de freno (posicionamiento)



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 65), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Pinza (caliater) fija

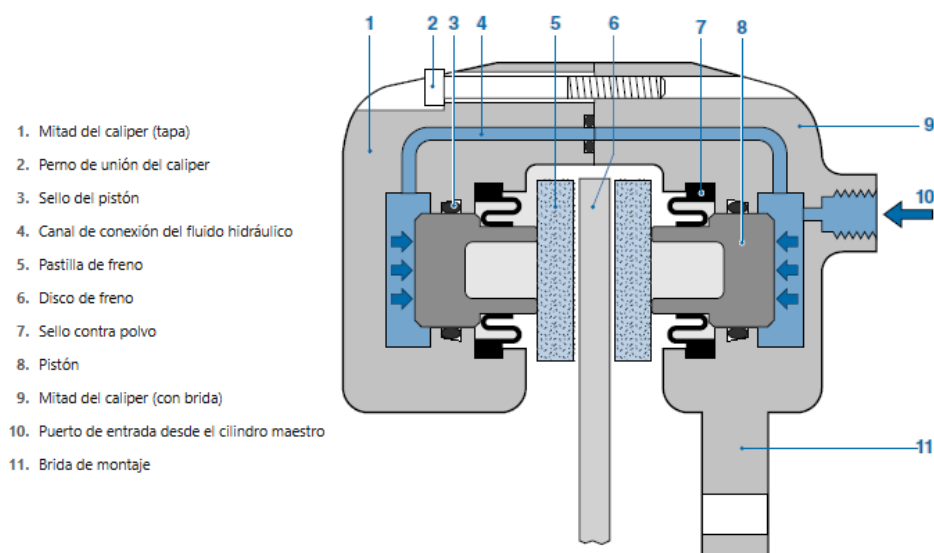
El freno de mordaza o pinza fija actúa gracias a la presión hidráulica generada desde el cilindro maestro, la cual se distribuye a los pistones ubicados en ambos lados del disco. Estos pistones empujan las pastillas de freno contra la superficie del disco, generando así la fricción necesaria para frenar el vehículo. El caliper está compuesto por dos mitades unidas por un perno y cada mitad puede tener uno o dos pistones. El fluido de

freno ingresa por un puerto y circula entre ambas mitades a través de un canal interno. Cada pistón está sellado con anillos y protegido contra suciedad y humedad mediante tapas de goma. Una vez que se deja de aplicar presión al pedal de freno, los pistones regresan a su posición original gracias a la elasticidad del sello, restableciendo la separación correcta entre la pastilla y el disco, incluso si hubo desgaste. Este diseño permite que el disco gire libremente cuando el freno no está en uso.

Una de las grandes ventajas de este sistema es que no necesita ajustes manuales, ya que los sellos elásticos de los pistones se encargan de compensar el desgaste automáticamente. Su estructura robusta lo hace ideal para vehículos pesados o de alto rendimiento, aunque presentan una desventaja frente a las altas temperaturas generadas en frenadas prolongadas, como en descensos largos. Para mitigar esta sensibilidad térmica, algunos diseños avanzados utilizan una conexión externa en lugar del canal hidráulico interno. Además, debido a su tamaño, estos frenos requieren más espacio dentro de la rueda, tal como se muestra en Figura 32 (Reif, 2014).

Figura 32

Vista corte calípter fijo



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 676), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

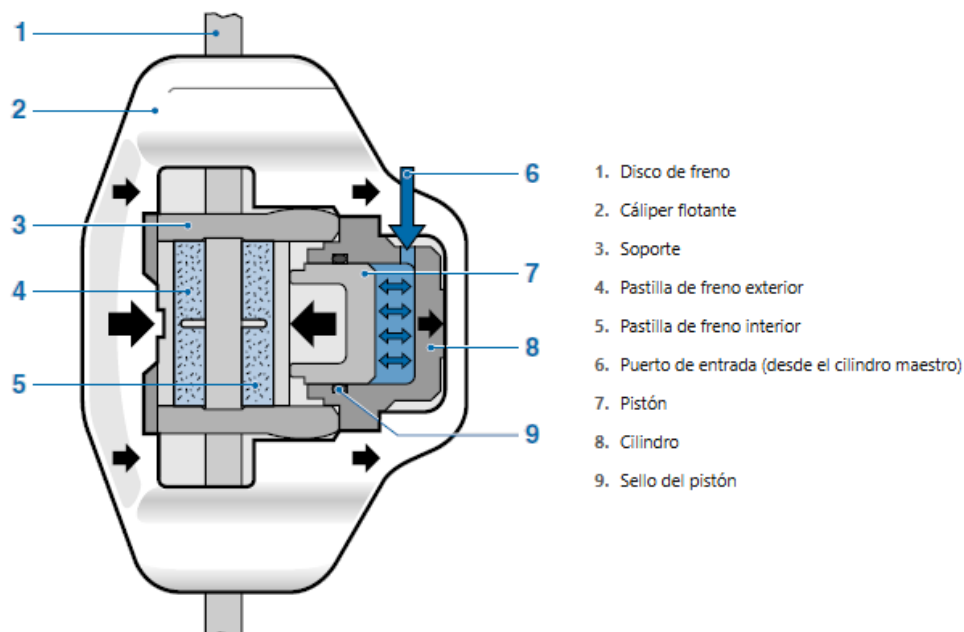
Pinza (Calípter) Flotante

El freno de calípter flotante utiliza la presión hidráulica generada por el cilindro maestro para accionar las pastillas de freno. Cuando se aplica el freno, el pistón empuja la pastilla interna contra el disco, mientras que el cuerpo del calípter se desplaza en sentido contrario, presionando la pastilla externa. Esta acción simultánea permite una frenada eficaz desde ambos lados. El diseño consta de un soporte que mantiene el cilindro y las pastillas, y un calípter móvil que se desliza por guías curvas. Un resorte guía asegura un desplazamiento suave entre ambos componentes. Al liberar el pedal, el sello elástico del pistón lo devuelve a su posición original, restaurando automáticamente la separación entre las pastillas y el disco.

Este tipo de freno no requiere ajustes adicionales, ocupa menos espacio y permite una mejor ventilación del fluido hidráulico. Gracias a su diseño compacto, es ideal para vehículos con espacio limitado o con desplazamiento negativo del eje de dirección. Además, puede incorporar sistemas de freno de estacionamiento. A continuación, se muestra una vista de corte del calípter flotante en la Figura 33 (Reif, 2014).

Figura 33

Vista corte calípter flotante



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 67), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

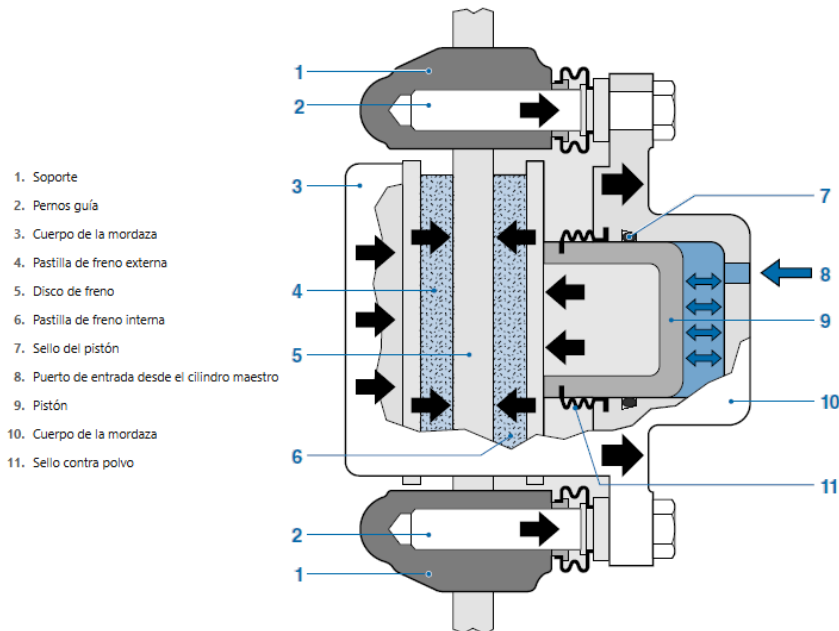
Calipter deslizante

Este tipo de mordaza o pinza, funciona a partir de la presión hidráulica generada por el cilindro maestro, la cual impulsa un solo pistón contra la pastilla interna de freno. Esta acción provoca que toda la mordaza se desplace lateralmente, presionando simultáneamente la pastilla externa contra el disco. A diferencia del sistema pinza flotante, la pinza deslizante no utiliza un soporte fijo, sino que se desliza sobre dos pernos guía, facilitando su mantenimiento. El diseño compacto y sencillo permite que este tipo de freno sea una opción eficiente, especialmente en vehículos con espacio reducido cerca del eje. Una vez liberado el pedal de freno, el sello elástico del pistón lo devuelve automáticamente a su posición original, restableciendo el espacio entre la pastilla y el disco para permitir que la rueda gire sin fricción.

El sistema está compuesto por una mordaza móvil montada sobre dos pernos guía, un soporte fijado al conjunto del eje, un pistón que actúa directamente sobre la pastilla interna, y un puerto de entrada que conecta con el cilindro maestro. Cuando se aplica el freno, la presión hidráulica mueve el pistón, que a su vez presiona la pastilla interna contra el disco. Al mismo tiempo, la reacción empuja la mordaza móvil en sentido contrario, provocando que la pastilla externa también entre en contacto con el disco. Ambas pastillas ejercen una presión uniforme sobre el disco, generando así la fuerza de frenado necesaria. Este mecanismo ofrece una acción de frenado eficiente y balanceada con un diseño más ligero y de fácil mantenimiento que otros sistemas, como el de mordaza fija, tal como se muestra en la Figura 34 (Reif, 2014).

Figura 34

Vista corte calípter deslizante



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 68), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Descripción mecánica de las pastillas, zapatas y discos de freno

Como ya se ha mencionado en conceptos anteriores las pastillas y las zapatas se presionan contra una superficie que gira junto con la rueda del vehículo. Este contacto genera una fuerza de fricción que convierte la energía cinética del vehículo en calor. En los sistemas de freno de disco, esta fuerza proviene del contacto entre la pastilla y el disco; en los frenos de tambor, del contacto entre el forro de fricción de la zapata y el tambor. El coeficiente de fricción entre los materiales involucrados ya sea disco-pastilla o tambor-zapata, influye directamente en la cantidad de fuerza que el conductor debe ejercer sobre el pedal para detener el vehículo, así como en el equilibrio y la estabilidad del frenado.

Las zapatas tienen una forma en T que les proporciona rigidez y sus forros de fricción se sujetan mediante remaches o adhesivos (ver Figura 35). Generalmente, se comercializan en kits de freno de tambor que incluyen zapatas, cilindros de rueda y accesorios. Las pastillas de freno de disco, por su parte, están formadas por una capa de

material de fricción y una capa intermedia adherida a una placa metálica de soporte, tal como se muestra en la Figura 36.

Figura 35

Forro con zapata de freno fijado



Nota. Adaptado de catálogo de productos de freno, por Frenosa, 2014.

Figura 36

Pastilla de frenos con placa de soporte



Nota. Adaptado de catálogo de productos de freno, por Frenosa, 2014.

En la actualidad, prácticamente todos los vehículos utilizan frenos de disco en el eje delantero, mientras que los frenos de tambor siguen empleándose en el eje trasero, sobre todo en vehículos pequeños o medianos. Esta elección responde a una combinación de factores como eficiencia, costo y espacio disponible.

El material de fricción de las pastillas o zapatas está compuesto principalmente por cuatro materias primas (ver Tabla 5). Las proporciones varían dependiendo del tipo de vehículo, el uso previsto y las características de frenado deseadas (ya sea inicial o sostenida). La fórmula exacta de estos compuestos suele ser confidencial y está protegida por las fábricas a nivel nacional (Reif, 2014).

Tabla 5

Composición de las pastillas de freno

Item	Grupo de materiales	Materiales	% en volumen
1	Metales	viruta de acero, Polvo de cobre	14%
2	Rellenos	Óxido de aluminio, Polvo de mica, Barita, Óxido de hierro	23%
3	Modificadores de fricción	Sulfuro de antimonio, Grafito, Coque en polvo	35%
4	Componentes orgánicos y fibras	Fibra de aramida, Polvo de resina de relleno, Resina aglutinante, ceras y aceites	28%

Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 70), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

Rangos de cambio de zapatas o pastillas de freno

En general, las zapatas de freno en sistemas de tambor deben reemplazarse con el doble de frecuencia que los tambores, mientras que, en frenos de disco, las pastillas se cambian aproximadamente cinco veces antes que el disco. Esto implica una mayor demanda de pastillas de disco en el mercado de repuestos. Algunos vehículos integran sensores de desgaste que, al detectar un grosor mínimo del material de fricción (3,5 mm), activan una luz de advertencia en el tablero. Al reemplazar componentes de freno en un lado del eje, se recomienda hacerlo también en el lado opuesto para mantener un frenado equilibrado, utilizando siempre repuestos aprobados por el fabricante del sistema de frenos (Reif, 2014).

Requisitos de calidad para materiales de fricción de freno

Los materiales de fricción deben cumplir estándares de calidad agrupados en tres categorías: seguridad, confort y durabilidad. En términos de seguridad, se evalúan la estabilidad del coeficiente de fricción, la resistencia al corte, la compresibilidad, la estabilidad dimensional, la conductividad térmica, la resistencia a la inflamabilidad y a la corrosión, y el comportamiento durante el asentamiento. En confort y conveniencia, se consideran las propiedades de generación de ruido, absorción de vibraciones y respuesta de frenado. Finalmente, la durabilidad está determinada por la resistencia al desgaste del material (Reif, 2014).

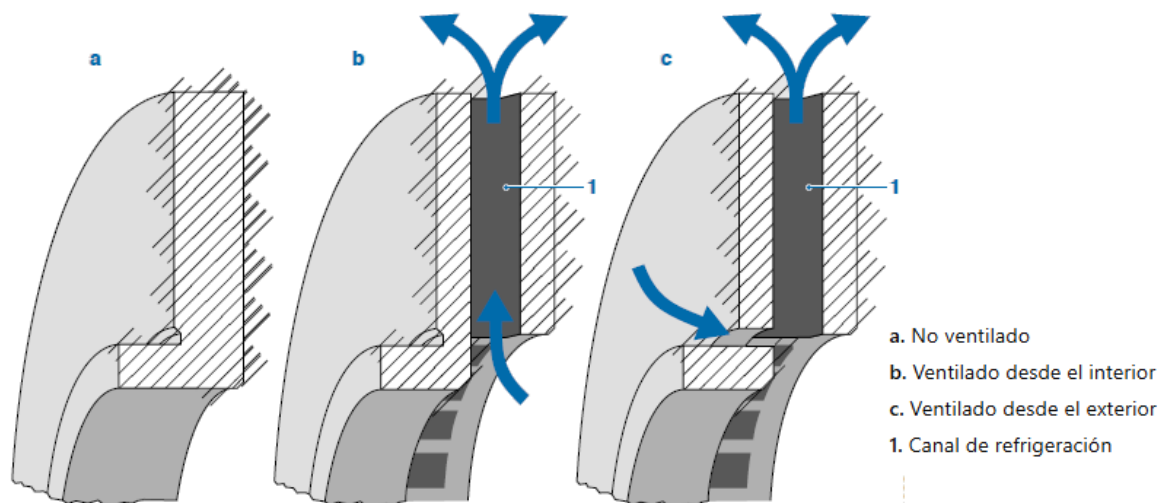
Discos de freno

Los discos de freno, al igual que los tambores, están montados en los cubos de las ruedas y, por lo general, están fabricados de hierro fundido o acero. A diferencia del sistema de freno de tambor, la presión que ejercen las pastillas sobre el disco es mayor debido a que su área de contacto es más reducida. Esto genera más calor y provoca un desgaste más acelerado de las pastillas en comparación con las zapatas de tambor. Como el disco está expuesto al aire, se enfría de forma eficiente gracias al flujo de aire durante el movimiento del vehículo.

Existen tres tipos principales de discos: no ventilados, ventilados desde el interior y ventilados desde el exterior (ver Figura 37). Los discos ventilados, por su mayor masa y diseño con canales de ventilación radiales tipo turbina, tienen mayor capacidad de almacenamiento térmico y se enfrían más rápidamente. Por estas ventajas, suelen emplearse preferentemente en las ruedas delanteras (Reif, 2014).

Figura 37

Tipos de ventilación de disco de freno



Nota. Adaptado de Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems (p. 73), por Reif K., 2014, Editorial Springer Vieweg.

2.1.4 Bancos de prueba existentes

En sus inicios, los sistemas de evaluación de la operatividad del frenado eran rudimentarios y limitados a pruebas subjetivas en carretera. Sin embargo, a comienzos del año 1960 se desarrolló uno de los primeros bancos de prueba de frenos, denominado inicialmente como banco probador de frenos. Este equipo fue creado por la empresa mexicana ACTIA, bajo la marca Muller Ben, marcando un hito al permitir por primera vez una evaluación más objetiva y controlada de la eficacia de los sistemas de freno en vehículos livianos.

A medida que avanzó la tecnología, la necesidad de realizar pruebas más precisas y repetibles dio lugar a mejoras sustanciales en estos dispositivos. En 1968, la empresa alemana Maschinenbau Haldenwang introdujo un frenómetro de nueva generación, equipado con un sistema de medición hidráulico. Esta innovación representó un salto tecnológico significativo, permitiendo automatizar las pruebas y registrar los resultados con mayor exactitud. Esta evolución tecnológica sentó las bases de los actuales bancos de pruebas que hoy se utilizan en talleres, centros de inspección técnica vehicular e incluso

en laboratorios de investigación, donde se evalúa el comportamiento del sistema de frenos bajo diferentes condiciones (Clavijo & Condo, 2021).

El sistema de frenos es una parte crítica para la seguridad del vehículo y las personas que van dentro del mismo. Para una correcta evaluación se exige el uso de bancos de pruebas que miden la eficiencia del frenado en condiciones controladas y que sean repetitivas, es decir, que se pueda realizar el mismo ensayo en varias oportunidades. Estos bancos de pruebas son utilizados en centros de inspección técnica vehicular, laboratorios de ensayos, y permiten validar la operatividad del sistema de frenos frente a diferentes escenarios. A continuación, se mencionarán los bancos de prueba existentes que y que han sido tomados como referencia o base.

Banco de Rodillos (frenómetro)

Este tipo de banco de prueba es el que se emplean en todos los centros de inspección vehicular a nivel nacional, el cual permite evaluar la fuerza longitudinal de frenado generada por cada rueda mientras el vehículo permanece estático y con la caja de cambios en neutro. Para realizar esta medición el vehículo se posiciona sobre rodillos motorizados, que tienen una superficie de recubrimiento del material corindón mezclado con un material adhesivo, estos giran simulando el movimiento del vehículo en cada eje (delantero y posterior). Cuando el conductor acciona el sistema de frenos, sensores de fuerza instalados en los rodillos miden la fuerza de frenado generada en cada rueda, posteriormente esta fuerza es comparada con el peso del vehículo para calcular la eficiencia del sistema de frenos, a continuación, se muestra el frenómetro de un centro de inspección vehicular en la Figura 38 y 39 (MTC, 2008).

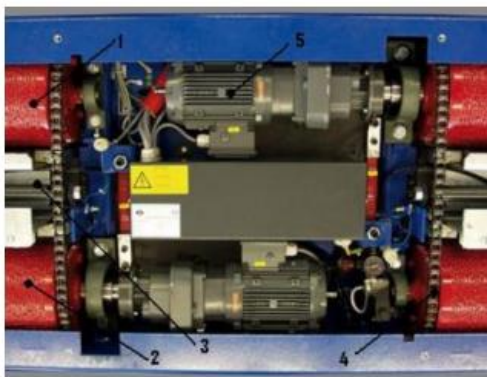
Figura 38

Banco de rodillos (frenómetro)



Figura 39

Elementos del frenómetro de rodillos



- 1 y 2. Cuatro rodillos de arrastre
- 3. Dos rodillos palpadores
- 4. Cadenas de transmisión que unen el par de rodillos de arrastre
- 5. Dos motores y galgas extensométricas

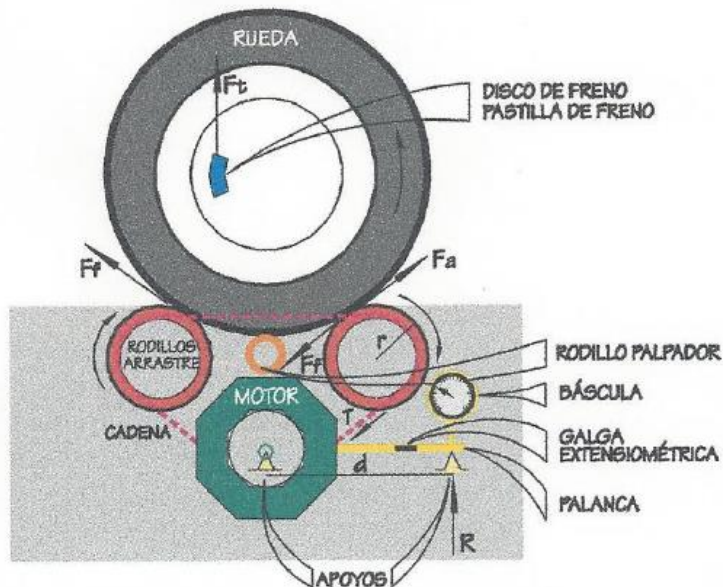
Nota. Adaptado de Construcción de un medio móvil para frenómetro de cuatro placas Futur 2000 de la Universidad Politécnica Salesiana (p. 32), por Clavijo M. & Condo A., 2021.

El frenómetro se compone principalmente de motores eléctricos, sensores de fuerza de frenado y dos conjuntos independientes de tres rodillos de medición. Su diseño permite evaluar con precisión la capacidad de frenado de cada rueda por separado. Los rodillos impulsores, que giran a baja velocidad gracias a un sistema de engranajes y motor, registran la fuerza de reacción cuando el vehículo aplica los frenos. Para medir esta fuerza, se emplea un transductor eléctrico con galgas extensométricas, que detecta las tensiones generadas durante la desaceleración. Además, se incorpora un tercer rodillo de menor tamaño a cada lado de los rodillos impulsores. Estos pequeños rodillos cumplen dos funciones clave: detectar la presencia del vehículo sobre el equipo y evitar que el sistema

se active si no hay un vehículo correctamente posicionado, brindando así una capa adicional de seguridad, tal como se muestra en la Figura 40 (Clavijo & Condo, 2021).

Figura 40

Esquema de componentes de un frenómetro de rodillos



Nota. Adaptado de Construcción de un medio móvil para frenómetro de cuatro placas Futur 2000 de la Universidad Politécnica Salesiana (p. 33), por Clavijo M. & Condo A., 2021.

Los parámetros de medición y cálculos realizados son los siguientes:

- Fuerza de frenado por cada rueda (frenos de servicio y de estacionamiento).
- Eficiencia total de frenado por cada eje
- Simetría de frenado entre ruedas del mismo eje.

Las ventajas de este banco son que permite realizar pruebas de manera rápida y de forma segura, sin necesidad que el vehículo este desplazándose. Sin embargo, presenta limitaciones como el hecho de no realizar una simulación en condiciones dinámicas reales del vehículo, es decir, cuando el vehículo está a diferentes velocidades, con cargas variables y diferentes tipos de suelo o superficie de rodadura (Clavijo & Condo, 2021).

Banco o Frenómetro de placa

El frenómetro de placas es un sistema diseñado para evaluar el rendimiento de frenado de cada rueda de forma individual bajo condiciones dinámicas, sin necesidad de retirar el vehículo de su posición. Este tipo de banco de pruebas está conformado por dos

placas móviles paralelas instaladas sobre sensores de fuerza, que se desplazan ligeramente cuando se aplica el freno. Esta acción permite medir la fuerza ejercida por cada rueda al frenar. Además, el sistema es capaz de detectar el desequilibrio entre las ruedas izquierda y derecha del eje gracias a diferencias en el voltaje captado por los transductores ubicados bajo el chasis. Durante el ensayo, una computadora recoge los valores de las fuerzas y calcula automáticamente tanto la eficiencia del sistema como posibles asimetrías. Esto permite realizar un diagnóstico confiable siempre que se ingrese correctamente el peso del vehículo o se utilice un sistema de pesaje integrado.

Una versión moderna de este dispositivo es el frenómetro de placas Altus NT4S1900 (ver Figura 41), diseñado para realizar pruebas simultáneas en ambos ejes y obtener mediciones precisas de peso y fuerza de frenado gracias a sus 16 celdas de carga integradas. Su diseño de bajo perfil facilita el acceso de vehículos deportivos o con carrocería baja. Este sistema incorpora un software intuitivo compatible con redes de inspección vehicular, permitiendo el registro automático de datos mediante sensores ubicados en la palanca o el pedal del freno. Gracias a estas características, este tipo de frenómetro ofrece resultados precisos, rápidos y replicables (Clavijo & Condo, 2021).

Figura 41

Frenómetro de placas



Nota. Adaptado de Construcción de un medio móvil para frenómetro de cuatro placas Futur 2000 de la Universidad Politécnica Salesiana (p. 34), por Clavijo M. & Condo A., 2021.

2.1.5 Conceptos estadísticos para manejo de datos

La investigación incorpora herramientas estadísticas fundamentales para el análisis y validación de los resultados que se obtendrán, especialmente en lo que respecta a la

contratación de hipótesis y el comportamiento de las variables antes y después del proceso experimental.

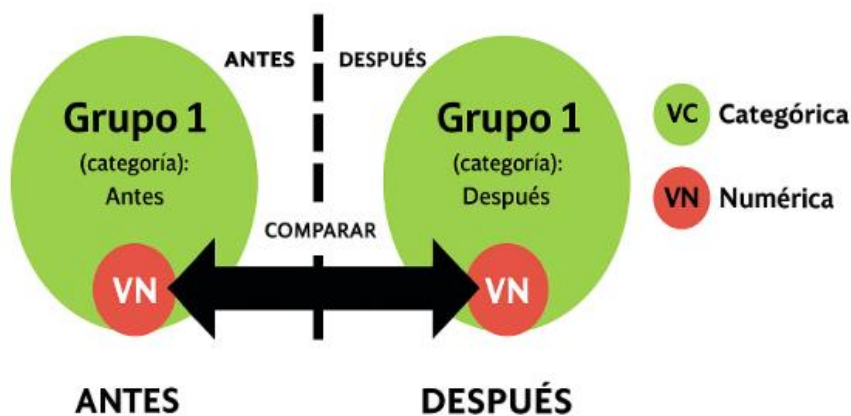
Prueba “t” de Student para muestras relacionadas

La prueba t de Student para muestras relacionadas es una técnica estadística que permite comparar dos mediciones de una misma variable, realizadas en un mismo grupo, pero en momentos diferentes (por ejemplo, antes y después de un mantenimiento o intervención). Su finalidad es determinar si existe una diferencia significativa entre ambas mediciones, lo que permite validar o rechazar una hipótesis formulada.

Esta prueba resulta especialmente útil en estudios de tipo longitudinal, donde se analiza cómo varían los datos tras aplicar un procedimiento técnico (ver Figura 42). Si los resultados difieren significativamente, se confirma que la intervención tuvo un efecto real. En cambio, si no hay diferencia significativa, se asume que la intervención no generó un impacto relevante.

Figura 42

T de Student para dos muestras relacionadas



Matemáticamente, la prueba compara las medias de dos momentos, considerando la varianza y el tamaño de cada muestra. El valor de “t” resultante se interpreta en función de una distribución de Gauss, donde valores cercanos a 0 indican nula diferencia y valores extremos +1 (nivel más óptimo de la validez) o -1 (nivel más deficiente de una validez) sugieren diferencias estadísticamente relevantes (Sotelo, 2020).

Para aplicar la prueba t, se comparan los resultados obtenidos por un mismo grupo en dos momentos diferentes (antes y después de un mantenimiento preventivo del sistema de frenos). A continuación, se muestra la ecuación 14, que permite determinar si la diferencia entre ambos grupos es estadísticamente significativa.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{N_1 + N_2}}} \quad (14)$$

donde:

\bar{x}_1 = media del grupo antes del mantenimiento

\bar{x}_2 = media del grupo después del mantenimiento

S_1^2 = varianza del grupo antes

S_2^2 = varianza del grupo después

N_1 = tamaño de muestra antes

N_2 = tamaño de muestra después

Prueba de normalidad (p)

Antes de aplicar cualquier prueba paramétrica como la “t”, es necesario comprobar si los datos siguen una distribución normal. Para esto, se hace uso de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, la cual evalúa si la distribución de los datos se ajusta o no a un comportamiento gaussiano. Esta prueba plantea dos hipótesis:

- Hipótesis nula (Ho): los datos se distribuyen normalmente.
- Hipótesis alternativa (H1): los datos no siguen una distribución normal.

El criterio de decisión se basa en el valor p (p-value)

Si el valor de “P” obtenido es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula y puede aplicarse la prueba t de Student con confianza. Si es menor, se considera que los datos no son normales, y se deben utilizar pruebas no paramétricas (Sotelo, 2020).

2.2 Marco Conceptual: Definición de conceptos o términos

Eje vehicular. Se define como “conjunto mecánico que conecta las ruedas de un vehículo, permitiendo su giro o rotación y soportando parte del peso. En los vehículos se divide en eje delantero y eje posterior” (Reif, 2014).

Sistema hidráulico de frenos. Se define como el “sistema que transmite la fuerza del pedal de freno a los frenos de cada rueda por medio del líquido de freno (fluido incomprensible)” (Reif, 2014).

Coefficiente de arrastre. Se define como “un valor adimensional que representa la resistencia aerodinámica que ofrece un vehículo al desplazarse, dependiendo del diseño del cuerpo y superficie frontal” (Heisler, 2002).

Área frontal del vehículo. Se define como “la sección visible del vehículo en vista frontal y se usa para calcular la resistencia aerodinámica. A medida que aumenta este valor, aumenta el arrastre” (Heisler, 2002).

Centro de gravedad. Se define como “el punto en el cual se concentra el peso total del vehículo, y su ubicación afecta de forma directa a la distribución de la fuerza de frenado en cada eje” (Gillespie, 1992).

Carga dinámica. Se define como “la fuerza que se transfiere entre los ejes cuando el vehículo frena, alterando temporalmente la distribución del peso” (Heisler, 2002).

Calor específico. Se define como “la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un kilogramo de sustancia. En frenos, determina la capacidad térmica del disco o tambor” (García et al., 2018).

Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación

En este capítulo, correspondiente al desarrollo del trabajo de investigación de la presente tesis titulada “Propuesta de un sistema para medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos”, se describen de forma clara y detallada las acciones que se llevaron a cabo para dar forma al sistema de medición. El proceso está conformado por tres fases, desde la identificación de los parámetros clave del sistema de frenos hasta el ensamblaje y puesta en marcha del sistema de medición dentro del entorno controlado, comparando la eficiencia del sistema antes y después de un mantenimiento preventivo. Cada fase refleja el camino seguido para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis.

Dicho proceso fue ejecutado en las instalaciones del Instituto de Transportes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (INTRAFIM-UNI), un espacio especializado en investigación y validación técnica de sistemas vehiculares. A continuación, se describe brevemente el entorno institucional donde se llevó a cabo esta investigación.

El INTRAFIM-UNI es un espacio académico y técnico orientado a la investigación, evaluación y mejora de los sistemas de transporte terrestre. Forma parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica y ha sido concebido como un centro que integra formación práctica, desarrollo tecnológico y servicios especializados para el sector automotor.

Entre sus principales actividades destacan la realización de ensayos técnicos, verificación de modificaciones vehiculares, y la emisión de certificados de conformidad relacionados con el montaje, la fabricación y la seguridad de vehículos. También ofrece capacitaciones, talleres y cursos prácticos dirigidos a estudiantes, técnicos y profesionales, fomentando una formación continua alineada con los avances tecnológicos del sector.

El INTRAFIM-UNI tiene como misión aportar al desarrollo del transporte en el país, brindando soporte técnico y promoviendo soluciones seguras e innovadoras. Además, busca consolidarse como un referente en investigación aplicada, con un enfoque formativo que combina teoría y práctica.

Por todo ello, este instituto fue elegido como el lugar de implementación del sistema de medición desarrollado en esta investigación. Sus instalaciones permitieron llevar a cabo los ensayos experimentales en un entorno controlado, seguro y con las condiciones necesarias para validar técnicamente la eficiencia del sistema de frenos.

3.1 Fase 1: Identificación de parámetros clave para evaluar la eficiencia del sistema de frenos y diseño conceptual

Esta primera fase representa el punto de partida metodológico de la tesis, ya que se orienta a identificar los parámetros clave que permiten evaluar la eficiencia de un sistema de frenos convencional en un vehículo liviano de la categoría M1. Esta tarea no solo es esencial para la propuesta del sistema de medición, sino que también aporta el marco de referencia para todo el proceso de medición, cálculo y análisis comparativo que se desarrollará posteriormente.

El vehículo seleccionado para este estudio es un Datsun modelo JNL710 (ver Figura 43), que cuenta con un sistema de freno convencional: disco-pastilla en el eje delantero y tambor-zapata en el eje posterior. Sobre este sistema se incorporaron dispositivos de medición que permiten capturar parámetros físicos relevantes durante la fase activa del frenado, sin alterar la estructura original del vehículo.

Figura 43

Vehículo Datsun modelo JNL710



Para comprender qué es lo que se va medir para hablar de eficiencia de frenado se llevó a cabo a una revisión cuidadosa de fuentes bibliográficas, manuales técnicos, normas del sector automotriz y trabajos de investigación similares. A partir de esta investigación, se definió un conjunto de parámetros que permiten describir, cuantificar y analizar el comportamiento del sistema de frenos bajo condiciones controladas. La selección se basó en tres criterios fundamentales: primero debido a su relevancia técnica, segundo debido a su relación directa con la eficiencia del frenado y por último debido a su viabilidad de medición mediante instrumentos accesibles, confiables y seguros. A continuación, se muestran los parámetros clave seleccionados:

- **Presión hidráulica en cada circuito de freno:** corresponde a la presión generada en los circuitos hidráulicos cuando el sistema de frenos es activado. Esta variable permite conocer la intensidad con la que se transmite la fuerza desde el pedal hacia los elementos de fricción. Su análisis por eje y por lado (izquierdo y derecho) permite evaluar la uniformidad y distribución del frenado.
- **Temperatura de los elementos de fricción:** durante una frenada, la energía cinética del vehículo se transforma en calor a través de la fricción entre componentes como discos, pastillas, tambores y zapatas. El monitoreo de esta temperatura es crucial para entender el comportamiento térmico del sistema y detectar posibles pérdidas de eficiencia por sobrecalentamiento (*fading*).
- **Velocidad inicial del vehículo:** Se refiere a la velocidad a la que se encuentra circulando el vehículo justo antes de aplicar los frenos. Es una variable esencial para estimar la energía cinética del sistema y calcular tanto la fuerza de frenado necesaria como la distancia total de detención.
- **Masa del vehículo:** incluye tanto el peso del vehículo como la carga experimental que transporta. Dado que la inercia es proporcional a la masa, esta variable es clave para calcular la cantidad de energía que el sistema de frenos debe disipar durante cada ensayo.

- **Distancia de frenado:** Representa el espacio recorrido desde el momento en que se activa el freno hasta que el vehículo se detiene completamente. Aunque se trata de una variable derivada de otras, su interpretación es directa y se utiliza habitualmente como uno de los principales indicadores de desempeño del frenado.
- **Coefficiente de fricción:** expresa la capacidad de resistencia al deslizamiento entre las superficies de contacto del sistema de frenos (disco–pastilla o tambor–zapata), y está condicionado por el tipo de material, su desgaste y su temperatura de operación.
- **Coefficiente de adherencia:** se refiere a la interacción entre el neumático y la superficie del pavimento. Este valor es determinante para definir la fuerza máxima de frenado posible sin que se produzca el bloqueo de ruedas o pérdida de control.

Estos parámetros fueron definidos no solo por su relevancia técnica, sino también por su aplicación, ya que pueden ser determinados bajo condiciones reales y servirán de base para los cálculos posteriores de eficiencia de frenado. Así mismo, su correcta identificación está alineada con el primer objetivo específico de la investigación y con la hipótesis que plantea que una adecuada selección de variables permite evaluar con precisión el desempeño del sistema de frenos.

3.2 Fase 2: Selección de equipos e instrumentos de medición para la evaluación del sistema de frenos convencional del vehículo

Una vez definidos los parámetros clave que permiten medir la eficiencia de frenado de un vehículo, el siguiente paso fue seleccionar correctamente los instrumentos adecuados para su medición en condiciones reales. Esta fase fue crucial, ya que el correcto funcionamiento del sistema de medición depende en gran medida de que los datos recolectados sean precisos, confiables y obtenidos de forma segura durante la conducción.

A diferencia de los métodos tradicionales que emplean bancos de prueba estáticos o de simulación, en esta investigación se optó por una propuesta más realista: integrar instrumentos de medición directamente al vehículo, sin modificar su estructura ni alterar su

sistema de frenos original. Esto significó una serie de desafíos técnicos, pero también abrió la posibilidad de registrar variables reales del comportamiento del sistema en movimiento, lo que aporta mayor valor y representatividad a los resultados. Es por esto que en esta fase se desarrollaron los siguientes pasos.

Paso 1: Evaluación de los parámetros clave seleccionados

Antes de elegir los equipos, fue necesario comprender bien cada parámetro definido en la Fase 1. Se analizaron sus unidades, la forma más adecuada de obtener su valor, y qué tan factible era medirlos directamente en el vehículo sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad del sistema. Esta evaluación inicial permitió efectuar la selección de instrumentos con mayor claridad y criterio técnico.

Paso 2: Criterios de selección

Los criterios utilizados para seleccionar los instrumentos fueron los siguientes:

- Compatibilidad con el sistema de frenos del vehículo, es decir, que no se requiera realizar ninguna modificación estructural para la medición.
- Capacidad de operar en condiciones reales de uso y movimiento.
- Precisión y confiabilidad en la medición del parámetro seleccionado.
- Historial de uso en investigaciones similares o aplicaciones industriales.
- Facilidad de integración en un futuro a sistema de recepción de datos y control con un mayor nivel de automatización.

Paso 3: Selección de los instrumentos más adecuados

Cada parámetro identificado se le asocio a un instrumento con la capacidad de medirlo de manera directa y precisa en condiciones reales, pero también fueron asociados a referencias técnicas. La siguiente Tabla 6 resume detalladamente esta selección de instrumentos y fundamentos técnicos de respaldo.

Tabla 6*Selección de instrumentos adecuados*

Item	Parámetro a medir	Instrumento seleccionado o fuente técnica	Motivo de la elección
1	Presión hidráulica	Transductores de presión hidráulica (0–35 bar) + controlador universal + fuente	Alta sensibilidad, respuesta inmediata y aptos para condiciones reales de frenado.
2	Temperatura de los frenos	Cámara Termográfica FLIR E6	Medición sin contacto, ideal para superficies calientes como discos o tambores.
3	Velocidad inicial y final del vehículo	Tacómetro del propio vehículo o validación externa de app móvil	Fuente confiable y fácil de registrar en cada ensayo.
4	Masa del vehículo	Ficha técnica del modelo Datsun J15	Valor constante y conocido, necesario para cálculos de energía cinética y eficiencia.
5	Distancia de frenado	Medidor laser Bosch GLM 120c	Medición sin contacto, método práctico en campo, permite obtener el valor exacto.
6	Coefficientes de fricción y adherencia	Valores técnicos referenciales según material y pavimento	Utilizados para evaluar el desempeño real del sistema.

Cámara Termográfica FLIR E6. Es una herramienta de uso industrial moderna, que permite detectar las áreas problemáticas por la subida de temperatura. La cámara Termográfica FLIR E6 (ver Figura 44) cuenta con varios modos de visualización y con un diapasón de temperaturas que va desde -20°C hasta los 250°C y con pantalla de 3" color LCD y su funcionamiento está basado en la tecnología MSX (visualización dinámica multiespectral). La función MSX permite agregar los detalles principales de imagen recibida de la cámara convencional integrada (espectro visible) a la imagen térmica en tiempo real, obteniendo de esta manera una imagen térmica combinada, con números, marcadores y otros detalles.

Figura 44

Cámara Termográfica FLIR E6



Bosch GLM 120c. Es un medidor láser profesional de alta precisión, ideal para trabajos en interiores y exteriores gracias a su alcance de hasta 120 metros y su visor digital con zoom que permite apuntar con exactitud incluso bajo luz solar directa (ver Figura 45). Cuenta con una pantalla a color de 2.8", inclinómetro integrado, memoria para almacenar hasta 50 mediciones y conectividad Bluetooth y USB para transferir datos a la aplicación Bosch MeasureOn. Su batería recargable de larga duración, diseño compacto y protección IP54 contra polvo y salpicaduras lo hacen especialmente útil para profesionales de la construcción, arquitectura e instalaciones técnicas que requieren mediciones rápidas, confiables y documentadas de forma digital en obra.

Figura 45

Medidor láser Bosch GLM 120c



Transductor de presión Estink de 35 bar. Es un dispositivo con cuerpo acero inoxidable y conexión macho roscada de 1/8" NPT (ver Figura 46), apto para trabajar con diferentes tipos de fluidos: aceite, combustible, gas, agua, aire, y con un rango de tensión de lectura de 0 a 5 Vcc que representa a la presión letrada en el rango de 0 hasta 35 bar. Este transductor utilizará un adaptador tipo Tee de acero inoxidable C304 con conexión hembra 1/8" NPT y macho de 1/8" NPT para poder integrarse a la tubería del líquido de freno, tal como se muestra en la Figura 47.

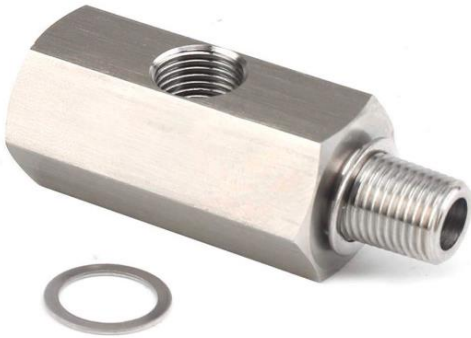
Figura 46

Transductor de presión Estink de 0 – 35 bar



Figura 47

Adaptador Tee de conexión roscada



Controlador universal de presión Novus N3000. Es un controlador ideal para procesos mecánicos e industriales y posee una interfaz con botonera donde se pueden realizar las configuraciones de la lectura que se requiere, en este caso será de la presión del fluido hidráulico del freno, este controlador posee tiene una entrada universal que acepta cualquier tipo de sensor y señal en la industria. Apto para trabajar con tensiones de alimentación de 12Vcc a 24 Vcc, además de contar con una comunicación serial RS485, tal como se muestra en la Figura 48.

Figura 48

Controlador universal Novus N3000



Fuente/convertidor DC/DC regulado con salida aislada. Es un dispositivo electrónico que tendrá como tensión de alimentación de ingreso en el rango de 9.2 - 18VDC y una tensión de salida de 5 VDC/ 3 A ajustable con un potenciómetro incorporado (ver Figura 49), con una potencia de 15 W. Este componente se alimentará de la batería del vehículo y que posteriormente actuará como fuente de alimentación para los cuatros transductores de presión que irán en la línea de ingreso de líquido de freno de cada rueda.

Figura 49

Fuente/convertidor DC/DC con salida aislada



Paso 4: Justificación técnica para la selección global

Los instrumentos seleccionados cumplen con los requisitos funcionales para un sistema de medición orientado a ensayos dinámicos, es decir, pruebas realizadas con el vehículo en desplazamiento controlado. Además, su elección se basó en referencias de uso técnico comprobado en ensayos de ingeniería automotriz, lo cual respalda la pertinencia de cada dispositivo.

La cámara Termográfica, por ejemplo, es ampliamente utilizada en diagnósticos térmicos a nivel industrial sin contacto, y los transductores de presión hidráulicos seleccionados son utilizados para distintos tipos de fluidos y con diferentes rangos de presión y se adaptan a trabajar con el líquido de freno sin ningún inconveniente.

Con esta fase se logró completar la selección estratégica de los instrumentos requeridos para la medición de cada parámetro técnico relacionado con la eficiencia del sistema de frenos. Esta decisión técnica es clave para asegurar que, en etapas posteriores, el sistema de medición pueda operar con eficacia, proporcionando datos confiables que respalden el análisis comparativo antes y después del mantenimiento preventivo.

La siguiente fase se enfocará en el proceso de instalación, integración y verificación funcional de los instrumentos seleccionados en el vehículo, bajo condiciones reales de ensayo.

3.3 Fase 3: Ensamblaje de los componentes del sistema de medición y validación operativa para evaluar el frenado antes y después del mantenimiento

Esta fase marca un momento crucial en el desarrollo del trabajo de investigación, ya que se lleva a la práctica todo lo que se definió y seleccionó en las fases anteriores. Su propósito es doble: por un lado, realizar el ensamblaje adecuado de los componentes mecánicos y de instrumentación sobre el vehículo; y por otro, verificar que el sistema funcione correctamente para permitir la evaluación comparativa del frenado antes y después del mantenimiento preventivo.

A diferencia de un banco de pruebas fijos, el sistema planteado se instala directamente sobre un vehículo real (modelo JNL710) dentro del espacio del INTRAFIM-UNI, lo cual permite simular condiciones reales de movimiento a diferentes velocidades, pero con control y seguridad. Esta metodología ofrece una ventaja significativa: genera datos reales y representativos sobre el comportamiento del sistema de frenos en situaciones operativas.

Paso 1: Preparación del vehículo y condiciones iniciales

Antes de instalar cualquier componente, se verificó que el vehículo estuviera en un estado de uso regular, es decir, sin intervención mecánica reciente en su sistema de frenos convencional. Esta validación fue clave para que los primeros ensayos reflejaran su estado antes de un mantenimiento preventivo. Adicionalmente, se preparó el entorno de prueba,

delimitando un espacio seguro, plano y seco, donde se realizarían las pruebas de frenado sin interferencias externas.

Paso 2: Ensamblaje del sistema de medición

Una vez garantizadas las condiciones previas del sistema de medición dentro del INTRAFIM-UNI, se procedió al montaje de los instrumentos de medición previamente seleccionados. Cada componente fue integrado cuidadosamente, asegurando una instalación segura, no invasiva o destructiva y operativamente funcional. Se consideraron las siguientes acciones:

- Adecuación de las cañerías hidráulicas para instalar los transductores de presión con sus adaptadores roscado tipo Tee en cada circuito hidráulico de las ruedas (ver Figura 50 y 51), estos deberán estar ubicados aguas debajo de la válvula dosificadora operativa. Esta se muestra la Figura 52 (U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2024).

Figura 50

Instalación de adaptadores tee y transductores de presión en el eje posterior



Figura 51

Instalación de adaptadores tee y transductores de presión en el eje delantero



Figura 52

Válvula dosificadora del sistema de frenos



- Control de las velocidades iniciales antes del proceso de frenado con el tacómetro del vehículo o aplicativo móvil que se incorpora al sistema de medición, tal como se muestra en figura 53.

Figura 53

Control de velocidad de vehículo, aplicativo móvil



- Posicionamiento de la cámara Termográfica en cada una de las cuatro ruedas del vehículo (**ver Anexo B**), abarcando tanto los discos como los tambores de freno, con el propósito de registrar la temperatura superficial inmediatamente después de cada frenado, una vez que el vehículo haya alcanzado una velocidad de cero. Este procedimiento se repetirá de forma continua durante los diez (10) ensayos programados en el sistema de medición, con el fin de evaluar el comportamiento térmico del sistema de frenos y su relación con la eficiencia del frenado.

- Se utilizará el medidor láser Bosch GLM 120 C para registrar con precisión la distancia de frenado del vehículo en cada uno de los diez (10) ensayos programados en el sistema de medición. El equipo será posicionado en un punto fijo alineado con el eje longitudinal del vehículo, permitiendo medir la distancia exacta recorrida desde el momento en que se inicia la acción de frenado hasta que el vehículo alcanza una velocidad de cero. Esta medición será realizada inmediatamente después de cada ensayo, garantizando

datos fiables que permitan analizar la variación de la distancia de frenado y su relación con el estado del sistema de frenos antes y después del mantenimiento preventivo.

- Preparación del sistema de conexionado eléctrico (**ver Anexo D**), partiendo desde la batería del vehículo como fuente principal de energía, hasta los puntos específicos de alimentación del transductor de presión y del controlador electrónico. Se utilizará una fuente reguladora de voltaje tipo DC-DC, capaz de convertir 12V a 5V, con el fin de garantizar un suministro estable y seguro a los dispositivos. Este sistema permitirá la recolección y el registro continuo y sincronizado de las señales de presión generadas durante los ensayos, asegurando una adecuada integridad de los datos para su posterior análisis.

Durante esta etapa también se validó la correcta instalación de los instrumentos, probando la respuesta de cada dispositivo de forma individual antes de las pruebas reales, adicionalmente se realizó una inspección de los principales componentes del sistema de freno convencional del vehículo Datsun modelo JNL710, tal como se muestra en la Figura 54.

Figura 54

Bomba de frenos, servofreno de vacío, frenos de disco y de tambor



Paso 3: Ejecución de los ensayos previos al mantenimiento

Con el sistema de medición correctamente ensamblado, se llevaron a cabo diez (10) ensayos controlados de frenado, cuyo objetivo fue registrar el comportamiento del

sistema de frenos en su estado original, antes de cualquier intervención de mantenimiento preventivo. Estas pruebas representan una etapa clave dentro del estudio, ya que proporcionan la línea base de comparación para evaluar la eficiencia del sistema tras la intervención.

En cada ensayo, el vehículo de prueba (Datsun modelo JNL710) fue acelerado progresivamente hasta una determinada velocidad y, posteriormente, se aplicó el freno de forma continua hasta alcanzar la detención total. Durante este proceso, se monitorearon y registraron los parámetros claves de interés, utilizando una combinación de instrumentos técnicos y métodos de cálculo. Las variables consideradas fueron las siguientes:

- Presión hidráulica en ambos ejes y lados del vehículo, registrada mediante transductores conectados al sistema de frenos, con una fuente de alimentación estabilizada (12V–5V DC). Esta medición permitió observar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de frenado.
- Temperatura superficial del sistema de fricción (discos y tambores), capturada inmediatamente después de cada frenada utilizando la cámara Termográfica FLIR E6. Esta variable es fundamental para identificar posibles fenómenos de pérdida de fricción o generación de calor excesivo.
- Velocidad inicial del vehículo, determinada a través del tacómetro del tablero y verificada mediante una aplicación móvil de medición de velocidad. Este dato fue tomado justo antes de iniciar cada frenada y se utilizó como referencia para el análisis de la eficiencia.
- Distancia de frenado estimada, verificado a través del medidor láser Bosch. Esta variable refleja la capacidad del sistema para detener el vehículo en un espacio determinado.
- Fuerza de frenado total, obtenida mediante el análisis indirecto de la presión hidráulica ejercida y las características geométricas del sistema de frenos, tales como el diámetro de los cilindros y el coeficiente de fricción promedio de los materiales.

- Eficiencia de frenado, calculada como el cociente entre la fuerza de frenado total y el peso del vehículo, expresada en porcentaje. Este indicador es el más relevante para evaluar el desempeño del sistema y será clave para la comparación entre el estado previo y posterior al mantenimiento.

El desarrollo de estos ensayos permitió recopilar información técnica confiable, replicable y útil para establecer una base comparativa que dará sustento a la validación del sistema de medición y a la mejora del sistema de frenado. Los valores obtenidos fueron registrados y organizados en tablas dinámicas de Excel para su posterior análisis.

Paso 4: Ejecución del mantenimiento preventivo

Luego de la primera serie de ensayos, se aplicó el mantenimiento preventivo al sistema de frenos, el cual incluyó:

- Cambio de pastillas de freno por unas de mayor calidad, tal como se muestra en la

Figura 55.

Figura 55

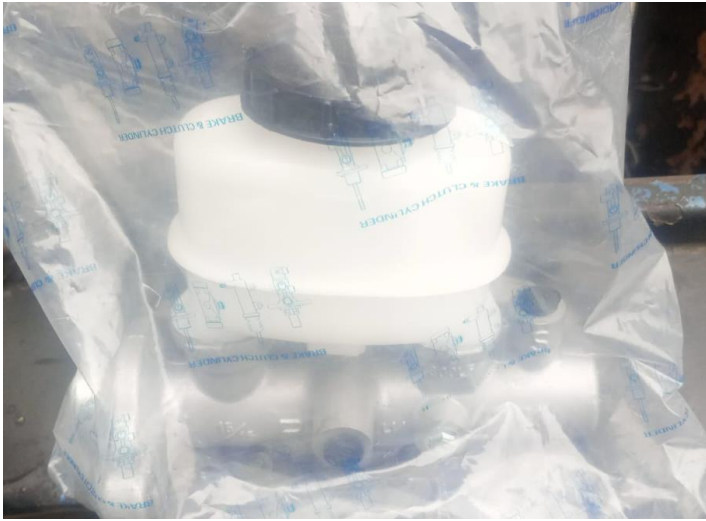
Pastilla de frenos nueva de la marca FRENOSA



- Cambio de la bomba de freno por una configuración moderna, apto para autos de la marca Nissan, tal como se muestra en la figura 56.

Figura 56

Nueva bomba de freno con depósito de líquido



- Inspección de fugas en el sistema de distribución de líquido de freno (cañerías) y corrección en caso lo requiera, tal como se muestra en la siguiente Figura 56.

Figura 57

Inspección de cañerías de freno



Estas acciones tienen como finalidad restaurar la respuesta óptima del sistema de frenado convencional del vehículo marca Datsun, sin alterar su diseño original.

Paso 5: Repetición de los ensayos post-mantenimiento

Con el sistema de frenos, luego de aplicar un mantenimiento preventivo, se repitieron los 10 ensayos experimentales bajo los mismos parámetros. Esta repetición permitió generar una nueva base de datos con valores actualizados, lo que facilitará en la siguiente el siguiente capítulo del análisis comparativo entre la eficiencia de frenado del antes y después del mantenimiento preventivo.

Paso 6: Registro y organización de la información recolectada

Toda la información obtenida en ambos ensayos repetitivos fue organizada en cuadros comparativos, con el objetivo de:

- Evaluar el comportamiento del sistema de frenos convencional y su efecto en cada rueda del vehículo.
- Determinar el impacto del mantenimiento sobre los parámetros clave.
- Calcular la eficiencia de frenado en ambos casos.

Diseño conceptual del sistema de medición de eficiencia de frenado

Para ilustrar la propuesta planteada, a continuación, se presenta la Tabla 7 del diseño conceptual, donde se muestran los elementos principales que conforman el sistema integrado sobre el vehículo:

Tabla 7*Diseño conceptual del sistema de medición de eficiencia de frenado*

Etapas	Elemento	Función
1ro	Base estructural del vehículo	Soporte principal del sistema, vehículo tipo Datsun J15.
2do	Sistema de frenado convencional	Modelo de análisis (disco–pastilla y tambor–zapata).
3ro	Transductor de presión hidráulica	Registro de presión durante la activación del freno.
4to	Fuente de alimentación 12V–5V	Estabiliza energía para el transductor y controlador
5to	Controlador con Display	Captura, visualiza y almacena datos en tiempo real.
6to	Medidor de temperatura (termografía)	Registro de temperatura de los componentes de fricción.
7mo	Medidor de distancia láser	Registro de la distancia recorrida por el vehículo hasta detenerse.
8to	App móvil o tacómetro	Medición de velocidad inicial y final

Esta fase permitió llevar a cabo los ensayos de forma organizada, controlada y replicable, asegurando que los datos obtenidos reflejen con precisión el comportamiento del sistema de frenos antes y después del mantenimiento.

Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados.

4.1 Valores medidos y datos calculados

Luego de haber ejecutado los ensayos experimentales descritos en el capítulo anterior, tanto en el estado original del sistema de frenos como después de aplicar el mantenimiento preventivo correspondiente, se procedió a organizar y analizar los datos obtenidos. Este análisis tuvo como objetivo conocer, de forma cuantitativa, cómo varió el comportamiento del sistema de frenado bajo condiciones reales de uso.

Para ello, se utilizaron las fórmulas previamente explicadas en el marco conceptual, a través de las cuales fue posible calcular la fuerza de frenado total ejercida y la correspondiente eficiencia del sistema de frenos en cada uno de los ensayos realizados.

Los parámetros clave registrados incluyeron la velocidad inicial del vehículo, las presiones hidráulicas generadas en cada eje, la temperatura de los elementos de fricción, la masa total del vehículo y la distancia de frenad. Todos estos datos fueron sistematizados en una hoja de cálculo en Excel (tabla dinámica), lo que permitió organizarlos y visualizarlos con mayor claridad.

Con la finalidad de brindar mayor transparencia en los resultados obtenidos, a continuación, se detallan los pasos seguidos para la obtención de cada valor calculado, tomando como base las fórmulas descritas en el marco teórico.

4.1.1 Detalle de los cálculos realizados para la obtención de la eficiencia de frenado antes del mantenimiento preventivo.

Con el objetivo de asegurar la trazabilidad y la transparencia de los resultados obtenidos, a continuación, se describen los pasos seguidos para el cálculo de la fuerza total de frenado, la eficiencia del sistema de frenos y la distancia estimada de frenado en cada uno de los ensayos experimentales.

Paso 1: Datos registrados por ensayo

Se utilizó como entrada la velocidad inicial del vehículo (en m/s), la masa total del vehículo con carga (1044 kg), y las presiones hidráulicas medidas en cada rueda, tanto en el eje delantero (sistema disco–pastilla) como en el eje trasero (sistema tambor–zapata), mediante transductores de presión.

Paso 2: Cálculo de la fuerza de frenado por rueda

Las presiones hidráulicas se asociaron a los valores de fuerza aplicados por cada freno, utilizando una relación empírica determinada por el área del pistón del sistema de freno y el coeficiente de fricción correspondiente:

Coefficiente de fricción

Se asumieron valores promedio de coeficiente de fricción basados en estudios experimentales con materiales comerciales. Según Gómez et al. (2014), el coeficiente de fricción en frenos de disco oscila entre 0,35 y 0,45, mientras que en frenos de tambor se encuentra típicamente entre 0,30 y 0,40. Por ello, se adoptaron los valores de 0,40 y 0,35 respectivamente, los cuales se encuentran dentro de los rangos normales de operación para vehículos livianos.

- $\mu_{disco-pastilla}(eje\ delantero) = 0,4$
- $\mu_{tambor-zapata}(eje\ posterior) = 0,35$

Área de los cilindros de rueda (disco-pastilla) y (tambor-zapata)

El diámetro del pistón (del calípter o cilindro de rueda) de freno (disco-pastilla) fue medido en paralelo a la instalación de los transductores de presión es:

$$D = 48\text{ mm} = 0,048\text{ m}$$

El área es:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,048)^2}{4} = 0,00181\text{ m}^2$$

El diámetro del pistón (cilindro de rueda) del freno de tambor fue medido en paralelo a la instalación de los transductores de presión es:

$$D = 28,1\text{ mm} = 0,0281\text{ m}$$

El área es:

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0281)^2}{4} = 0,00062 \text{ m}^2$$

La fuerza de frenado en cada rueda se calcula utilizando la siguiente ecuación del marco teórico:

$$F = P \cdot A \cdot \mu$$

Donde:

F = fuerza de frenado (N)

P = presión hidráulica (Pa)

A = área del pistón del cáliper o cilindro de rueda (m²)

μ = coeficiente de fricción entre el material de fricción y la superficie del tambor/disco

Para ello previamente se debe saber que:

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$$

Los valores obtenidos de presión hidráulica en el ensayo N°1 del sistema de frenos convencional a una velocidad de 10 Km/hr.

- $P_{\text{disco izquierdo}} = 17.20 \text{ bar} = 1.72 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{disco derecho}} = 16.55 \text{ bar} = 1.655 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{tambor izquierdo}} = 12.20 \text{ bar} = 1.22 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{tambor derecho}} = 14.20 \text{ bar} = 1.42 \times 10^6 \text{ Pa}$

Los valores calculados de la fuerza de frenado en el eje delantero son los siguientes:

$$F_{\text{disco izquierdo}} = 1,72 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00181 \times 0,4 = 1245,28 \text{ N}$$

$$F_{\text{disco derecho}} = 1,655 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00181 \times 0,4 = 1198,22 \text{ N}$$

Los valores calculados de la fuerza de frenado en el eje posterior son los siguientes:

$$F_{\text{tambor izquierdo}} = 1,22 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00062 \times 0,35 = 275,59 \text{ N}$$

$$F_{\text{tambor derecho}} = 1,42 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00062 \times 0,35 = 303,80 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza total de frenado es:

$$F_{fren} = F_{DI} + F_{DD} + F_{TI} + F_{TD}$$

$$F_{fren} = 1245,28 \text{ N} + 1198,22 \text{ N} + 275,59 \text{ N} + 303,80 \text{ N}$$

$$\mathbf{F_{fren} = 3022,89 \text{ N}}$$

Cálculo del peso del vehículo Datsun:

$$P_{vehiculo} = m \times g = 1044 \times 9,81 = \mathbf{10241,64 \text{ N}}$$

Cálculo de la eficiencia de frenado del Ensayo N°1:

$$\eta = \frac{F_{fren}}{P_{vehiculo}} = \frac{3022,89}{10241,64} = \mathbf{29,5 \%}$$

El mismo procedimiento fue aplicado en los ensayos 2 al 10, utilizando los valores registrados de presión hidráulica y velocidad inicial correspondientes a cada prueba. Se mantuvieron constantes el área de los pistones y los coeficientes de fricción para asegurar uniformidad en el análisis comparativo. A continuación, se presenta la Figura 58 donde se muestra los resultados correspondientes a las pruebas realizadas antes del mantenimiento preventivo del sistema de frenos convencional.

Figura 58

Cálculo de la eficiencia mecánica sin mantenimiento preventivo del vehículo

Ensayo N°	Velocidad antes del frenado (Km/h)	Velocidad antes del frenado (m/s)	Masa vehículo + carga (Kg)	Presión hidráulica freno - Eje Delantero (bar)		Presión hidráulica freno - Eje Tracero (bar)		Coeficiente fricción (Disco-pastilla)	Coeficiente fricción (tambor-zapata)	Fuerza frenado - Eje Delantero (N)		Fuerza frenado - Eje Tracero (N)		Fuerza Frenado total (N)	Peso del vehículo (N)	Eficiencia de frenado	Distancia de frenado (m)
				Lado izquierdo	Lado derecho	Lado izquierdo	Lado derecho			Lado izquierdo	Lado derecho	Lado izquierdo	Lado derecho				
1	10	2.78	1044	17.20	16.55	12.70	14.00	0.4	0.35	1245.28	1198.22	275.59	303.80	3022.89	10241.64	29.5%	0.27
2	15	4.17	1044	17.60	16.90	12.90	14.10	0.4	0.35	1274.24	1223.56	279.93	305.97	3083.7	10241.64	30.1%	0.60
3	20	5.56	1044	18.20	17.50	13.20	14.40	0.4	0.35	1317.68	1267.00	286.44	312.48	3183.6	10241.64	31.1%	1.03
4	25	6.94	1044	18.60	17.85	13.60	14.80	0.4	0.35	1346.64	1292.34	295.12	321.16	3255.26	10241.64	31.8%	1.58
5	30	8.33	1044	18.80	18.30	14.00	15.10	0.4	0.35	1361.12	1324.92	303.80	327.67	3317.51	10241.64	32.4%	2.23
6	40	11.11	1044	19.20	18.50	14.30	15.40	0.4	0.35	1390.08	1339.40	310.31	334.18	3373.97	10241.64	32.9%	3.89
7	50	13.89	1044	19.90	18.80	14.70	15.70	0.4	0.35	1440.76	1361.12	318.99	340.69	3461.56	10241.64	33.8%	5.93
8	60	16.67	1044	20.30	19.20	14.90	16.00	0.4	0.35	1469.72	1390.08	323.33	347.20	3530.33	10241.64	34.5%	8.37
9	70	19.44	1044	20.60	19.30	15.00	16.30	0.4	0.35	1491.44	1397.32	325.50	353.71	3567.97	10241.64	34.8%	11.28
10	80	22.22	1044	21.00	19.60	15.60	16.80	0.4	0.35	1520.40	1419.04	338.52	364.56	3642.52	10241.64	35.6%	14.43

4.1.2 Detalle de los cálculos realizados para la obtención de la eficiencia de frenado después del mantenimiento preventivo.

Luego de haberse efectuado el mantenimiento preventivo del sistema de frenos, se repitieron los 10 ensayos experimentales bajo condiciones controladas, utilizando las mismas velocidades iniciales que en los ensayos previos. A partir de las mediciones obtenidas mediante los transductores de presión y los sensores conectados al sistema, se procedió a calcular nuevamente los parámetros clave.

Paso 1: Datos registrados por ensayo

Se utilizó como entrada la velocidad inicial del vehículo (en m/s), la masa total del vehículo con carga (1044 kg), y las presiones hidráulicas medidas en cada rueda, tanto en el eje delantero (sistema disco–pastilla) como en el eje trasero (sistema tambor–zapata), mediante transductores de presión.

Paso 2: Cálculo de la fuerza de frenado por rueda

Las presiones hidráulicas se asociaron a los valores de fuerza aplicados por cada freno, utilizando una relación empírica determinada por el área del pistón del sistema de freno y el coeficiente de fricción correspondiente:

Coeficiente de fricción

- $\mu_{disco-pastilla}(eje\ delantero) = 0,4$
- $\mu_{tambor-zapata}(eje\ posterior) = 0,35$

Área de los cilindros de rueda (disco-pastilla) y (tambor-zapata)

El diámetro del pistón (del calípter o cilindro de rueda) de freno (disco-pastilla) fue medido en paralelo a la instalación de los transductores de presión es:

$$D = 48\text{ mm} = 0,048\text{ m}$$

El área es:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,048)^2}{4} = 0,00181\text{ m}^2$$

El diámetro del pistón (cilindro de rueda) del freno de tambor fue medido en paralelo a la instalación de los transductores de presión es:

$$D = 28,1 \text{ mm} = 0,0281 \text{ m}$$

El área es:

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0281)^2}{4} = 0,00062 \text{ m}^2$$

La fuerza de frenado en cada rueda se calcula utilizando la siguiente ecuación del marco teórico:

$$F = P \cdot A \cdot \mu$$

Donde:

F = fuerza de frenado (N)

P = presión hidráulica (Pa)

A = área del pistón del cáliper o cilindro de rueda (m^2)

μ = coeficiente de fricción entre el material de fricción y la superficie del tambor/disco

Para ello previamente se debe saber que:

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$$

Los valores obtenidos de presión hidráulica en el ensayo N°1 del sistema de frenos convencional a una velocidad de 10 Km/hr.

- $P_{\text{disco izquierdo}} = 30,60 \text{ bar} = 3,06 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{disco derecho}} = 30,15 \text{ bar} = 3,015 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{tambor izquierdo}} = 22,10 \text{ bar} = 2,21 \times 10^6 \text{ Pa}$
- $P_{\text{tambor derecho}} = 22,40 \text{ bar} = 2,24 \times 10^6 \text{ Pa}$

Los valores calculados de la fuerza de frenado en el eje delantero son los siguientes:

$$F_{\text{disco izquierdo}} = 3,06 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00181 \times 0,4 = 2215,44 \text{ N}$$

$$F_{\text{disco derecho}} = 3,015 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00181 \times 0,4 = 2182,86 \text{ N}$$

Los valores calculados de la fuerza de frenado en el eje posterior son los siguientes:

$$F_{\text{tambor izquierdo}} = 2,21 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00062 \times 0,35 = 479,57 \text{ N}$$

$$F_{\text{tambor derecho}} = 2,24 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,00062 \times 0,35 = 486,08 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza total de frenado es:

$$F_{fren} = F_{DI} + F_{DD} + F_{TI} + F_{TD}$$

$$F_{fren} = 2215.44 \text{ N} + 2182.86 \text{ N} + 479,57 \text{ N} + 486,08 \text{ N}$$

$$\mathbf{F_{fren} = 5363,95 \text{ N}}$$

Cálculo del peso del vehículo Datsun:

$$P_{vehiculo} = m \times g = 1044 \times 9,81 = \mathbf{10241,64 \text{ N}}$$

Cálculo de la eficiencia de frenado del Ensayo N°1:

$$\eta = \frac{F_{fren}}{P_{vehiculo}} = \frac{5363,95}{10241,64} = \mathbf{52,4 \%}$$

El mismo procedimiento fue aplicado en los ensayos 2 al 10, utilizando los valores registrados de presión hidráulica y velocidad inicial correspondientes a cada prueba. Se mantuvieron constantes el área de los pistones y los coeficientes de fricción para asegurar uniformidad en el análisis comparativo. A continuación, se presenta la Figura 59 donde se muestra los resultados correspondientes a las pruebas realizadas después del mantenimiento preventivo del sistema de frenos convencional. Esta información servirá como base para la contratación de las hipótesis planteadas y para reflexionar, en los siguientes apartados, sobre el impacto que tiene el estado del sistema de frenos en su desempeño real.

Figura 59

Cálculo de la eficiencia mecánica con mantenimiento preventivo del vehículo

Ensayo N°	Velocidad antes del frenado (Km/h)	Velocidad antes del frenado (m/s)	Masa vehiculo + carga (Kg)	Presión hidraulica freno - Eje Delantero (bar)		Presión hidraulica freno - Eje Tracero (bar)		Coeficiente fricción (Disco-pastilla)	Coeficiente fricción (tambor-zapata)	Fuerza frenado - Eje Delantero (N)		Fuerza frenado - Eje Tracero (N)		Fuerza Frenado total (N)	Peso del vehiculo (N)	Eficiencia de frenado	Distancia de frenado (m)
				Lado izquierdo	Lado derecho	Lado izquierdo	Lado derecho			Lado izquierdo	Lado derecho	Lado izquierdo	Lado derecho				
1	10	2.78	1044	30.60	30.15	22.10	22.40	0.4	0.35	2215.44	2182.86	479.57	486.08	5363.95	10241.64	52.4%	0.15
2	15	4.17	1044	31.05	30.71	22.40	22.80	0.4	0.35	2248.02	2223.585	486.08	494.76	5452.445	10241.64	53.2%	0.34
3	20	5.56	1044	31.28	31.05	22.50	23.00	0.4	0.35	2264.31	2248.02	488.25	499.1	5499.68	10241.64	53.7%	0.60
4	25	6.94	1044	31.73	31.50	22.80	23.20	0.4	0.35	2296.89	2280.6	494.76	503.44	5575.69	10241.64	54.4%	0.92
5	30	8.33	1044	31.95	31.84	23.00	23.50	0.4	0.35	2313.18	2305.035	499.1	509.95	5627.265	10241.64	54.9%	1.31
6	40	11.11	1044	32.29	32.18	23.30	23.80	0.4	0.35	2337.62	2329.47	505.61	516.46	5689.155	10241.64	55.5%	2.31
7	50	13.89	1044	32.63	32.51	23.60	24.10	0.4	0.35	2362.05	2353.91	512.12	522.97	5751.05	10241.64	56.2%	3.57
8	60	16.67	1044	32.96	32.85	23.90	24.40	0.4	0.35	2386.49	2378.34	518.63	529.48	5812.94	10241.64	56.8%	5.09
9	70	19.44	1044	33.30	33.19	24.10	24.60	0.4	0.35	2410.92	2402.78	522.97	533.82	5870.49	10241.64	57.3%	6.85
10	80	22.22	1044	33.64	33.53	25.10	25.70	0.4	0.35	2435.36	2427.21	544.67	557.69	5964.93	10241.64	58.2%	8.81

4.1.3 Análisis térmico del sistema de frenos a partir de la energía cinética corregida y temperaturas superficiales medidas sin mantenimiento preventivo

Con el objetivo de estimar con mayor realismo la energía térmica absorbida por los componentes del sistema de frenos, se consideró no solo la energía cinética generada durante cada ensayo, sino también el efecto disipativo de la resistencia aerodinámica del aire. Este componente, cuya magnitud crece de forma cuadrática con la velocidad del vehículo, representa una fuente adicional de disipación de energía que no se convierte en calor dentro del sistema de fricción, sino que se transfiere directamente al aire circundante.

Para incorporar esta consideración, se calculó la energía disipada por el aire en cada ensayo a partir de la fuerza de arrastre aerodinámico, determinada mediante la ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

donde:

F_d = fuerza aerodinámica, N

C_d = 0,38 para el vehículo Datsun

ρ = 1,225 kg/m³

A = 1,75 m², área frontal del vehículo

v = velocidad inicial del vehículo en cada ensayo (en m/s)

La energía disipada aerodinámicamente se estimó como una fracción de la energía cinética total, en función de la proporción entre la fuerza de arrastre y la suma de esta con la fuerza de frenado hidráulica. A partir de ello, se obtuvo una energía cinética corregida, que representa únicamente la energía transformada en calor dentro del sistema de frenos.

Esta energía corregida fue distribuida entre el eje delantero y el eje posterior, utilizando los mismos porcentajes empleados en los cálculos previos. Luego, se descompuso según los elementos de fricción (pastilla y disco en el freno de disco; zapata y tambor en el freno de tambor), aplicando proporciones basadas en su contribución térmica relativa, tal como se muestran en los siguientes cálculos paso a paso:

PASO 1: Calcular la energía cinética del vehículo

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1044 \cdot 2,78^2 = 4030,89 \text{ J} = 4,03 \text{ kJ}$$

PASO 2: Calcular la fuerza de resistencia aerodinámica

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 = 0,5 \cdot 0,38 \cdot 1,225 \cdot 1,75 \cdot 2,78^2 = 3,14 \text{ N}$$

PASO 3: Calcular fracción de energía disipada por el aire

$$f = \frac{F_d}{F_d + F_{frenado}} = \frac{3,14}{3,14 + 3022,89} = 0,001039$$

PASO 4: Calcular energía absorbida por el aire

$$E_{aire} = f \cdot E_K = 0,0011039 \cdot 4,03 = 0,00444 \text{ kJ}$$

PASO 5: Energía térmica corregida para los frenos

$$E_{frenos} = E_K - E_{aire} = 4,03 - 0,00444 = 4,02 \text{ kJ}$$

PASO 6: Distribución de energía en los ejes

Eje delantero (58,72%):

$$E_{eje\ delantero} = 4,02 \cdot 0,5872 = 2,36 \text{ kJ}$$

Eje posterior (41,28%):

$$E_{eje\ delantero} = 4,22 \cdot 0,4128 = 1,66 \text{ kJ}$$

PASO 7: Distribución en los frenos de disco (delanteros)

Cada rueda (50% del eje):

$$E_{disco} = 2,36 \cdot 0,5 = 1,18 \text{ kJ}$$

Reparto entre pastilla y disco:

Pastilla (10%):

$$E_{pastilla} = 1,18 \cdot 0,1 = 0,12 \text{ kJ}$$

Disco (90%):

$$E_{disco} = 1,18 \cdot 0,9 = 1,06 \text{ kJ}$$

PASO 8: Distribución en frenos de tambor (posteriores)

Cada rueda (50 % del eje posterior):

$$E_{freno\ tambor} = 1,66 \cdot 0,5 = 0,83 \text{ kJ}$$

Reparto entre zapata y tambor:

Zapata (40 %):

$$E_{zapata} = 0,83 \cdot 0,4 = 0,33 \text{ kJ}$$

Tambor (60 %):

$$E_{zapata} = 0,83 \cdot 0,6 = 0,5 \text{ kJ}$$

Adicionalmente, para verificar experimentalmente el comportamiento térmico del sistema, se utilizó una cámara Termográfica FLIR E6 para registrar las temperaturas superficiales de los discos y tambores inmediatamente después de cada ensayo. Estos valores permiten establecer una relación directa entre la energía absorbida por cada componente y el incremento térmico observado.

De este modo, se determinó paso a paso la energía cinética generada en el Ensayo 1, considerando la influencia de la resistencia aerodinámica sobre la disipación total de energía. Una vez calculada la energía térmica realmente absorbida por los frenos, se procedió a distribuirla proporcionalmente entre los ejes delantero y posterior, y luego entre los distintos elementos de fricción (discos, pastillas, tambores y zapatas), conforme a los coeficientes establecidos previamente.

Este mismo procedimiento fue aplicado a los demás ensayos, ajustando los cálculos según la velocidad inicial correspondiente en cada caso. Los resultados globales de todos los ensayos se presentan a continuación en la Figura 60, donde se detalla la energía corregida por efecto aerodinámico, la distribución térmica por componente, y las temperaturas medidas experimentalmente en cada elemento del sistema de frenos.

Figura 60

Análisis térmico y medición de temperaturas de los frenos con la cámara Termográfica antes del mantenimiento preventivo

Ensayo N°	Masa vehículo + carga (Kg)	Velocidad antes del frenado (Km/h)	Velocidad antes del frenado (m/s)	Resistencia aerodinámica (N)	fracción energía absorbida por el aire	E. cinética (kJ)	E. eje delantero (kJ)	E. cada freno de disco (kJ)	E. pastilla (kJ)	E. disco (kJ)	E. eje posterior (kJ)	E. cada freno tambor (kJ)	E. zapata (kJ)	E. tambor (kJ)	Lectura de temperaturas eje delantero (°C)		Lectura de temperaturas eje tracero (°C)	
															Disco izquierdo	Disco derecho	Tambor izquierdo	Tambor derecho
1	1044	10	2.78	3.14	0.001039	4.02	2.36	1.18	0.12	1.06	1.66	0.83	0.33	0.50	22.62	20.20	21.82	20.20
2	1044	15	4.17	7.07	0.002288	9.04	5.31	2.65	0.27	2.39	3.73	1.87	0.75	1.12	25.19	22.10	22.56	20.70
3	1044	20	5.56	12.57	0.003933	16.05	9.42	4.71	0.47	4.24	6.63	3.31	1.33	1.99	28.02	24.80	23.54	21.80
4	1044	25	6.94	19.64	0.005998	25.02	14.69	7.35	0.73	6.61	10.33	5.17	2.07	3.10	33.45	29.60	25.60	23.70
5	1044	30	8.33	28.29	0.008454	35.94	21.10	10.55	1.06	9.50	14.84	7.42	2.97	4.45	38.19	34.10	28.67	26.30
6	1044	40	11.11	50.29	0.014685	63.50	37.28	18.64	1.86	16.78	26.21	13.11	5.24	7.86	50.50	44.30	34.21	31.10
7	1044	50	13.89	78.57	0.022194	98.46	57.81	28.91	2.89	26.02	40.65	20.32	8.13	12.19	69.23	60.20	41.80	38.70
8	1044	60	16.67	113.14	0.031053	140.50	82.50	41.25	4.12	37.12	58.00	29.00	11.60	17.40	95.53	83.80	54.06	49.60
9	1044	70	19.44	154.00	0.041376	189.20	111.09	55.54	5.55	49.99	78.11	39.05	15.62	23.43	128.91	115.10	69.55	64.40
10	1044	80	22.22	201.14	0.052331	244.29	143.44	71.72	7.17	64.55	100.85	50.43	20.17	30.26	175.28	156.50	90.61	83.90

Adicionalmente se realizan los cálculos de la variación de temperatura promedio (ΔT) en cada disco de freno utilizado la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot C_p}$$

Donde la masa del disco es 3,7 kg y el C_p del disco que es del material Fundición Gris Nodular de grafito laminar (Silicio + Manganeso) tiene un valor de 434 J/kg.°C.

Por lo que para el ensayo 1:

$$\Delta T_1 = \frac{1063,1}{3,7 \cdot 434} = 0,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De esta manera, se obtiene la variación de temperatura promedio correspondiente al Ensayo 1, a partir de la energía absorbida por el disco de freno. Este mismo procedimiento fue replicado para los demás ensayos, considerando en cada caso el valor específico de energía térmica disipada por el disco, permitiendo así estimar la evolución térmica del componente en función de las condiciones de frenado tal como se muestra en la Figura 61.

Figura 61

Delta de temperatura en los discos de freno

Ensayo N°	Masa disco (Kg)	Cp disco (J/kg.°C)	E. disco (kJ)	ΔT (°C)
1	3.7	434	1.06	0.66
2	3.7	434	2.39	1.49
3	3.7	434	4.24	2.64
4	3.7	434	6.61	4.12
5	3.7	434	9.50	5.91
6	3.7	434	16.78	10.45
7	3.7	434	26.02	16.20
8	3.7	434	37.12	23.12
9	3.7	434	49.99	31.13
10	3.7	434	64.55	40.20

4.1.4 Análisis térmico del sistema de frenos a partir de la energía cinética corregida y temperaturas superficiales medidas con mantenimiento preventivo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras la ejecución de los ensayos de frenado, luego de haber aplicado el mantenimiento preventivo al sistema de frenos del vehículo de prueba. La metodología de cálculo utilizada se mantuvo sin variaciones respecto al análisis previo desarrollado en la sección 4.1.3, manteniendo el enfoque de corrección de la energía cinética por efecto de la resistencia aerodinámica y su posterior distribución entre los distintos componentes del sistema de fricción.

La única diferencia sustancial entre ambos análisis radica en los valores experimentales de temperatura superficial registrados con la cámara Termográfica FLIR E6. Tal como se muestra en la Figura 62, se evidencia un incremento general de las temperaturas en los discos y tambores de freno, particularmente a velocidades más elevadas, lo que resulta coherente con una mayor eficiencia de frenado tras el mantenimiento. Además, se observa una reducción significativa de las diferencias de temperatura entre los lados izquierdo y derecho de ambos ejes, lo que indica una mejora en la uniformidad del frenado y en la distribución de la presión hidráulica.

Figura 62

Medición de temperaturas de los frenos con la cámara Termográfica después del mantenimiento preventivo

Ensayo N°	Masa vehículo + carga (Kg)	Velocidad antes del frenado (Km/h)	Velocidad antes del frenado (m/s)	Lectura de temperaturas eje delantero (°C)		Lectura de temperaturas eje tracero (°C)	
				Disco izquierdo	Disco derecho	Tambor izquierdo	Tambor derecho
1	1044	10	2.78	20.91	20.60	21.52	20.30
2	1044	15	4.17	22.66	22.00	22.20	20.75
3	1044	20	5.56	25.09	24.60	23.21	21.90
4	1044	25	6.94	29.27	28.70	24.91	23.50
5	1044	30	8.33	35.17	34.65	28.14	26.30
6	1044	40	11.11	45.80	44.90	33.48	31.00
7	1044	50	13.89	63.44	61.00	40.92	38.60
8	1044	60	16.67	86.31	83.80	52.97	49.50
9	1044	70	19.44	116.22	114.50	67.95	64.10
10	1044	80	22.22	156.72	154.40	89.25	84.20

Cabe señalar que los valores de variación de temperatura teórica calculados en la Figura 61, obtenidos a partir de la energía térmica absorbida por los discos de freno y aplicando la ecuación de transferencia de calor sensible, se mantienen constantes en este análisis post-mantenimiento. Esto se debe a que los parámetros de masa del disco y capacidad calorífica no han cambiado, y la energía disipada en cada ensayo fue calculada con base en las mismas condiciones físicas.

No obstante, al compararlos con las temperaturas registradas experimentalmente en la Figura 62, se observa una mayor correspondencia entre los valores teóricos y los valores medidos, así como una mejora en la simetría entre el lado izquierdo y derecho de cada eje. Esta relación encontrada entre teoría y medición experimental implica una mayor eficiencia de transferencia de calor y un equilibrio térmico uniforme, como consecuencia directa del mantenimiento preventivo realizado al sistema de frenos convencional.

4.2 Prueba de normalidad

Los resultados de prueba de normalidad según Shapiro-Wilk para los variables “Pre_Prueba” y “Post_Prueba” de la eficiencia de frenado, se obtuvieron utilizando el programa Python (**ver Anexo C**). Donde se evalúa que si el valor “p” es mayor que 0.05 (ver Figura 63), se asume que los datos siguen una distribución normal obtenidos se realiza la prueba de normalidad.

Figura 63

Resultado de la prueba de normalidad

Nº	Variable	Estadístico W	Valor-p	Conclusion
1	Pre_Prueba	0.967	0.8577	Distribucion Normal
2	Post_Prueba	0.980	0.9643	Distribucion Normal

Los resultados según la prueba de normalidad es lo siguiente:

- Pre_Prueba: valor “p” = 0.8577
- Post_Prueba: valor “p” = 0.9643

Ambos casos > 0.05 → Distribución normal.

Los resultados de la prueba t para muestras relacionadas (t-student pareada), aplicada entre los datos Pre_Prueba y Post_Prueba:

- Estadístico t: 306.74
- Valor "p": 2.12×10^{-19} (prácticamente cero)

Análisis de resultados de la prueba de normalidad

- La prueba de Shapiro-Wilk evalúa si una muestra proviene de una población con distribución normal.
- La hipótesis nula (H_0) establece que los datos se distribuyen normalmente.
- El valor-p en ambos casos es mayor a 0.05, por lo que no se rechaza H_0 .
- Tanto los datos de la eficiencia de frenado antes (Pre_Prueba) como después del mantenimiento (Post_Prueba) se distribuyen de manera normal.
- Esto significa que es estadísticamente válido aplicar pruebas paramétricas como la t de Student para comparar medias, o incluso análisis de regresión, si deseas evaluar la evolución de la eficiencia en función de la velocidad del vehículo.

4.3 Contrastación de las Hipótesis con la prueba de normalidad

Contraste de hipótesis general

H₀: La propuesta de un sistema de medición no permite medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.

H₁: La propuesta de un sistema de medición permite medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.

Decisión

La normalidad de los datos recolectados antes y después del mantenimiento confirma que los valores de eficiencia de frenado obtenidos son estadísticamente válidos y confiables; es decir, el sistema de medición genera datos con comportamiento estadístico esperado (normalidad). La medición realizada es robusta y permite aplicar métodos estadísticos paramétricos para comparar o analizar tendencias. Se fortalece la validez del diseño experimental, ya que los resultados siguen un patrón que respalda la calidad del instrumento de medición. Los resultados demuestran que el sistema de medición produce

un registro de valores confiables y estadísticamente tratables de la eficiencia del sistema de freno convencional. Por lo tanto, se descarta la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Contraste con las hipótesis específicas

Hipótesis específica 1

Ho: La identificación de los parámetros clave no permite una evaluación precisa de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.

H1: La identificación de los parámetros clave permite una evaluación precisa de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.

Decisión

La identificación de parámetros como la presión hidráulica, temperatura de frenado y distancia de detención permitió obtener mediciones consistentes, comparables y alineadas con los cambios observados antes y después del mantenimiento. Esto confirma que los parámetros seleccionados permiten evaluar con precisión la eficiencia del sistema de frenos. Por lo tanto, se descarta la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Hipótesis específica 2

Ho: La selección adecuada de equipos mecánicos e instrumentos de medición no garantiza el correcto funcionamiento del sistema de medición de eficiencia de frenado.

H1: La selección adecuada de equipos mecánicos e instrumentos de medición no garantiza el correcto funcionamiento del sistema de medición de eficiencia de frenado.

Decisión

La operatividad y funcionalidad del sistema de medición evidenció que los equipos mecánicos e instrumentos seleccionados fueron técnicamente adecuados. Los valores obtenidos fueron estables y confiables, lo que respalda la correcta elección de los componentes que conforman el diseño. Por lo tanto, se descarta la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Hipótesis específica 3

Ho: El ensamblaje correcto de los componentes mecánicos y de instrumentación no asegura la operatividad del sistema para evaluar el comportamiento de los frenos convencionales antes y después de un mantenimiento preventivo.

H1: El ensamblaje correcto de los componentes mecánicos y de instrumentación asegura la operatividad del sistema para evaluar el comportamiento de los frenos convencionales antes y después de un mantenimiento preventivo.

Decisión

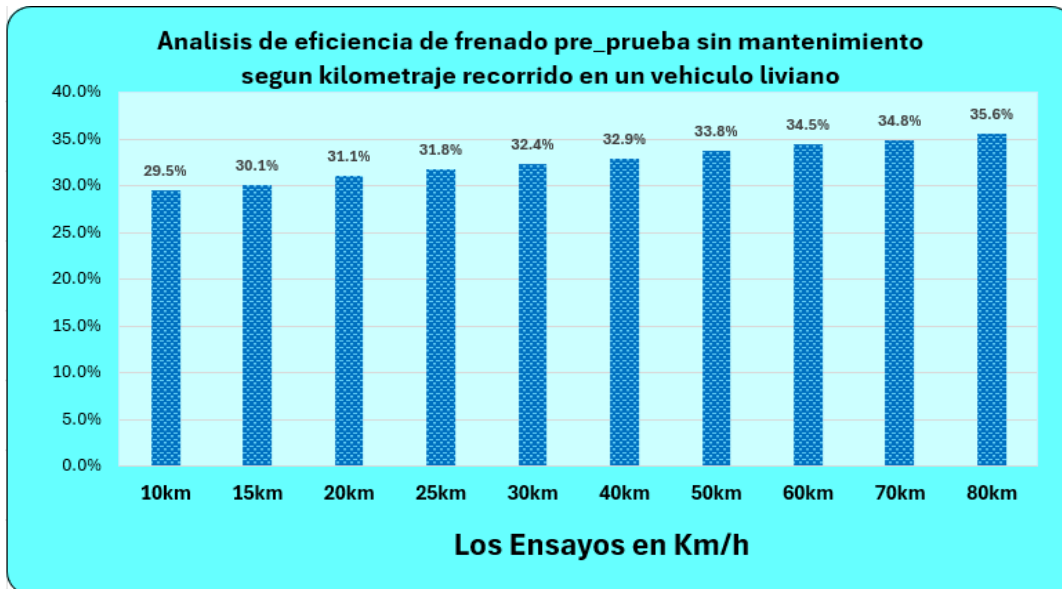
El sistema de medición funcionó correctamente durante los ensayos realizados antes y después del mantenimiento preventivo, sin presentar fallas en su ensamblaje ni en la captura de datos. Esto confirma que la integración adecuada de los componentes mecánicos e instrumentación asegura su operatividad y permite evaluar el comportamiento del sistema de frenos en ambas condiciones. Por lo tanto, se descarta la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alternativa (H1).

4.4 Análisis e Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos a partir del sistema de medición desarrollado demuestran que es posible medir con precisión la eficiencia de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. Las mediciones incluyeron parámetros clave como presión hidráulica por rueda, fuerza de frenado individual, los cuales fueron analizados en condiciones con y sin mantenimiento, A continuación, se muestra la Figura 64 y 65.

Figura 64

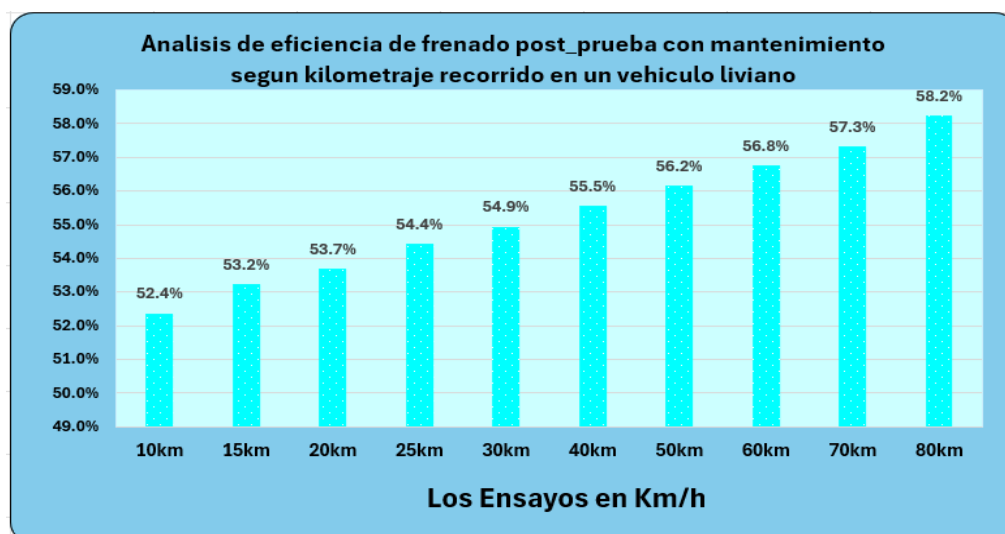
Eficiencia de frenado Pre_Prueba sin Mantenimiento del sistema de frenos



En la Figura 64, muestra los resultados de Pre_Prueba de eficiencia de frenado sin mantenimiento entre 29.5% como mínimo y 35.6% como máximo, que significa una baja tendencia a la respuesta de la eficiencia de frenado en un vehículo liviano de la categoría M1.

Figura 65

Eficiencia de frenado Pre_Prueba con Mantenimiento del sistema de frenos



En la Figura 65, se observa una clara correlación entre el mantenimiento del sistema (mejoras en pastillas, servofreno y presiones) y el incremento de la eficiencia del frenado (de 52.4% a 58.2%). A continuación, se muestra la Figura 66 y 67 donde se comparan ambos escenarios.

Figura 66

Eficiencia de frenado entre Pre y Post Prueba Sin / Con Mantenimiento (en barras)

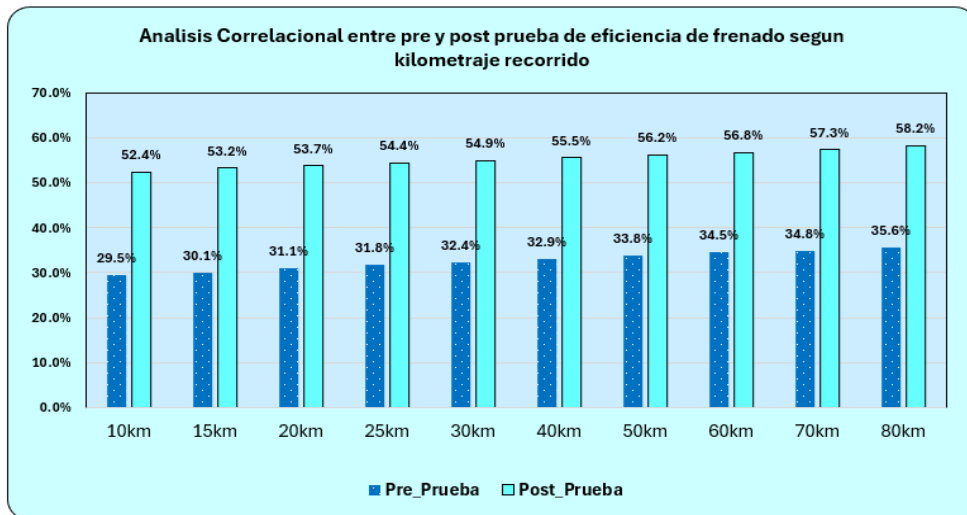
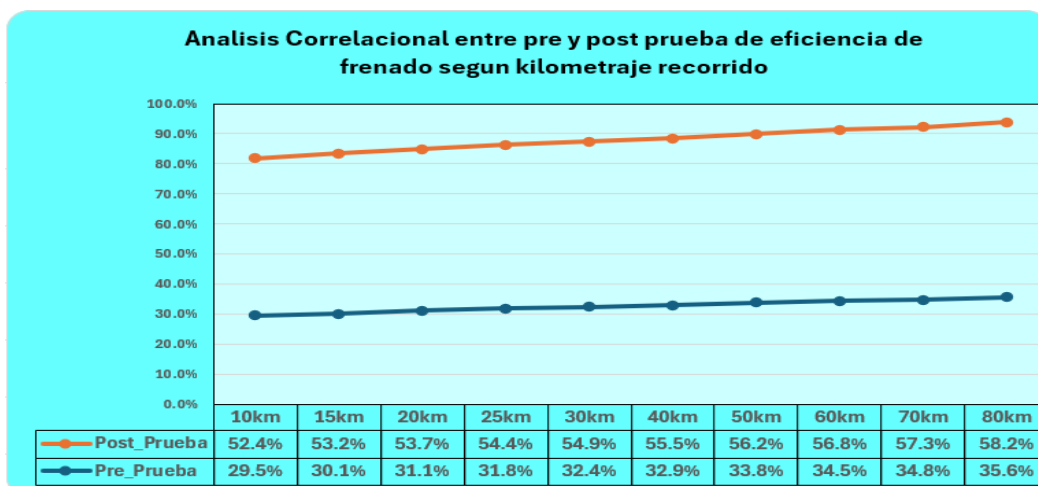


Figura 67

Eficiencia de frenado entre Pre y Post Prueba Sin / Con Mantenimiento (en lineal)



En las Figuras 66 y 67, se observa un análisis comparativo de Pre y Post Prueba de eficiencia de frenado, una clara correlación entre el mantenimiento del sistema (mejoras en pastillas, bomba de freno y presiones) y el incremento de la eficiencia del frenado.

Los gráficos evidencian un incremento sostenido de la eficiencia de frenado posterior al mantenimiento, en comparación con los valores obtenidos previamente. Esta tendencia se mantiene a lo largo de todos los puntos de ensayo, desde los 10 km/hr hasta los 80 km/hr, lo cual refuerza visualmente la mejora significativa detectada mediante la prueba t. Este comportamiento permite interpretar que:

- La intervención de mantenimiento tuvo un efecto positivo claro en la eficiencia del sistema de frenos convencional.
- El sistema de medición fue capaz de registrar con precisión esta mejora, evidenciando su capacidad de medición bajo condiciones controladas.
- La consistencia en los resultados post-mantenimiento demuestra que el sistema no solo es funcional, sino también reproducible y confiable.

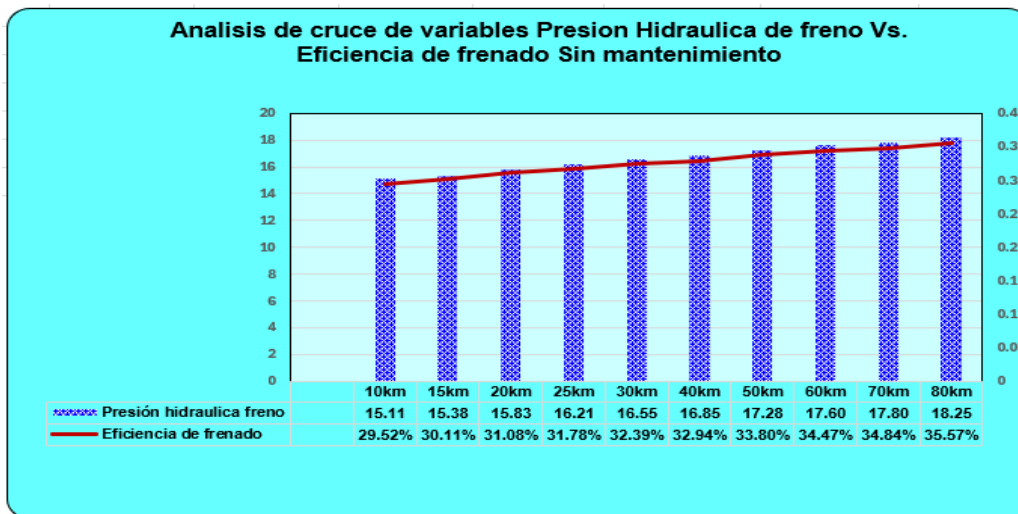
Las representaciones gráficas, por tanto, cumple un doble propósito: validar visualmente el efecto del mantenimiento y respaldar la utilidad del sistema de medición como herramienta de evaluación técnica.

Interpretación de cruce de variables

En el análisis experimental se ha realizado un cruce de variables clave que permite correlacionar la eficiencia de frenado con la presión hidráulica ejercida en el sistema y con la distancia de frenado obtenida (ver Figuras 68, 69, 70 y 71). Esta correlación se presenta tanto para el escenario "Sin mantenimiento" como para el escenario "Con mantenimiento", el cual considera mejoras como el reemplazo de pastillas de freno, cambio de la bomba de freno y verificación de fugas hidráulicas en las cañerías.

Figura 68

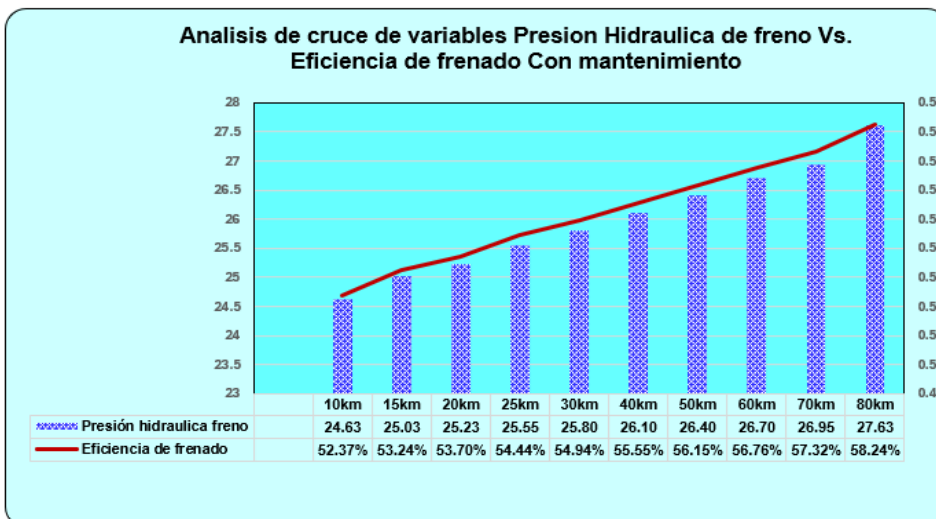
Análisis de variables de presión hidráulica Vs. Eficiencia de frenado sin mantenimiento



En la figura 68, se aprecia una relación directa entre la presión hidráulica máxima aplicada y la eficiencia de frenado. En el escenario sin mantenimiento, el sistema logra como máximo una eficiencia de 35.6%.

Figura 69

Análisis de variables de presión hidráulica Vs. Eficiencia de frenado con mantenimiento

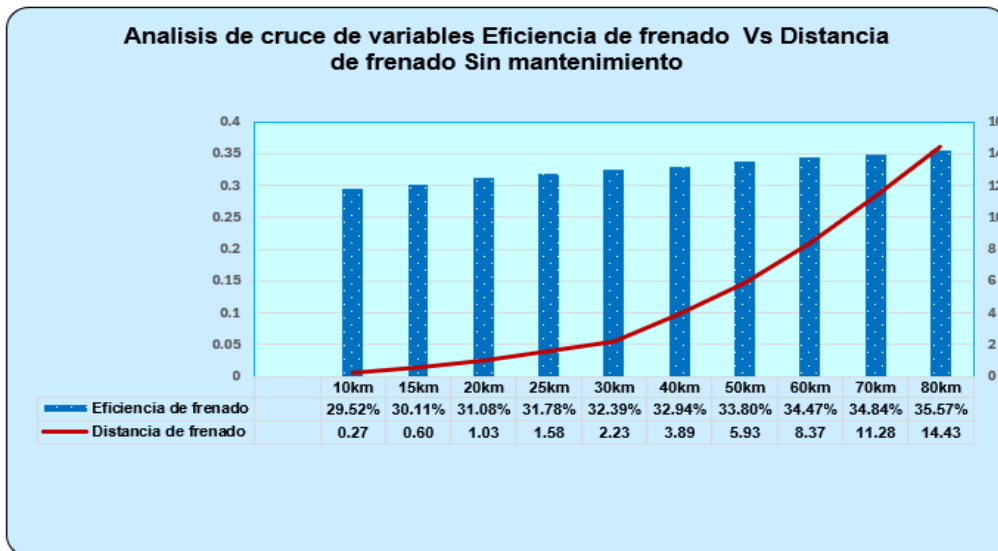


En relación a la figura 69, con el mantenimiento la eficiencia de frenado supera el 58%, esto permite comprobar que un aumento en la presión hidráulica (producto de una bomba de frenos más eficiente y de una menor pérdida hidráulica) permite que las fuerzas

de frenado transmitidas a través de las pastillas y zapatas sean significativamente mayores, lo que a su vez incrementa la capacidad de frenado del vehículo.

Figura 70

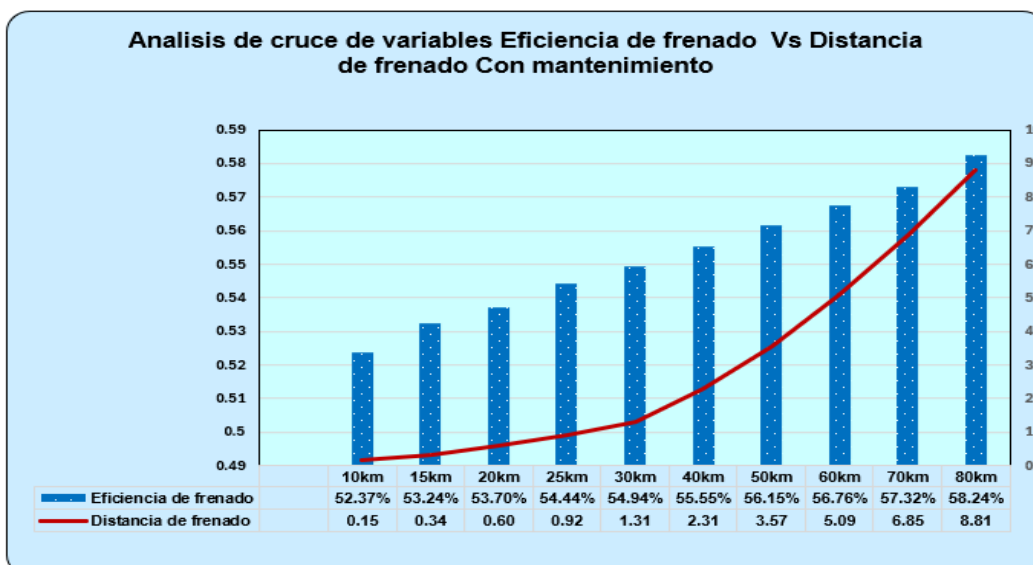
Análisis de variables de Eficiencia de frenado Vs. Distancia de frenado sin mantenimiento



En la figura 70, se observa una clara relación inversa: a mayor eficiencia de frenado, menor es la distancia requerida para detener el vehículo. Mientras que sin mantenimiento las distancias de frenado superan los 14 metros a altas velocidades.

Figura 71

Análisis de variables de Eficiencia de frenado Vs. Distancia de frenado con mantenimiento



En la figura 71, se evidencia que con el mantenimiento implementado se logra detener el vehículo en menos de 9 metros, Esta reducción no solo tiene implicancia técnica, sino también implicancias de seguridad, pues un sistema de frenos más eficiente permite mitigar en condiciones de emergencia.

Consideraciones de cruce de variables

Estas correlaciones cuantitativas permiten confirmar la hipótesis general de la investigación, al demostrar que el diseño e implementación del sistema de medición permite evaluar de manera objetiva y repetible la eficiencia de los frenos de un vehículo liviano, tanto en condiciones base como tras la aplicación de mantenimiento.

Además, el cruce de variables proporciona un insumo clave para validar que los parámetros seleccionados (presión, fricción, velocidad y fuerza total) son los adecuados para modelar el comportamiento real del sistema de frenado, lo cual responde también a las hipótesis a y b.

Se ha identificado y evaluado variables clave: presión hidráulica, fuerza de frenado por rueda, coeficiente de fricción, eficiencia, resistencia aerodinámica, distancia y tiempo de frenado, se ha demostrado que el sistema de medición permite cuantificar y evaluar la eficiencia de sistema de frenos en condiciones controladas. Asimismo, el diseño permitió:

- Simular condiciones reales de frenado.
- Observar cómo variaciones en la presión hidráulica afecta la eficiencia.
- Evaluar el sistema de frenos convencional con y sin mantenimiento.

Relación entre eficiencia de frenado y análisis térmico comparativo antes y después del mantenimiento preventivo

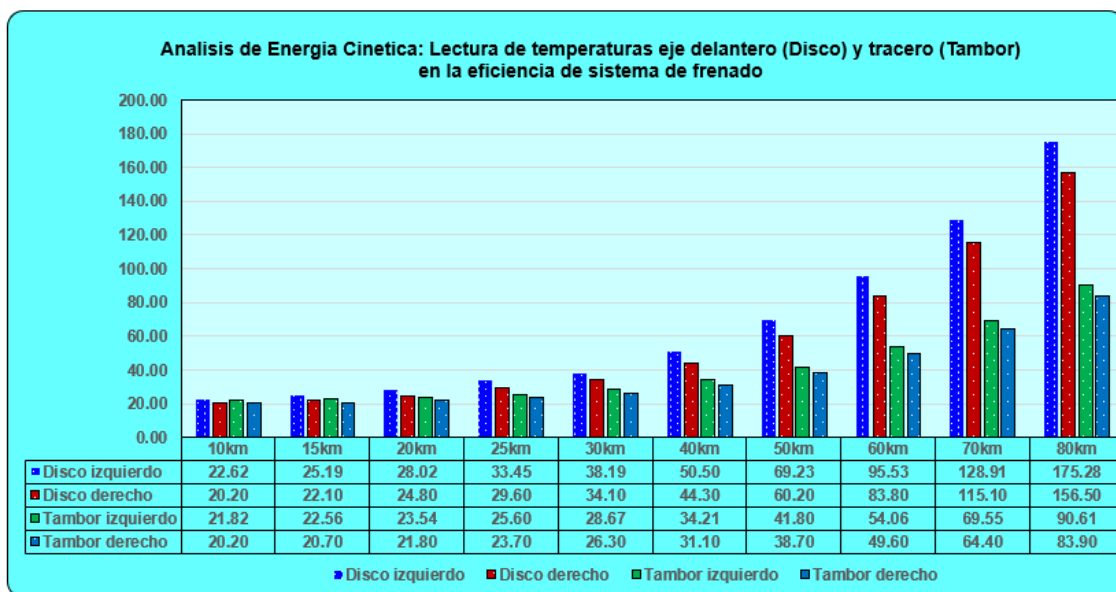
Además del análisis hidráulico y de eficiencia, se llevó a cabo un estudio térmico complementario del sistema de frenos, con el objetivo de evaluar el comportamiento energético y la temperatura alcanzada por los elementos de fricción, tanto antes como después del mantenimiento preventivo. Este análisis se estructuró a partir del cálculo de la energía cinética corregida considerando la resistencia aerodinámica y su distribución

proporcional en los componentes del sistema de frenado (discos, pastillas, tambores y zapatas), en función de la eficiencia mecánica obtenida en cada ensayo.

En la sección 4.1.3, se desarrolló el análisis correspondiente al estado inicial del sistema. Se calculó la energía térmica disipada por los discos de freno a partir de la energía cinética corregida, y se estimó la variación teórica de temperatura en función del calor específico y la masa del disco (ver Figura 60). Estos valores fueron comparados con las temperaturas reales medidas mediante cámara Termográfica FLIR E6 (ver Figura 61), revelando diferencias notables entre el lado izquierdo y derecho, en especial a altas velocidades (ver Figura 72). Esta asimetría térmica evidenció un comportamiento desigual en la transferencia de energía.

Figura 72

Temperatura de los frenos de cada rueda antes del mantenimiento



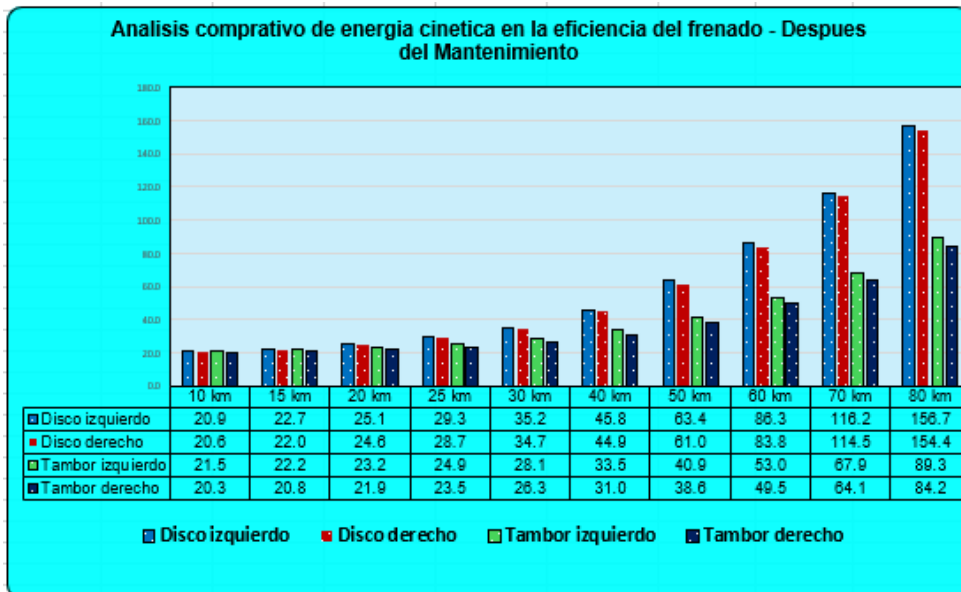
En la Figura 72, se presenta la evolución de las temperaturas superficiales de los discos y tambores durante los 10 ensayos antes del mantenimiento. Se observa que, a partir de los 50 km/h, las diferencias térmicas entre lados aumentan, lo que refuerza la relación directa entre un sistema térmicamente desequilibrado y una pérdida de eficiencia.

Luego, en la sección 4.1.4, se repitieron los cálculos con el sistema intervenido. Aunque los valores teóricos de energía y variación de temperatura permanecieron

constantes, las temperaturas medidas con la cámara mostraron un comportamiento térmico más estable (ver Figura 73), con menores diferencias entre ambos lados y un aumento más progresivo con la velocidad. Este comportamiento térmico más uniforme coincidió con un incremento en los valores de eficiencia de frenado.

Figura 73

Temperatura de los frenos de cada rueda después del mantenimiento



En la Figura 73 se presentan los resultados correspondientes a las temperaturas superficiales registradas en discos y tambores luego de aplicar el mantenimiento preventivo al sistema de frenos. Al comparar con la Figura 72, se puede observar una mejora significativa en el equilibrio térmico del sistema: las temperaturas del lado izquierdo y derecho en ambos ejes tienden a ser más similares en todos los ensayos, especialmente a velocidades medias y altas.

Estas observaciones, junto con los cálculos realizados, permiten concluir que el mantenimiento preventivo mejoró no solo la eficiencia de frenado (como ya se evidenció en los datos anteriores), sino también la capacidad del sistema para disipar el calor de forma balanceada y controlada. La estabilidad térmica lograda es coherente con un sistema operativo óptimo y confiable bajo condiciones reales de uso.

4.5 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio permiten confirmar que el sistema de medición propuesto cumple con los objetivos técnicos y metodológicos planteados, al proporcionar mediciones confiables sobre la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1.

Inicialmente, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, cuyos valores p para las muestras Pre_Prueba (0.8577) y Post_Prueba (0.9643) superaron el umbral de significancia de 0.05. Esto validó el supuesto de normalidad y justificó la aplicación de pruebas paramétricas para el análisis comparativo de medias. Esta verificación es fundamental en estudios experimentales, ya que asegura que los datos obtenidos se ajustan al comportamiento esperado de una población continua bajo condiciones de medición controladas.

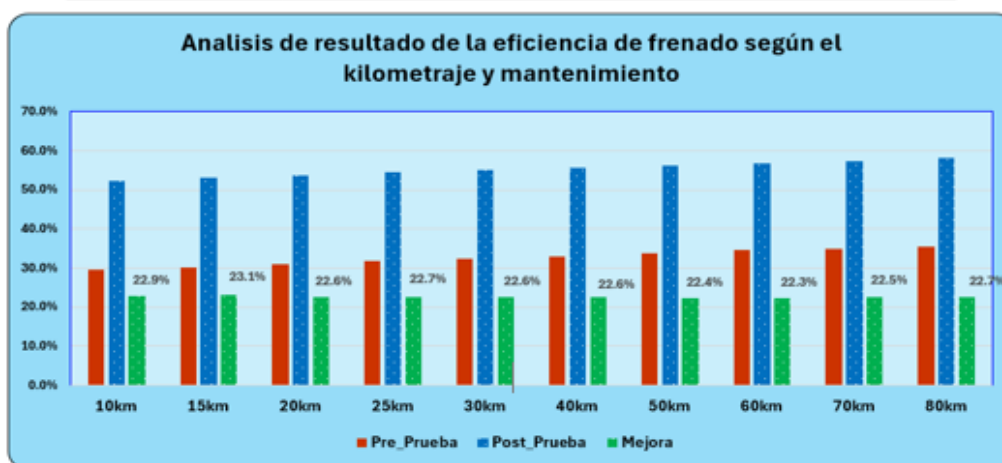
Posteriormente, la aplicación de la prueba t de Student para muestras pareadas reveló un valor- p de 2.12×10^{-19} , indicando una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de eficiencia antes y después del mantenimiento. Este hallazgo sustenta que el sistema de medición posee la sensibilidad necesaria para registrar variaciones relevantes en el desempeño del sistema de frenos. El hecho de que esta diferencia sea consistentemente positiva a lo largo de los distintos niveles de velocidades (de 10 a 80 km/hr) refuerza la robustez de los resultados.

Desde el punto de vista técnico, el aumento en los valores de eficiencia posterior al mantenimiento evidencia una mejora en la capacidad de frenado, atribuible a las acciones correctivas aplicadas en el sistema (como limpieza, ajuste o reemplazo de componentes). En este contexto, el sistema de medición no solo sirve como una herramienta de diagnóstico, sino que también puede utilizarse como medio de validación post-mantenimiento.

Figura 74

Comparación de la eficiencia de frenado antes y después del Mantenimiento

Ensayos	Pre_Prueba	Post_Prueba	Mejora
10km	29.5%	52.4%	22.9%
15km	30.1%	53.2%	23.1%
20km	31.1%	53.7%	22.6%
25km	31.8%	54.4%	22.7%
30km	32.4%	54.9%	22.6%
40km	32.9%	55.5%	22.6%
50km	33.8%	56.2%	22.4%
60km	34.5%	56.8%	22.3%
70km	34.8%	57.3%	22.5%
80km	35.6%	58.2%	22.7%



Según la figura 74, se observa la mejora de la eficiencia de frenado, mostrando de forma clara una tendencia ascendente en la eficiencia post mantenimiento, conservándose por encima de la línea base registrada previamente en todos los ensayos. Esta visualización respalda de forma intuitiva lo obtenido estadísticamente, facilitando la interpretación que:

- A mayor velocidad, se observa un incremento progresivo de la eficiencia de frenado antes del mantenimiento, lo cual puede deberse al asentamiento del sistema de frenos o condiciones de uso constantes.
- Luego del mantenimiento, la eficiencia mejora en todos los casos, alcanzando niveles superiores al 52% incluso desde los 10 km/hr, llegando hasta 58.2% a los 80 km/hr.
- La mejora porcentual es bastante consistente, con un incremento promedio cercano a +22.6 puntos porcentuales, lo que indica que el mantenimiento tiene un impacto uniforme y significativo.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos permiten analizar el comportamiento del sistema de frenos antes y después del mantenimiento preventivo, tomando como base la eficiencia de frenado, las presiones hidráulicas registradas y el análisis térmico comparativo. Antes del mantenimiento, se evidenció un desbalance funcional entre las ruedas de cada eje, observable tanto en las presiones hidráulicas como en las temperaturas medidas con cámara Termográfica. Las presiones eran desiguales entre ruedas del mismo eje, lo que provocaba una eficiencia de frenado reducida y diferencias en la distancia de detención. Tras el mantenimiento, las presiones se estabilizaron, y la eficiencia superó el 50 % en la mayoría de los ensayos, sobre todo a velocidades altas, demostrando que la eficiencia de frenado no solo depende de la presión generada, sino también de su correcta distribución entre ruedas.

La relación entre eficiencia de frenado y análisis térmico permitió comprender integralmente el comportamiento del sistema antes y después del mantenimiento preventivo. Los cálculos de energía cinética corregida, junto con las mediciones térmicas, evidenciaron una correlación directa entre el equilibrio térmico y el rendimiento del frenado. En el estado inicial, los valores de eficiencia de frenado eran menores y se observaron diferencias significativas en las temperaturas medidas entre el lado izquierdo y derecho de cada eje. Esta asimetría térmica fue indicativa de un desgaste desigual de los elementos de fricción, lo cual afectaba la capacidad del sistema para transformar de manera efectiva la energía cinética en calor. Por tanto, el análisis térmico no solo complementó la evaluación de eficiencia, sino que permitió identificar posibles fallas o desequilibrios funcionales.

Tras el mantenimiento preventivo, los resultados mejoraron notablemente: las temperaturas aumentaron proporcionalmente con la velocidad y la variación térmica entre lados se redujo. En paralelo, la eficiencia de frenado se incrementó en todos los ensayos, lo que refleja un sistema más equilibrado y eficiente. Estos hallazgos validan el uso del análisis térmico como herramienta complementaria para evaluar el estado operativo del sistema de frenos. Su integración con cálculos energéticos, eficiencia mecánica y

termografía infrarroja permite diagnosticar el rendimiento y anticipar necesidades de mantenimiento correctivo o predictivo.

En suma, los resultados discuten positivamente la viabilidad del diseño propuesto, su utilidad práctica y su alineación con las hipótesis planteadas. La combinación de resultados estadísticos sólidos con evidencia gráfica coherente valida tanto el diseño como la operatividad del sistema de medición, y lo posiciona como una herramienta aplicable en entornos reales de evaluación vehicular o formación técnica. Además de validar estadísticamente la mejora en la eficiencia de frenado tras el mantenimiento, los resultados permiten realizar una lectura técnica más profunda sobre el comportamiento del sistema de frenos en condiciones reales simuladas. El incremento progresivo de la eficiencia en función de la velocidad sugiere que el mantenimiento no solo mejora el rendimiento inmediato del sistema, sino que también optimiza su respuesta frente a mayores exigencias dinámicas.

Este comportamiento demuestra que el sistema de medición permite observar el rendimiento del sistema de frenado bajo distintos niveles de carga dinámica simulada (según la variación de velocidad en los ensayos). Esta capacidad controlada de simulación ofrece una ventaja significativa frente a métodos tradicionales más subjetivos o menos repetibles. En términos prácticos, los resultados respaldan la implementación del sistema de medición en entornos académicos, talleres técnicos o centros de inspección vehicular, permitiendo establecer criterios de diagnóstico preventivo basados en mediciones objetivas. Asimismo, puede emplearse como herramienta didáctica para formar estudiantes y técnicos en principios de frenado, mantenimiento mecánico y análisis de datos aplicados a la ingeniería vehicular.

Conclusiones

1. La propuesta del sistema de medición permitió contar con una herramienta funcional y precisa para medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 dentro del INTRAFIM-UNI. Su implementación facilitó la evaluación comparativa antes y después del mantenimiento preventivo, brindando resultados confiables y técnicamente sólidos. La experiencia obtenida durante su desarrollo y validación demuestra que el sistema propuesto no solo cumple su propósito, sino que también aporta valor como instrumento de aprendizaje y análisis dentro del entorno académico
2. La identificación de los parámetros clave, como la presión hidráulica, temperatura de los frenos, la velocidad del vehículo y la distancia de frenado, resultó adecuada para evaluar la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. Estos parámetros permitieron contrastar con precisión las hipótesis planteadas y establecer una relación clara entre la aplicación del mantenimiento preventivo y la mejora del desempeño del sistema de frenado.
3. La identificación y selección de los equipos mecánicos e instrumentos de medición fue adecuada para el sistema de medición propuesto, ya que permitió integrar de manera efectiva los componentes necesarios para registrar con precisión los parámetros clave del sistema de freno convencional. Esta elección instrumental sustentó técnicamente la funcionalidad del sistema de medición y su capacidad para cumplir con los objetivos experimentales propuestos.
4. El proceso de ensamblaje e integración de los componentes del sistema de medición fue técnicamente adecuado y permitió validar con éxito su operatividad en condiciones reales controladas. La aplicación del sistema propuesto facilitó la comparación precisa del sistema de frenos antes y después del mantenimiento preventivo, evidenciando un incremento promedio de 22.6 puntos porcentuales en la eficiencia de frenado, alcanzando un valor máximo de 58.2 % a 80 km/h. Además,

el análisis térmico complementario reveló una correlación directa entre la mejora en la eficiencia del frenado y la estabilidad térmica del sistema, observándose una reducción significativa de las asimetrías de temperatura entre lados, lo que sugiere una distribución más uniforme de la presión hidráulica y una disipación energética más equilibrada. Estos hallazgos confirman tanto la funcionalidad del sistema de medición como su capacidad para diagnosticar desequilibrios operativos y validar mejoras técnicas mediante mantenimiento preventivo.

Recomendaciones

1. Se recomienda mejorar el sistema de evaluación implementado tomando como base el ciclo de mejora continua de Deming (Planificar – Hacer – Verificar – Actuar), orientando su evolución hacia un sistema automatizado que permita optimizar la recolección, procesamiento y análisis de datos.
2. Optimizar el sistema de evaluación desarrollado en esta tesis mediante su automatización, incorporando un PLC y una interfaz HMI que permitan la recolección, procesamiento y visualización de datos con mayor detalle. Esta mejora facilitará la operación del sistema de medición y aumentará rapidez en el registro de datos.
3. Integrar el sistema de medición propuesto como herramienta formativa en los cursos de la Facultad de Ingeniería Mecánica, especialmente en las áreas de mantenimiento automotriz. Esto enriquecería el aprendizaje práctico de los estudiantes con experiencias reales y mediciones técnicas precisas.
4. Implementar un programa de mantenimiento regular del sistema de frenos a intervalos previamente definidos (por ejemplo, cada 10,000 km o según el desgaste), con el fin de mantener niveles óptimos de eficiencia de frenado.
5. Realizar pruebas de eficiencia de frenado antes y después de cada intervención técnica, como parte del control de calidad del sistema de frenos. Esta práctica permitirá validar si el mantenimiento realizado genera mejoras cuantificables y si el sistema conserva un rendimiento seguro a lo largo del tiempo.

Referencias

- Caicedo, J. y Palacios, W. (2024). *Análisis de la eficiencia del frenado utilizando distintos materiales de fricción en los elementos frenantes en un vehículo tipo automóvil*. Revista Social Fronteriza 2024; 4(2): e236. Doi [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(2\)236](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(2)236).
- Calderón, S., Santos, L. y Pineda, D. (2022). *Eficiencia del sistema de frenos en vehículos eléctricos*. Pol. Con. (Edición núm. 70) Vol. 7, No 10 octubre 2022, pp. 1743-1760 ISSN: 2550 - 682X doi: 10.23857/pc.v7i8.
- Carrasco, E. (2019). *Análisis comparativo del freno de tambor y freno de disco para optimizar la eficiencia del sistema de frenos en vehículo de servicio público de 800 cm³ de cilindrada* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV.
- Chiroque, J. (2020). *Análisis de los sistemas de frenos de un vehículo- determinación del sistema de frenos óptimo* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV.
- Clavijo, M. & Condo A. (2021). *Construcción de un medio móvil para el frenómetro de cuatro placas FUTUR 2000 de la Universidad Politécnica Salesiana* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio UPS.
- Correa, M. et al. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de supervisión de frenos hidráulicos en los vehículos livianos* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV.
- Deutsches Institut für Normung. (1992). *Sistemas de frenos hidráulicos; sistemas de frenos de doble circuito; abreviaturas para la distribución del circuito de frenos (DIN 74000)*.
- Frenosa. (2014). Catálogo de productos de freno. <https://www.frenosa.com/wp-content/uploads/2019/07/CATALOGO-PASTILLAS-WEB.pdf>

- García, R. et al. (2018). *Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209*, INGE CUC, vol. 14, no. 2, pp.9-18, 2018. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.01>
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Editorial SAE International.
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 611:2003 - Road vehicles, Braking of automotive vehicles and their trailers, Vocabulary. ISO.
- Lema, A. y Pinos, L. (2023). *Análisis de la eficiencia del frenado mediante pruebas dinámicas y computacionales para la motocicleta Axxo Tracker 250* [Trabajo de titulación profesional, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la UPS.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2008). *Manual de inspecciones técnicas vehiculares* (Resolución Suprema N.º 11581-2008-MTC/15). Diario Oficial El Peruano.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2008). *Reglamento Nacional de Vehículos* (Decreto Supremo N.º 025-2008-MTC). Diario Oficial El Peruano.
- Reif, K. (Ed.). (2014). *Brakes, brake control and driver assistance systems: Function, regulation and components*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03978-3>
- Rojas, V. et al. (2021). *Análisis de la eficiencia de un disco de freno convencional ventilado con respecto a un disco hiperventilado mediante mecanizado*. Ingenius. N. 25, (enero-junio). pp. 62-69. doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n25.2020.06>
- Serway, R. & Jewett, J. (2014). *Física para ciencias e ingeniería: Volumen 1*. 9º Edición. Editorial Cengage Learning.
- Sotelo, S. (2020). *propuesta de la telefonía IP segmentada para optimizar el rendimiento de red de comunicación (voz-dato) en la dirección de salud lima centro-2017* [Trabajo de doctorado, Universidad Nacional Federico Villareal]. Repositorio Institucional UNFV.

U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2024). 49 CFR 571.135 – Standard No. 135; Light vehicle brake systems. Code of Federal Regulations. Recuperado de: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-V/part-571/subpart-B/section-571.135>

U.S. Department of Transportation. (2023). *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 116: Motor Vehicle Brake Fluids (FMVSS 116)*. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration.

Yugsi, K., Gonzales, L., Reyes, G. y Rubio, J. (2021). *Estudio eficiencia en frenado con empaques de fricción local e importados en vehículos de categoría N1 bajo norma EC13H*. Pol. Con. (Edición núm. 59) Vol. 6, No 6 junio 2021, pp. 280-300 ISSN: 2550 - 682X doi: 10.23857/pc.v6i6.2757.

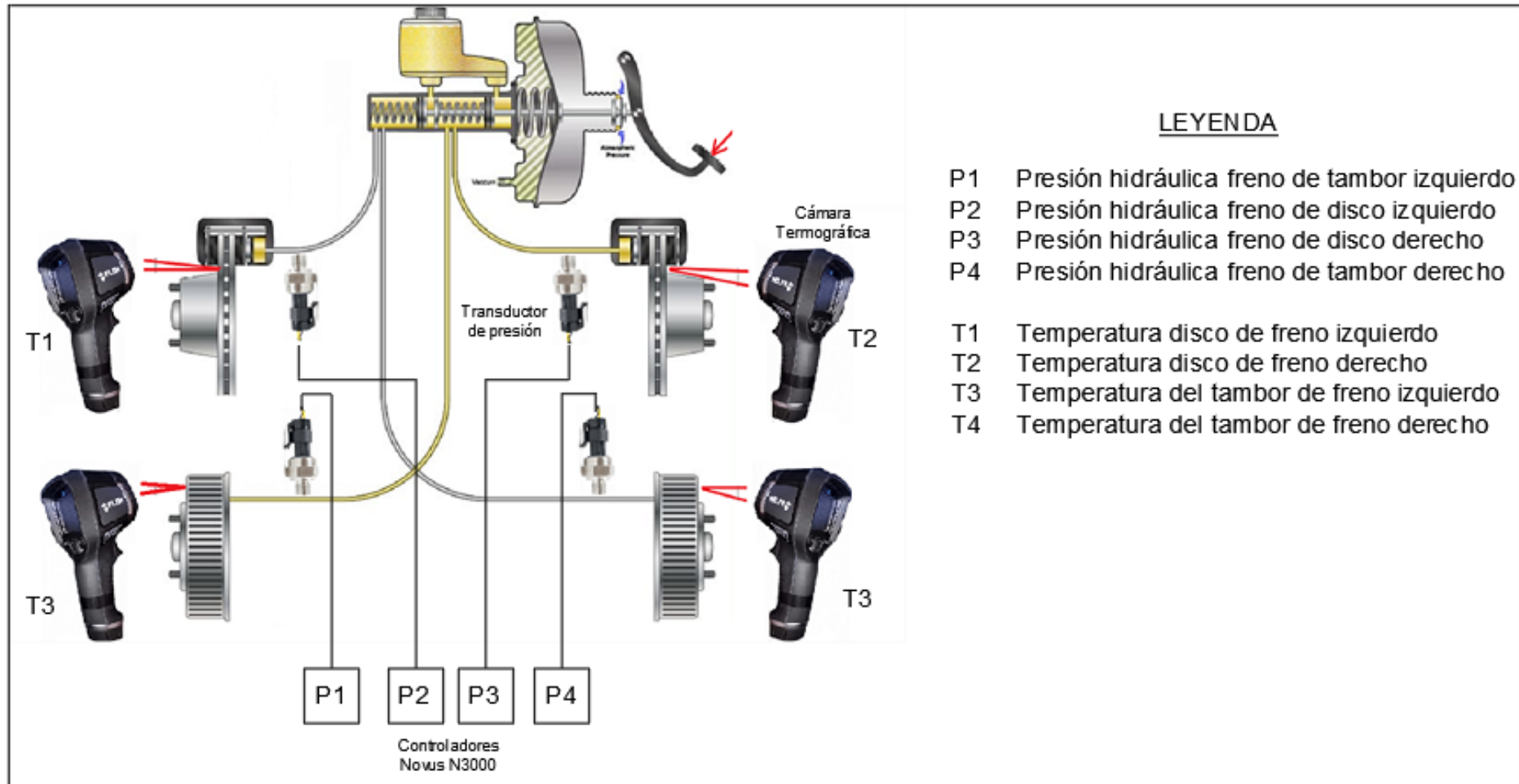
Anexos

ANEXO A: Matriz de consistencia.....	1
ANEXO B: Esquema de distribución de instrumentos de medición.....	2
ANEXO C: Calculo de prueba de normalidad con programa Python	3
ANEXO D: Diagrama de operación de la toma de datos de transductor de presión	4
ANEXO E: Encuesta sobre el tema de tesis a un grupo de 20 personas (estudiantes y docentes de la UNI)	5

ANEXO A: Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Metodología
¿De qué manera se mide la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI?	Proponer un sistema para medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.	El sistema propuesto permite medir la eficiencia del freno convencional en vehículos livianos de categoría M1 en el INTRAFIM-UNI.	Propuesta de un sistema de medición	- Tipo de investigación: Aplicada
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Dependientes	- Enfoque: Cuantitativo
<ol style="list-style-type: none"> ¿Cuáles son los parámetros clave que se identifican para la evaluación de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1? ¿Qué tipo de equipos mecánicos y de instrumentación se requieren para el sistema de medición de eficiencia? ¿Cuáles son los procesos necesarios para el ensamblaje de los componentes que forman parte del sistema de medición y su posterior aplicación en la evaluación de la eficiencia de los frenos convencional antes y después del mantenimiento preventivo? 	<ol style="list-style-type: none"> Identificar los parámetros clave que deben evaluarse para medir la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. Determinar el tipo de equipos mecánicos e instrumentos necesarios para el sistema de medición de eficiencia. Describir los procesos requeridos para el ensamblaje de los componentes del sistema de medición y su aplicación en la comparación del desempeño de los frenos convencional antes y después de un mantenimiento preventivo. 	<ol style="list-style-type: none"> La identificación de los parámetros clave permite una evaluación precisa de la eficiencia del sistema de freno convencional en vehículos livianos de categoría M1. La selección adecuada de equipos mecánicos e instrumentos de medición garantiza el correcto funcionamiento del sistema de medición de eficiencia de frenado. El ensamblaje correcto de los componentes mecánicos y de instrumentación asegura la operatividad del sistema para evaluar el comportamiento de los frenos convencionales antes y después de un mantenimiento preventivo. 	<p>Eficiencia del freno convencional en vehículos livianos.</p>	- Alcance: Correlacional
				- Diseño de investigación: Cuasiexperimental

ANEXO B: Esquema de distribución de instrumentos de medición



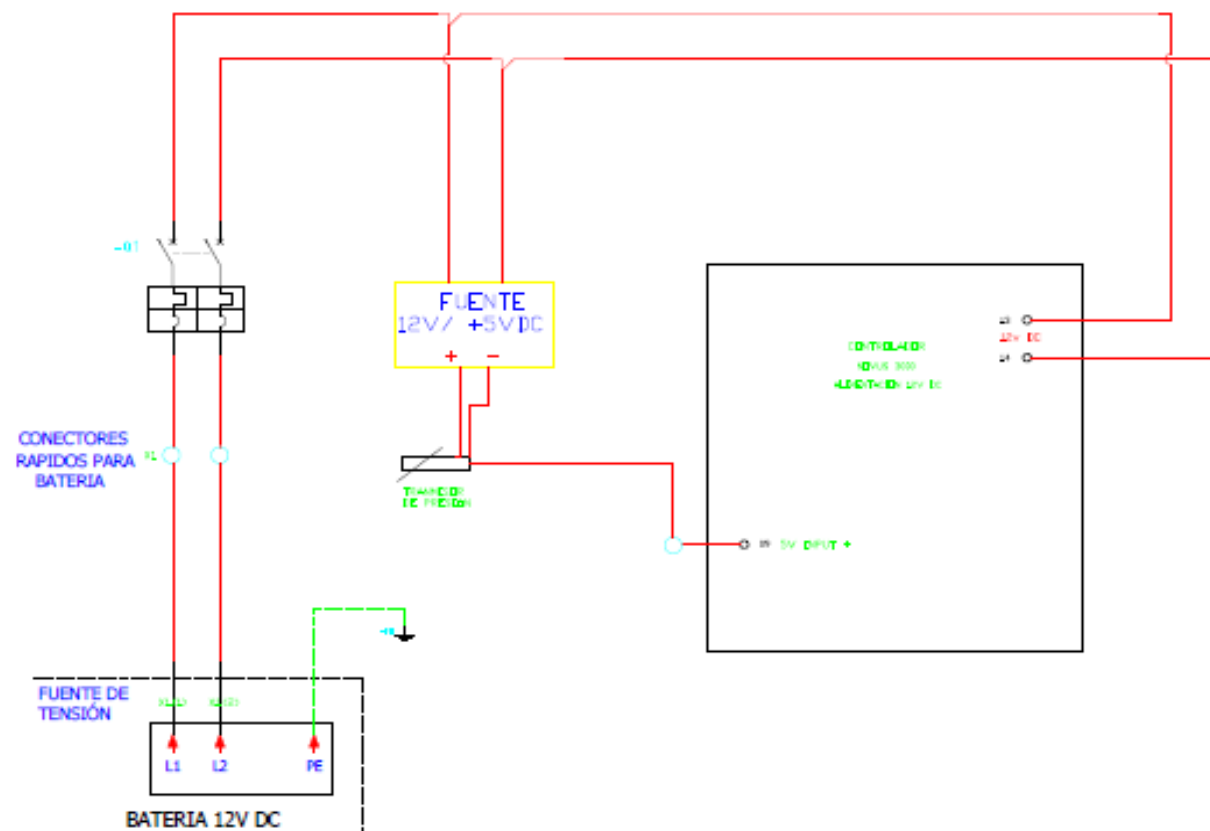
ANEXO C: Calculo de prueba de normalidad con programa Python

```
1  import pandas as pd
2  from scipy.stats import shapiro
3  import ace_tools_open as tools;
4
5  # Datos
6  data = {
7      "Ensayos_km": [10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80],
8      "Pre_Prueba": [29.5, 30.1, 31.1, 31.8, 32.4, 32.9, 33.8, 34.5, 34.8, 35.6],
9      "Post_Prueba": [52.4, 53.2, 53.7, 54.4, 54.9, 55.5, 56.2, 56.8, 57.3, 58.2]
10 }
11
12 df = pd.DataFrame(data)
13
14 # Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)
15 shapiro_pre = shapiro(df["Pre_Prueba"])
16 shapiro_post = shapiro(df["Post_Prueba"])
17
18 shapiro_results = {
19     "Variable": ["Pre_Prueba", "Post_Prueba"],
20     "Estadístico W": [shapiro_pre.statistic, shapiro_post.statistic],
21     "Valor-p": [shapiro_pre.pvalue, shapiro_post.pvalue]
22 }
23
24 shapiro_df = pd.DataFrame(shapiro_results)
25
26 tools.display_dataframe_to_user(name="Resultados de la Prueba de Normalidad", dataframe=shapiro_df)
27
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS

```
PS D:\Trabajos_Python> python .\test.py
Resultados de la Prueba de Normalidad
  Variable  Estadístico W  Valor-p
0  Pre_Prueba      0.966602  0.857677
1  Post_Prueba      0.979841  0.964313
```

ANEXO D: Diagrama de operación de la toma de datos de transductor de presión



		SCALE: A4	
		PROYECTO: LECTURA DE PRESIÓN H.	
1.2	N. BOTNLO	10/04/05	DATE
		Edt	10/04/05
		Chcc	
		SUBTÍTULO:	
		PÁGINA: 01	
		SHEET:	
No.	Revision	Fecha	By
		FILENAME	

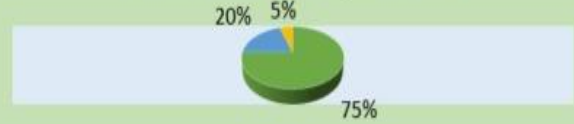
ANEXO E: Encuesta sobre el tema de tesis a un grupo de 20 personas (estudiantes y docentes de la UNI)

¿Conoce usted algún banco de pruebas que mida la eficiencia del sistema de frenos en vehículos livianos?



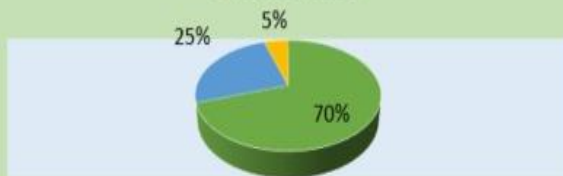
- Sí
- He escuchado hablar, pero no lo conozco en detalle
- No

¿Considera importante medir la eficiencia del sistema de frenos de forma técnica y controlada?



- Sí, es fundamental para la seguridad
- Depende del tipo de vehículo
- No lo considero necesario

¿Cree que en el INTRAFIM-UNI se debería implementar un banco de pruebas para evaluar sistemas de frenos convencionales?



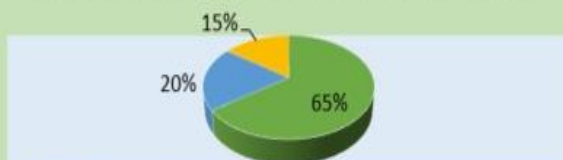
- Sí
- Tal vez
- No

¿Qué tan representativo le parece evaluar sistemas de freno convencionales (disco adelante y tambor atrás) en vehículos livianos?



- Muy representativo
- Poco representativo
- Nada representativo

¿Le parece útil que el banco de pruebas compare la eficiencia antes y después del mantenimiento preventivo?



- Sí, permite validar mejoras
- No aporta valor real
- No lo sé

¿Considera que este banco de pruebas podría mejorar las prácticas educativas en la UNI?



- Sí, sería una herramienta útil
- Depende del uso que se le dé
- No tendría mucho impacto