



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS MEDIANTE UN MODELO ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO EN
LA DISTANCIA DE FRENADO DE LOS DISPOSITIVOS DE ABSORCIÓN DE
IMPACTO INSTALADOS EN LOS ELEMENTOS ELÁSTICOS DE TIPO ESPIRAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: FRANCISCO ANDRÉS NÚÑEZ DÍAZ

LUIS ALEXANDER ROSERO POZO

TUTOR: JUAN PABLO TAMAYO BENEVIDES

Quito - Ecuador

2024

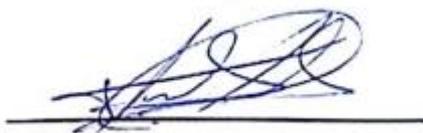
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros Francisco Andrés Núñez Díaz con documento de identificación N° 1727483297 y Luis Alexander Rosero Pozo con documento de identificación N° 1750978445 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 06 de Agosto del 2024

Atentamente,



Francisco Andrés Núñez Díaz

1727483297



Luis Alexander Rosero Pozo

1750978445

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros Francisco Andrés Núñez Díaz con documento de identificación N° 1727483297 y Luis Alexander Rosero Pozo con documento de identificación N° 1750978445, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis mediante un modelo estadístico del comportamiento en la distancia de frenado de los dispositivos de absorción de impacto instalados en los elementos elásticos de tipo espiral”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Automotrices en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 06 de Agosto del 2024

Atentamente,



Francisco Andrés Núñez Díaz

1727483297



Luis Alexander Rosero Pozo

1750978445

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Pablo Tamayo Benavides con documento de identificación N° 1714824156, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS MEDIANTE UN MODELO ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO EN LA DISTANCIA DE FRENADO DE LOS DISPOSITIVOS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO INSTALADOS EN LOS ELEMENTOS ELÁSTICOS DE TIPO ESPIRAL, realizado por Nosotros Francisco Andrés Núñez Díaz con documento de identificación N° 1727483297 y Luis Alexander Rosero Pozo con documento de identificación N° 1750978445, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de Agosto del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Tamayo Benavides, M.Sc.

1714824156

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis amados padres y amada hermana, los cuales han hecho lo imposible para darme la hermosa oportunidad para estudiar en una universidad prestigiosa, les agradezco por apoyarme siempre, tenerme paciencia todos los días y por llevarme por el camino del bien.

También dedico el proyecto a toda mi familia por todo su apoyo a lo largo de mi formación tanto personal como profesional, ya que sin su ayuda nada de esto fuera posible.

Finalmente dedico el presente proyecto a todos los docentes y laboratoristas de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana por compartir todos sus conocimientos durante el tiempo de mi formación profesional, tendiendo mucha paciencia y respeto al impartir sus clases.

Fráncico Andrés Núñez Díaz

Este artículo académico está dedicado a:

A mis padres Germán y Martha quienes han sido un pilar fundamental, por siempre apoyarme en cada uno de mis sueños, por nunca cortarme las alas a realizar lo que más me gustaba. Por el esfuerzo a diario que hacen por mí y porque yo cada día sea mejor. Gracias por estar siempre ahí cuando más lo he necesitado. Porque nunca me hace falta un consejo, un abrazo, un aliento y unas palabras sabias de su parte. Por enseñarme que lo que te propones con esfuerzo y la ayuda de Dios se cumple. No tengo forma de agradecer todo lo que hacen por mí. ¡Gracias siempre por ese apoyo incondicional!

A mi hermano Gabriel porque siempre como le dije es mi mejor amigo y nunca me faltó un consejo de su parte, siempre sus motivaciones. Su apoyo incondicional, que sé que no puede estar siempre a mi lado, pero sé que nunca me dejaría solo. De verdad gracias por siempre querer lo mejor para mí.

Finalmente, a toda mi familia y amigos que siempre me dieron unas palabras de aliento y mis dos abuelitas que nunca faltaron sus oraciones por bienestar.

Luis Alexander Rosero Pozo

AGRADECIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos a Dios por darme las fuerzas, paciencia y sabiduría para llegar al punto donde estoy, ya que sin su bendición nada de esto fuera posible.

Quiero agradecer a mis compañeros de la universidad ya que fueron parte de mi crecimiento personal y profesional a lo largo de mis carrera universitaria, también agradezco a mi compañero de tesis Luis Rosero por su apoyo incondicional tanto en la creación de nuestro artículo académico, como su apoyo a lo largo de estos últimos 4 años, agradezco a mis amigos Jeffrey Balseca y Lía Moyota por su ayuda al momento de realizar las pruebas para la tesis y por ser unos excelentes amigos y por siempre estar en los momentos más difíciles de mi vida.

También quiero expresar mis más grandes y sinceros agradecimientos al Ing. Juan Pablo Tamayo, por su ayuda incondicional a lo largo del desarrollo de la investigación y su apoyo a mi formación profesional.

De manera especial agradezco a NÖVINSTORE por proporcionarnos los absorbedores de impacto de suspensión para la realización de la tesis y a José Yépez por confiar en nuestros conocimientos y permitirnos realizar la tesis con sus productos.

Fráncico Andrés Núñez Díaz

Quiero brindar mi profundo agradecimiento a cada uno de los maestros y personal que conforman la Universidad Politécnica Salesiana, por enseñarme mucho más sobre este mundo de la Ingeniería Automotriz.

Agradezco a toda la facultad en especial al Ing. Juan Pablo Tamayo, por estar siempre pendiente de todo lo que se relacionó a nuestra investigación, que con su conocimiento hizo factible el desarrollo de este artículo.

De igual manera un profundo agradecimiento a la empresa Novinnvento por estar presente en esta investigación y ayudarnos con su auspicio. Su apoyo ha sido muy importante para poder lograr los objetivos de esta investigación.

A mi amigo Francisco Núñez que estuvo para mí en los buenos y malos momentos dentro de esta bella carrera, que me apoyo muchas veces cuando yo no entendía algo y se quedaba por explicarme. Gracias amigo.

Finalmente, al Ing. Ángel Paucar por estar siempre pendiente de las necesidades que uno pueda presentar durante la carrera y darles solución de la manera más rápida y factible.

Luis Alexander Rosero Pozo

STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE BRAKING DISTANCE USING AN IMPACT ABSORPTION DEVICE IN THE SUSPENSION

Francisco Andrés Núñez Díaz ¹, Luis Alexander rosero Pozo ²

Resumen

El estudio evaluó cómo los absorbedores de impacto de la suspensión Növin influyen en la distancia de frenado de vehículos según la norma ECE (Comisión Económica para Europa) 13-H de las Naciones Unidas. Se realizaron pruebas de frenado de pánico a 100 km/h para vehículos M1 y N1. Utilizando R Studio, se desarrolló un modelo de regresión que explicó el 99.98% de la variación en la posición de frenado basado en velocidad y frenado. Validaciones del modelo confirmaron su robustez, incluyendo pruebas de normalidad en los residuos del modelo de regresión ($p = 0.6426$) y homocedasticidad ($p = 0.6252$). Se verificó la no multicolinealidad entre variables con un análisis de factor de varianza ($VIF < 5$). Los absorbedores de impacto Növin redujeron la distancia de frenado en 1.73 metros a 100 km/h y 1.38 metros a 60 km/h comparado con suspensiones estándar, superando las expectativas iniciales en un 176% y 248% respectivamente. El modelo estadístico desarrollado es una herramienta efectiva para prever el efecto de velocidad y frenado en la distancia de frenado, destacando su impacto en la seguridad vial y la industria automotriz. Estos hallazgos subrayan la importancia de adherirse a estándares internacionales para garantizar la fiabilidad de los datos en las pruebas vehiculares.

Abstract

The study examined how Növin suspension impact absorbers influence vehicle braking distance according to the United Nations ECE

(Economic Commission for Europe) 13-H standard. Panic braking tests were conducted at 100 km/h for M1 and N1 vehicles. Using R Studio, a regression model was developed that explained 99.98% of braking distance variation based on speed and braking. Model validations confirmed its robustness, including tests for normality in regression residuals ($p = 0.6426$) and homoscedasticity ($p = 0.6252$). Multicollinearity among variables was assessed using variance inflation factor analysis ($VIF < 5$). Növin impact absorbers reduced braking distance by 1.73 meters at 100 km/h and 1.38 meters at 60 km/h compared to standard suspensions, exceeding initial expectations by 176% and 248%, respectively. The developed statistical model is an effective tool for predicting the effects of speed and braking on braking distance, highlighting its impact on road safety and the automotive industry. These findings underscore the importance of adhering to international standards to ensure data reliability in vehicle testing.

Palabras claves: Homocedasticidad, heterocedasticidad, multicolinealidad, modelo, datos atípicos, suspensión, velocidad, distancia, estadístico, normalidad, residuos, coeficientes.

Keywords: Homoscedasticity, heteroscedasticity, multicollinearity, model, outlier data, suspension, speed, distance, statistics, normality, residuals, coefficients.

¹ Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador

1. Introducción

En Ecuador el año 2023, ocurrieron 119 accidentes por falla del sistema de frenos el cual representa el 0.57% de los siniestros totales, por otro lado, en el mismo año existieron 3551 siniestros por exceso de velocidad, el cual representa el 16.91% [1-15].

Según la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE por sus siglas en inglés 2018), establece que la distancia de frenado es primordial para la homologación de un vehículo, ya que mientras mejor sea la distancia de frenado, se evitarían varios accidentes de tránsito, precautelando así la vida de las personas que se encuentran dentro del habitáculo y la de los peatones. [2-7].

Esta es la razón por la cual la UNECE (Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas) establece pruebas estandarizadas para la homologación de los vehículos categoría M1 las cuales son: ensayos de frenado en seco, de rendimiento de frenado y frenado de emergencia. Por ello, a lo largo de los años se han realizado varios estudios y análisis con el objetivo principal de advertir y mejorar el comportamiento del sistema de frenado y suspensión, de acuerdo con la norma ECE (Comisión Económica para Europa) 13-H hay dos pruebas a realizar: tipo 0, ensayo A y tipo 0, ensayo B; ambas para vehículos de categoría M1, con el objetivo de verificar la eficiencia de frenado de un vehículo convencional sin sistema ABS y sin la suspensión modificada, en el cual se observa que la distancia de frenado de este tipo de vehículos tiende a incrementar en función de las velocidades de prueba de 60 km/h, 80 km/h y 100 km/h [2]. Al colocar productos como los absorbentes de impactos en la suspensión Növin, se mejora el desempeño de la suspensión y se reduce la distancia de frenado. Los resultados de las pruebas muestran que un vehículo de liviano a 100 km/h frena en 50 metros, mientras que a 80 km/h frena a 41.6 metros y a 60 km/h frena a 29.8 metros lo que demuestra que el avance de la tecnología a lo largo de los años ha desarrollado tecnologías y

componentes que ayudan al desempeño del vehículo [4].

Por otro lado pero con la misma idea principal autores como Tamayo J. et al en el año 2015 [3], realizaron pruebas de distancias de frenado basándose en la Normativa Europea de Reglamentación 13-H enfocándose principalmente en qué tan eficiente es un sistema ABS en los frenos, para la cual, utilizaron diversos vehículos y realizaron pruebas de frenado de pánico a diferentes velocidades y con diferentes pesos, con la finalidad de observar el desempeño del sistema ABS (por sus siglas en inglés Sistema Antibloqueo de Frenos) en vehículos convencionales en Ecuador [4]. Dando como resultado en cuestionamientos de una camioneta Mazda BT-50 que a 50 km/h la distancia de frenado en asfalto es de 6.87 metros y en empedrado 10.28 metros, por otro lado a 70 km/h la distancia de frenado en asfalto es de 15.6 metros y en empedrado la distancia es de 24.22 metros, lo cual establece que las distancias de frenado va relacionada con varios factores como las condiciones de la pista, los neumáticos y las condiciones de velocidad y condiciones generales del vehículo, arrojando diferentes resultados, por lo cual, se observa que en cuestión de distancias de frenado que un vehículo es más eficiente al frenar en calzadas como asfalto, es decir, con coeficiente de adherencia mayor. Teniendo en cuenta este estudio, si se modifica una suspensión, es decir, al variar la distancia de los espirales de tipo elástico del vehículo, el cabeceo será menor, por lo cual la distancia de frenado se verá reducida [3].

El principal objetivo de todos estos autores es reducir las distancias de frenado de los vehículos, realizando diversas pruebas con la ayuda de normativas y sin ellas que se han implementado sistemas y dispositivos en los frenos. Evaluando todos estos métodos, en este artículo lo que se busca es probar la hipótesis de reducir la distancia de frenado de los vehículos convencionales de categoría M1 al modificar la rigidez de la suspensión con los dispositivos de absorción de impacto conocidos como Növin, los mismos que al mejorar la dinámica del vehículo, permiten que exista menos cabeceo hacia la parte

frontal y la distribución de frenado sea la más adecuada [3-4].

Estudios como Servofreno y ABS (por sus siglas en inglés Sistema Antibloqueo de Frenos) [4], hablan de como las tecnologías avanzadas como los sistemas de frenos antibloqueo, han mejorado la seguridad y reducido significativamente las distancias de frenado en los últimos años. Sin embargo, existe un interés creciente en explorar nuevas tecnologías que puedan mejorar aún más este aspecto.

La tecnología de fabricación de los productos de absorción de impacto para suspensión de vehículos conocidos como “Növin”, concede características al material como alta resistencia y flexibilidad, capaz de soportar temperaturas de -40° a $+90^{\circ}\text{C}$ [4]. Estos se colocan en los espirales de los vehículos, mejorando significativamente el desempeño de la suspensión [13]. Este dispositivo absorbe el impacto en baches y caminos en condiciones desfavorables, por lo que ayuda a que el vehículo sea más estable al momento de conducir a altas velocidades. Además, reduce la inclinación del vehículo en las curvas y principalmente en lo que se enfoca nuestro artículo reduce la distancia de frenado.

Los principales beneficios que brindan los dispositivos de absorción de impacto “Növin” se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Beneficios de Növin

Características	Beneficios
Absorción de impactos	Mejora hasta un 80% la absorción.
Eficiencia de frenado	Reduce la distancia de frenado evitando el cabeceo.
Estabilidad	Mejora la estabilidad en altas velocidad y en curvas.
Confort	Reduce significativamente las vibraciones en la cabina.
Vida útil	Duplica la vida útil del amortiguador evitando que fondee.
Altura	Aumenta hasta en 1.5 cm la altura de los vehículos.
Fácil instalación	Instalación fácil en 20 minutos, sin necesidad de desmontar piezas.

Fuente: Növinnvento, “NÖVIN,” Ficha Técnica. <https://www.novinnvento.com/novin.html> (Junio. 07.2024)

La incorporación de dispositivos de absorción de impacto influye en el sistema de frenado de un vehículo, reduciendo significativamente la distancia de frenado en diferentes condiciones de conducción. Esta disminución aumenta la seguridad de los ocupantes, del vehículo, de los peatones y otros usuarios de la carretera. Esto ha sido demostrado y sustentado con un diseño factorial 2^2 en conjunto con el reglamento europeo [4].

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Vehículo de pruebas

Para el desarrollo de esta investigación, se optó por utilizar un vehículo de tipo automóvil de categoría M1 como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2: Características del vehículo de prueba

Características	Valores
Cilindraje	1.6 (l)
Potencia	110 HP a 5800 rpm
Torque	155 Nm a 3900 rpm
Tipo de frenos delanteros	Discos ventilados
Sistema ABS (anti-block brake systems)	Instalado

Fuente: Növinnvento, “NÖVIN,” Ficha Técnica. <https://www.novinnvento.com/novin.html> (Junio. 07.2024)

2.1.2. Dispositivo de absorción de impacto

El dispositivo de absorción de impacto que se utilizó en el estudio se conoce como “Növin”, el mismo que se adquirió en Novinnvento. La razón de la elección de esta marca es la composición y las prestaciones del dispositivo, [13] descritas brevemente en la Tabla 1.

Növin cuenta con 9 medidas diferentes para su instalación, la cual, depende del diámetro y apertura del espiral. Las medidas son las que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Características y especificaciones por medida

Referencias	A+	A	C+	B	B+	C	D	E
Gap espiral (mm)	62	47	41	35	33	27	23	17
Peso (g)	793	609	519	465	346	320	199	198
Altura(mm)	95	79	73	68	66	57	51	40

Fuente: Növinnvento, “NÖVIN,” Ficha Técnica. <https://www.novinnvento.com/novin.html> (Junio. 07.2024)

Para elegir la medida del dispositivo de absorción de impacto “Növin”, se eleva el carro y se toma una primera medida con la regla especial de Novinnvento. Luego se baja el carro y se realiza una segunda medida para sacar un promedio entre ambas y determinar la medida adecuada. En el vehículo de prueba, las medidas en elevación fueron de A en los espirales delanteros y de B+ en los espirales posteriores, mientras que con el vehículo en el suelo fueron de C+ en la parte delantera y D en la parte posterior, resultando en una medida A para la parte delantera y C para la parte posterior [13]. En la Figura 1, se observa la regla utilizada para medir los espirales elásticos del vehículo y cómo se toman las medidas para elegir los “Növin”. Es un proceso crucial ya que una medida incorrecta puede dejar la suspensión muy rígida, causar fallas en los componentes de la suspensión y provocar un desgaste prematuro de los dispositivos de absorción de impacto [11].



Figura 1. Regla y ejemplo de medición

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Una vez que se selecciona la medida adecuada, se procede a su instalación. Para instalar los dispositivos conocidos como “Növin”, primero se debe desengrasar o lavar con agua y jabón los espirales para asegurar que no estén sucios [12]. La colocación de los Növin se realiza girándolos

sobre los espirales. Si al instalarlos, el dispositivo topa con sí mismo, se debe cortar en la primera marca recomendada por el fabricante. Se debe asegurar de no cortar ninguno de los agujeros, ya que hacerlo podría debilitar el dispositivo [13]. Una vez colocados, se deben fijar con dos abrazaderas de plástico; una en la parte superior del extremo izquierdo y la otra en la parte inferior del extremo derecho. Es crucial no instalar el Növin pegado a la base del amortiguador ni a la parte superior del espiral, ya que la fricción podría dañarlos. Por esta razón, el fabricante recomienda colocar el Növin en el centro muelle helicoidal como se muestra en la Figura 2. Finalmente, después de instalar los Növin, se debe bajar el vehículo y verificar que estén correctamente colocados [14].



Figura 2. Instalación de los Növin

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

2.1.3. Dispositivos de medición

Para la adquisición de datos se utilizó una aplicación conocida como “Physics Toolbox Suite”, la misma que se descarga desde la Play Store de Android como se ve en la Figura 3.

Esta aplicación permite adquirir datos de las Fuerzas G presentes al momento de realizar las pruebas. Gracias a esos datos, se puede tener medidas como la desaceleración, las fuerzas laterales y el tiempo de frenado. La aplicación cuenta con una velocidad de colección de datos de 199 Hz, lo que significa que recolecta 199 datos en cada segundo [14].



Figura 3. Aplicación para adquisición de datos.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Otra aplicación que se utilizó para adquirir datos es la llamada “Altimetro”. Esta aplicación permitió sacar las alturas a las cuales se encuentran la pista de prueba, para posteriormente sacar el ángulo de inclinación, según la norma de homologación del Reglamento de las Naciones Unidas sobre vehículos de ruedas [2].



Figura 4. Altura al inicio de la pista de prueba

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Como se muestra en la Figura 4 y 5 la aplicación permite tener información con una exactitud de 85%, ya que cuenta con una precisión de ± 15 metros. Al estar conectado a una red wifi y al GPS del teléfono, la aplicación se actualiza, toma los datos cada 3 minutos y sus valores de coordenadas se encuentran en latitud y longitud



[14].

Figura 5. Altura al final de la pista de prueba

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Por último, en la Figura 6 se muestra la implementación de equipos de medición y seguridad: flexómetro, triángulos de seguridad y una vara de medición para indicar la distancia a la cual se quedó el vehículo al frenar y poder medir la distancia de manera precisa.

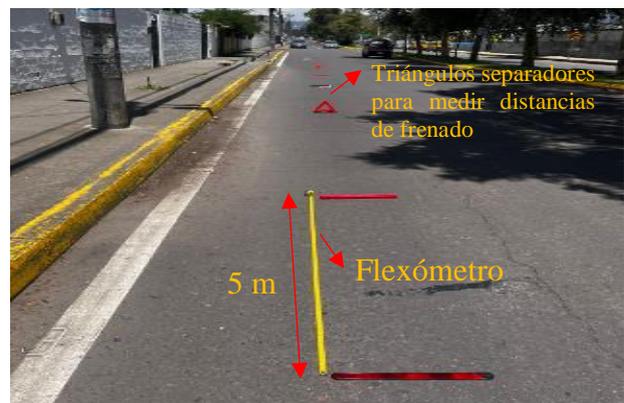


Figura 6. Objetos de medición y su respectiva distribución en la pista de prueba

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

2.2. Metodología

En la actualidad mejorar la seguridad activa y pasiva de los vehículos es primordial para la industria automotriz, razón por la cual se han implementado diferentes dispositivos [9], componentes electrónicos y sistemas de seguridad. Estos mejoran en gran porcentaje los sistemas de seguridad a comparación de los vehículos de antaño. Razón por la cual el siguiente estudio se centra en la instalación de un componente económico en el mercado, práctico, de fácil instalación y accesible para el público. Todo esto mencionado con el fin de mejorar la distancia de frenado y la dinámica del vehículo [9-10].

Los componentes de estudio se instalan en los espirales de la suspensión del vehículo [18]. Por ese motivo el estudio se enfoca en analizar la efectividad de los “Növin” en distancias de frenado. Se realizan pruebas de absorción de impacto en la suspensión con la marca comercial “Növin”, que vuelven a la suspensión más rígida. Además mejoran las oscilaciones y el balanceo, homologadas por el Reglamento de las Naciones Unidas sobre vehículos de ruedas [2]. Para el desarrollo de las pruebas homologadas se utilizaron los ensayos del Anexo 6 de la regulación N° 13-H Disposiciones uniformes relativas a la aprobación de los vehículos automóviles de pasajeros en lo relativo al frenado que se enfoca en la homologación de frenos de vehículos de categoría M1 y N1, que cuenten con ABS (por sus siglas en inglés Sistema Antibloqueo de Frenos), que excedan los 25 km/h y que no tengan modificaciones para personas con capacidades diferentes [2].

Los factores a determinarse durante los ensayos se resumen a continuación de acuerdo con el estudio de Reyes et. al [3]. Para calcular el valor de adherencia de la pista se utiliza la Ecuación 1:

$$\varepsilon = \frac{Z_{AL}}{k_M} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde,

ε = Adherencia de la pista de prueba,

Z_{AL} = coeficiente de frenado máximo con sistema antibloqueo operativo,

k_M = Coeficiente de adherencia entre la rueda y la vía.

Para calcular la tasa de frenado máxima Z_{AL} se debe medir el tiempo que se demora el vehículo en reducir la velocidad de 45 km/h a 15 km/h (T_m) según la Ecuación 2:

$$Z_{AL} = \frac{0,849}{t_m} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Por otro lado, el coeficiente de adherencia promedio k_M se calcula Con la Ecuación 3:

$$K_M = \frac{k_f * F_{f \text{ dyn}} + k_r * F_{r \text{ dyn}}}{P * g} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde,

K_r = coeficiente de adherencia del eje posterior.

K_f = coeficiente de adherencia del eje delantero.

$F_{i \text{ dyn}}$ = relación normal de cada eje con ABS (por sus siglas en inglés Sistema Antibloqueo de Frenos) operativo.

Para poder calcular los coeficientes de los ejes se debe tener en cuenta la Figura 7; un diagrama de cuerpo libre en la que se representan las fuerzas tanto en el eje anterior como en el eje posterior [3].

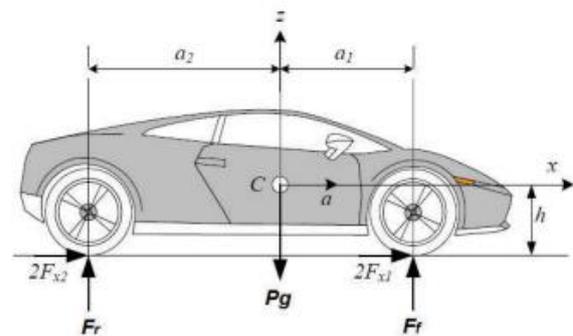


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre

Fuente: Reyes Guillermo Gorky and Tamayo Juan Pablo, “Análisis del desempeño de los frenos en vehículos que incorporen el sistema antibloqueo (ABS) en caminos irregulares.” Master Thesis, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2015.

Para poder sacar las fórmulas se debe considerar que, para calcular los coeficientes de adherencia, el eje a calcular debe estar momentáneamente frenado [3]. Considerando estos factores, las

ecuaciones 4 y 5 sirven para calcular la adherencia en el eje anterior y posterior.

$$K_f = \frac{Z_m * P * g - 0,015 * F_r}{F_f + \frac{h}{a_1 + a_2} * Z_m * P * g} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$K_r = \frac{Z_m * P * g - 0,015 * F_f}{F_r + \frac{h}{a_1 + a_2} * Z_m * P * g} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde, para los dos casos:

Z_M = Coeficiente de frenado,

P = Masa del vehículo en Kg,

G = Gravedad $9.8m/s^2$,

F_i = Reacción normal de un eje bajo condiciones estáticas,

a_i = Distancia centro de gravedad,

$(a_1 + a_2)$ = Distancia entre ejes,

h = Centro de gravedad,

$\frac{h}{a_1 + a_2} * Z_m * P * g$ = Trasferencia dinámica de peso entre ejes al momento de frenar.

La tasa de frenado promedio Z_M , también conocida, se calcula con la Ecuación 6:

$$Z_m = \frac{0,566}{t_m} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Por último, para calcular las fuerzas dinámicas se utiliza la Ecuación 7:

$$F_{i \text{ dyn}} = F_i + \frac{h}{a_1 + a_2} Z_{AL} * P * g \quad \text{Ecuación (7)}$$

En norma de homologación anexo 6, no se especifica en ningún enunciado cómo calcular la altura del centro de gravedad (h), por lo cual, para poder calcular este ítem, se debe realizarlo mediante el diagrama de cuerpo libre de la Figura 8. En esta se representa el pesaje del eje trasero del vehículo y el cálculo de las fuerzas de cada eje en condiciones estáticas [3].

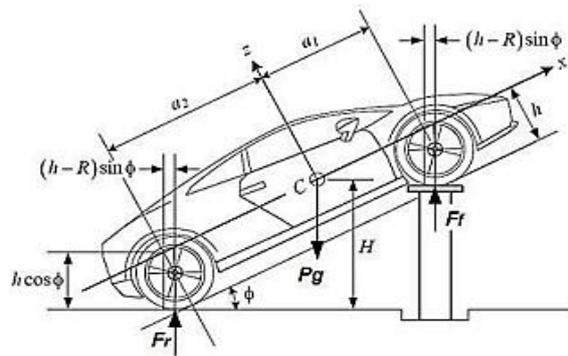


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre del pesaje del eje trasero.

Fuente: Fuente: Reyes Guillermo Gorky and Tamayo Juan Pablo, "Análisis del desempeño de los frenos en vehículos que incorporen el sistema antibloqueo (ABS) en caminos irregulares.," Master Thesis, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2015.

Según el diagrama se calcula la altura del centro de masa del vehículo con la Ecuación 8 que representa el valor de h :

$$h = R + \cot \phi * \left(\frac{F_f * l}{P * g} - a_2 \right) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde R es el radio dinámico del neumático del vehículo de prueba y el ángulo de inclinación dependerá directamente de la altura a la cual se elevó el vehículo al momento del pesaje, que en este caso es de 0.56 metros [3].

2.2.1. Procedimiento de la prueba según la norma ECE 13H

La eficacia prescrita para los sistemas de frenado estará basada en la distancia de frenado y en la desaceleración media estabilizada. La eficacia de un sistema de frenado se determinará midiendo la distancia de frenado en relación con la velocidad inicial del vehículo o midiendo durante el ensayo la desaceleración media estabilizada [2-3].

Para la realización de las pruebas, la norma establece el ensayo A Tipo 0: el vehículo debe tener el sistema de frenos óptimo, es decir, el desempeño del funcionamiento de frenado no puede estar por debajo del 80%. Además, establece que la desaceleración en pruebas de $100km/h$ debe ser mayor o igual a $6.43m/s^2$ y la distancia de frenado máxima se calcula con la Ecuación 9 [2-3]:

$$s \leq 0.1v + 0.0060v^2 [m] \quad \text{Ecuación (9)}$$

El número de repeticiones o pruebas válidas que establece la norma son 3. Las mismas que consideran que la distancia de frenado entre una prueba y otra no deben ser significativa. En caso de que la diferencia entre distancias de frenado sea significativa, se procede a tomar esa prueba como inválida y realizarla nuevamente hasta que los valores se asemejen [2-3]. Es por esto que la prueba consiste en colocar el vehículo en el medio de la pista, con una velocidad inicial de cero, luego se procede a incrementar la velocidad hasta llegar a la velocidad establecida 100km/h. A continuación, se coloca la caja de cambios en neutro y se pisa el freno con una fuerza aproximada de 6.5 a 50 daN [2-3].

2.2.2. Condiciones del vehículo de prueba

Para realizar las pruebas el vehículo debe cumplir con las condiciones de peso bruto del vehículo, es decir, el combustible debe estar al 100% de su capacidad y no debe bajar del 75% durante las pruebas. Por otro lado, para poder llegar al peso bruto vehicular se deben considerar las especificaciones del fabricante [2-3].

2.2.3. Condiciones del sistema de frenos

La condición del sistema de frenos y del sistema de suspensión debe ser óptimo, razón por la cual, antes de empezar a realizar las pruebas, se realizaron ABC de frenos y revisión general del sistema de suspensión y dirección, asegurándonos de que las pruebas no van a perjudicar a estos sistemas y que los ocupantes se encontrarán seguros durante las pruebas [19].

También, antes de iniciar cada corrida, se debe verificar que la temperatura de los discos de freno se encuentre entre los 65°C hasta los 100°C [2-3].

2.2.4. Condiciones del motor y seguridad del vehículo

Las condiciones del motor deben ser las óptimas, para lo cual se debe verificar que las bujías, las bobinas, los filtros, los lubricantes, los sistemas eléctricos y mecánicos se encuentren en condiciones de funcionamiento adecuado. Esto es posible con un mantenimiento y afinamiento completo del motor [2-3].

Durante las pruebas las ventanas y las puertas deben estar cerradas para evitar algún tipo de accidente tanto con las personas que se encuentran dentro del habitáculo, como las personas que se encuentran en el exterior del vehículo [2-3].

2.2.5. Condiciones ambientales

Para realizar las pruebas se debe tener en cuenta que la temperatura ambiental debe estar entre 0°C a 45°C [2-3].

Para realizar las pruebas también se debe tener en cuenta la velocidad del viento, la misma que se puede calcular con la Ecuación 10:

$$SSF = \frac{T}{2 \cdot h} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde,

SSF= Factor de estabilidad estático,

T= Ancho de la vía,

h= Altura centro de gravedad,

2.2.6. Condiciones de la vía de pruebas

El grado de inclinación máximo permitido es de 1% a lo largo de la vía, por lo cual, según las Figuras 4 y 5 se observa la altura al inicio de la pista de prueba y la altura al final de la pista de prueba en una longitud de 625.91 metros, con una diferencia de altura de 3 metros del inicio al final dando un ángulo de inclinación de 0.2735% de variación con respecto a la primera altura de la pista y a segunda altura de la pista. Según la Ecuación 11 [2-17]:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Altura}_2 - \text{Altura}_1}{\text{Longitud de la pista}} \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Con el ángulo de inclinación menor al 1% se determina que la pista cumple con uno de los requisitos principales que la norma establece para su utilización [3].

2.2.7. Diseño 2^k

Un diseño 2^k es un diseño factorial para experimentos, utilizado en estadística y otras disciplinas para evaluar el efecto que tienen los

factores que cuentan con dos niveles cada uno en una variable respuesta [6-8].

En el caso del presente estudio se realizaron 4 pruebas con distinta velocidad y con la suspensión modificada, garantizando así, que se realizaran todas las pruebas válidas con todas las combinaciones posibles para nuestro diseño 2². El uso de 4 réplicas en cada combinación del diseño mejora la precisión y la fiabilidad del análisis, proporcionando conclusiones más robustas sobre cómo los factores estudiados (suspensión y velocidad) afectan la distancia de frenado. Esto es crucial para asegurar que las decisiones basadas en los resultados del experimento sean válidas y reproducibles [6-8].

Teniendo en cuenta que los factores para el modelo estadístico son:

Suspensión: con dos niveles, “con Növin (CN)” y “sin Növin(SN)”

Velocidad: con dos niveles, “100km/h (V1)” y a “60km/h(V2)”

Las combinaciones posibles que se deben realizar son las que se indican a continuación:

SNV1: sin Növin y a una velocidad de 100km/h.

SNV2: sin Növin y a una velocidad de 60km/h.

CNV1: con Növin y a una velocidad de 100km/h.

CNV2: con Növin y a una velocidad de 60km/h.

La implementación del diseño 2² permite evaluar como cada factor (velocidad y suspensión) afectan individualmente y en conjunto a la variable distancia, es decir, que sucede con la distancia de frenado si se varía la velocidad y se varía la suspensión. También permite tener una idea de la interacción entre los factores, que sucede con la suspensión si se afecta la velocidad y viceversa [6-8].

En la Ecuación 12 se observa de manera general un modelo 2².

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde,

Y_{ijk} = Variable de respuesta.

μ = Media general.

β_j = Efecto del nivel j del factor β .

α_i = Efecto del nivel i del factor α .

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre niveles i y j.

ϵ_{ijk} = Error aleatorio.

2.3. Tratamiento de datos: diseño 2^k

Para la validación del modelo de regresión se usarán las pruebas estáticas que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Pruebas de validación del modelo.

Prueba	Estadístico
Normalidad	Shapiro Wilk
Homocedasticidad	Goldfeld - Quandt
No multicolinealidad	Factor de inflación de la varianza

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

2.3.1. Condiciones de neumáticos

Para efectuar las pruebas de frenado, los neumáticos deberán contar con un buen estado del labrado (mayor a 1.6 mm) y presión de inflado de acuerdo con la recomendación del fabricante del vehículo y del neumático [2-3].

3. Resultados y Discusión

3.1. Condiciones reales de prueba del vehículo

En la Tabla 5 se observa las condiciones en las cuales se debe encontrar el vehículo donde se realizarán las pruebas.

Tabla 5: Condiciones del vehículo de prueba

Condiciones del vehículo de prueba	Valores
Velocidad de prueba	100 km/h y 60 km/h

Personas en el vehículo de prueba	5 ocupantes
Peso añadido al vehículo de prueba	450 kg
Temperatura en los discos de freno	70°C a 75 °C
Presión de inflado de los neumáticos	33 psi

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

La velocidad de prueba para homologar los frenos es de 100km/h, en el estudio se utilizó otra velocidad además de la de homologación, la cual es de 60km/h con el objetivo de que el modelo estadístico sea más contundente y que los resultados sean más precisos [2-3].

Para la realización de las pruebas, la regulación ECE 13-H establece que el vehículo debe estar a su 100% de capacidad de carga, por ello se realizaron las pruebas con 5 ocupantes dentro que sumaban un total de 450 kg como se ve en la Tabla 4 [2-3].

Por último, para que los datos sean los más precisos y correctos, se debe controlar la temperatura de los discos de freno y la presión de inflado de los neumáticos, para ello se estandarizó que la temperatura de los discos de freno debe estar entre los 70°C a 75 °C y la presión de inflado debe ser de 33 psi [2-3].

Tabla 6: Condiciones ambientales para realizar las pruebas

Factores ambientales	Valores
Temperatura ambiental	19 °C a 20 °C
SFF (factor de estabilidad estático)	9,9537

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

La Tabla 6 indica las condiciones ambientales como la temperatura ambiental del día, la cual, debe estar entre los 0°C a 45°C para que las pruebas sean válidas.

Finalmente, el factor de estabilidad estático (SFF) es un factor que permite determinar la velocidad del viento al momento de realizar la prueba.

3.1.1. Cambio de llantas para la prueba de frenado

Para realizar las pruebas se utilizaron los neumáticos recomendados por el fabricante, por lo cual se colocaron los neumáticos de R15 para el vehículo de prueba. De esta manera los resultados de las pruebas serían los más reales posibles [2-3].

En la Figura 9 se puede observar el cambio de neumático de R18, al neumático recomendado R15.



Figura 9. Cambio de neumáticos de R17 a R15

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

3.1.2. Pesaje del vehículo

Para poder encontrar la ubicación del centro de gravedad del vehículo y saber dónde ubicar el acelerómetro, se debe pesar el vehículo con las balanzas gravimétricas obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 7 [2-3].

Tabla 7: Pesos detallados del vehículo

Ítem	Peso (kg)
Delantero derecho	330
Delantero izquierdo	335
Posterior derecho	224
Posterior Izquierdo	221
Peso del vehículo	1110
Peso bruto del vehículo	1620
Capacidad de carga	450 a 500 kg

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

Para las capacidades de los líquidos del vehículo se consideran los datos de la Tabla 8.

Tabla 8: Capacidades de los líquidos del vehículo

Ítem	Cantidad
Tanque de combustible	45l – 11.9 gal

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

3.2. Cálculo de fuerzas y coeficientes de adherencia con base la norma 13-H

Para calcular los coeficientes de adherencia, es fundamental determinar la altura del centro de gravedad del vehículo de prueba. Esto se realiza considerando el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 8. Para realizar el cálculo se debe ocupar las fórmulas indicadas en el apartado 2.2, las mismas que cumplen la función de explicar de mejor manera el comportamiento de la pista de prueba en el vehículo. En la Tabla 9 se observa los coeficientes de adherencia de la pista de prueba y todos los valores necesarios para su cálculo.

Tabla 9: Coeficientes de adherencia de la calzada

Altura centro de gravedad	0.3121 m
Fuerza dinámica delantera ($F_{f\ dyn}$)	6423.1563 [N]
Fuerza dinámica posterior ($F_{r\ dyn}$)	4323.3450 [N]
Coefficiente de adherencia de la calzada (ϵ)	0.775719

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

3.2.1. Selección de la pista de prueba

Ecuador al ser un país con 4 regiones, cuenta con varias elevaciones, montañas, cerros, valles, etc., por lo cual es complicado encontrar una ruta extensa sin inclinaciones mayores 1° , por ello se seleccionó una carretera ubicada en el Valle de los

Chillos, más concretamente ubicada en Conocoto a la altura de la Avenida Jaime Roldós Aguilera que se encuentra a 2530 msnm con una extensión de 625.91 metros y un hacho de vía de 6.45 metros, las características de la pista se encurtan en la Tabla 10, donde se especifica detalladamente las condiciones de la pista y sus características fundamentales.

Tabla 10: Características de la pista de prueba

Distancia de la vía de prueba	625.91 m
Ancho de la vía	6.45 m
Pendiente longitudinal vía	0.2735%
Pendiente transversal vía	0%

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

En la Figura 10 se observa la longitud de la pista de prueba.



Figura 10. Longitud de la pista de prueba

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

Mientras que la Figura 11 se observa la zona en la pista de prueba donde se frenará el vehículo.



Figura 11. Pista de prueba

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

3.3. Distancias de frenado y curvas de desaceleración

Una vez que se realizaron las pruebas válidas en la vía, se procede a realizar una tabulación de los datos obtenidos, donde debe constar, que tipo de suspensión se utilizó en la prueba, es decir, si se utilizó los Növins o no, a qué velocidad se realizaron las pruebas y la distancia de frenado de cada prueba como se puede ver en la Tabla 11.

Tabla 11: Tabulación de los datos obtenidos

Velocidades (km/h)	Distancia (m)	
	Sin Növin	Con Növin
60	9.66	8.045
	9.68	7.9
	9.24	8.2
	9.23	8.14
100	32.04	30.4
	32.14	30.37
	32.1	30.42
	32.17	30.3

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

Para evaluar y contrastar que las distancias obtenidas son válidas se debe analizar las desaceleraciones de las pruebas en la pista, para lo cual se realizó graficas de desaceleración con los datos obtenidos de la aplicación Physics Toolbox Suite que se muestra en la Figura 3.

En la Figura 12 se muestra la desaceleración promedio de las pruebas realizadas a los 100 km/h y en la Figura 13 se observa la gráfica de desaceleración de las pruebas que se realizaron a los 60km/h.

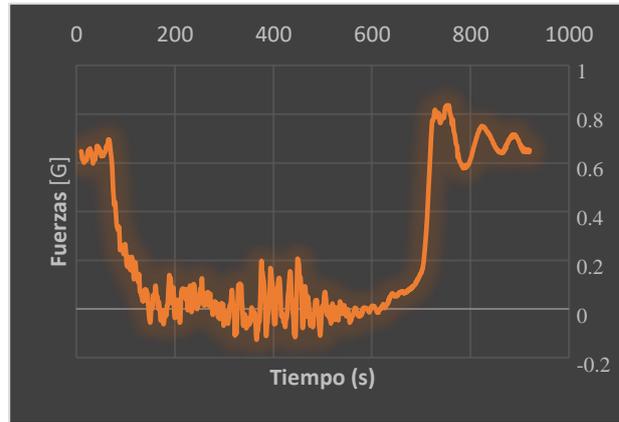


Figura 12. Grafica de desaceleración a 100km/h.
Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

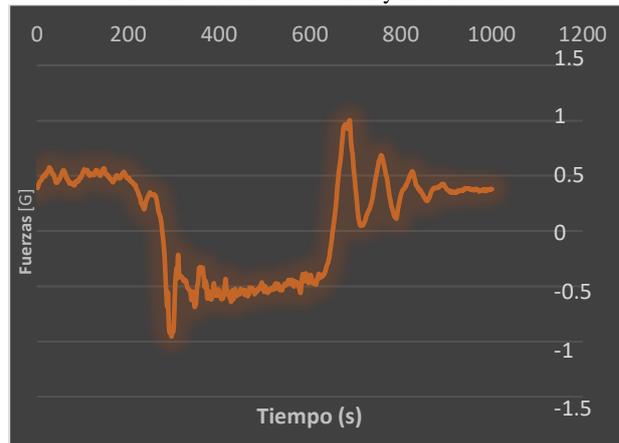


Figura 13. Gráfica de desaceleración a 60km/h.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

Donde en la Tabla 12 se observan los valores de las desaceleraciones promedio obtenidas para la velocidad de 100km/h y 60km/h.

Por ende, con estos valores se puede garantizar que las pruebas son válidas ya que el reglamento de homologación 13-H establece que la desaceleración debe ser mayor o igual a $6.43m/s^2$ para ser válida [2-3].

Tabla 12: Desaceleraciones promedio

Velocidad	Desaceleración promedio con Növin	Desaceleración promedio sin Növin
100km/h	9.476 m/s^2	9.025 m/s^2
60km/h	6.968 m/s^2	6.716 m/s^2

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

3.3.1. Análisis graficas de distancia de frenado.

En la Figura 14 se observa que a la velocidad de prueba de 60km/h, al no utilizar los productos de absorción de impacto de suspensión “Növin”, se tiene una distancia de frenado promedio de 9.4525 metros y, al colocar estos se consigue una distancia de frenado promedio de 8.0712 metros, esto representa una diferencia de 1.3813 metros a favor del Növin.

Por otro lado, en la Figura 15 se observa que a una velocidad de pruebas de 100 km/h, velocidad de que establece el reglamento ECE 13-H para homologar frenos, al no instalar los dispositivos Növin, la distancia de frenado promedio es de 32.1125 metros y al instalarlos se tiene una distancia de frenado promedio de 30372.5 metros, lo cual representa una diferencia de 1.7398 metros.

Se debe tener en cuenta que las pruebas ya sean con Növin y sin Növin, se las realizaron bajos las mismas condiciones, con el mismo peso de carga, con los frenos en condiciones óptimas, con el mismo tipo de neumáticos, bajo las mismas condiciones ambientales y con los frenos a una temperatura entre 70°C y 75°C [2-3].

Se observa que al implementar los dispositivos de absorción de impacto en los espirales de la suspensión del vehículo de prueba, la distancia de frenado se reduce significativamente. Al comparar con la hipótesis de la investigación, que predecía una disminución de la distancia de frenado en 50 cm, los resultados de las pruebas muestran una reducción que llega a triplicar esa cifra.

En la Figura 14 se observa las 8 pruebas validas que se realizaron a los 60km/h, comparando la distancia de frenado entre la primera prueba válida sin Növin y la primera prueba válida con Növin.



Figura 14. Comparación de la distancia de frenado a los 60km/h con Növin y sin Növin.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

En la Figura 15 se observa las 8 pruebas validas que se realizaron a 100km/h, comparando las distancias de frenado entre las primeras pruebas valida con y sin el uso del absolvedor de impacto Növin.



Figura 15. Comparación de la distancia de frenado a los 100km/h con Növin y sin Növin.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

3.4. Generación del modelo en R y análisis estadístico

De acuerdo con el diseño de experimentos 2², se consideró dos niveles de pruebas: el primero sistema de suspensión estándar y, el segundo, sistema de suspensión con Növin. Las variables para considerar son la velocidad de prueba que por el diseño son de 60 km/h y 100 km/h.

Para generar el código se implementó el software conocido como R Studio, el cual permite realizar análisis estadístico y realizar gráficas para explicar el comportamiento de los datos, en el caso de este artículo se requiere generar un modelo estadístico de regresión que prediga la distancia de frenado del vehículo, el mismo que sirve para evaluar el efecto de dos factores que en este caso son la velocidad y la suspensión con Növin y sin Növin, y su interacción en una variable respuesta, conocida como distancia [6-8].

Para lo cual se desarrolló un modelo estadístico que se observa en la siguiente fórmula, el mismo que se puede usar para prever resultados bajo diferentes condiciones experimentales [6-8].

$$\text{modelo} = \ln(\text{distancia} \sim (f_{\text{suspension}} + f_{\text{velocidad}} + f_{\text{suspension}} * f_{\text{velocidad}}))$$

Una vez que se implementó el diseño 2² en los datos, el software arrojó los valores que se muestra en la Tabla 13, donde se observa el resumen del análisis del modelo, el mismo que sirve para tener resumen detallado del modelo estadístico ajustado, es decir, proporciona información importante sobre el ajuste del modelo, coeficientes estimados, errores estándares, Valor-T y Valor-P, también se observa los valores obtenidos a partir del código Resumen (modelo) [6-8].

Tabla 13: Resultados Summary modelo

Resultados				
Min	1Q	Mediano	3Q	Max
-0.2225	-0.0725	0.0125	0.06031	0.2275
Coeficientes				
	Estimado	Std. Error	T valor	Pr(> t)
(interceptado)	9.4525	0.0733	128.79	2-e 16 ***
F_suspension1	-1.3812	0.1037	-13.308	1.51 e-08 ***
F_velocidad1	22.66	0.1037	218.323	2e-16 ***

F_suspension1 : f_velocidad1	-0.3587	0.1467	-2.444	0.0309
Error estándar residual:	0.1468 en 12 grados de libertad			
R cuadrado múltiple: 0.9999	R cuadrado ajustado: 0.9998			
Estadístico F: 3.143e+04 en 3 y 12 DF	p-valor: 2.2e-16			

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

El primer punto a analizar de la Tabla 13 son los residuos del modelo, los cuales permiten verificar la calidad del ajuste del modelo, el valor de mayor relevancia es la media ya que al tener un valor cercano al cero indica que el modelo no tiene sesgos sistemáticos en la sobreestimación o subestimación de la variable distancia.

El coeficiente “Estimado” representa la magnitud y dirección del efecto de cada factor sobre la variable distancia, valores negativos como f_{suspension1}, representa que un aumento en f_{suspension1}, es decir al implementar el dispositivo conocido como “Növin”, la variable distancia disminuye. Los valores positivos como la f_{velocidad1} indican que, al aumentar dicho factor, la variable distancia aumenta [6-8].

El coeficiente “Std. Error” denota los errores estándares, es decir, mientras el valor estándar se acerque más al cero, la estimación es más precisa. En el caso del estudio los valores de error estándar son se aproximan al cero, por ende, la estimación es precisa.

El siguiente coeficiente para evaluar es el “t valor”, en el cual se observar valores positivos y negativos altos, permitiendo saber cuál de los factores involucrados en el modelo tienen mayor relevancia en el modelo, por lo que el factor velocidad es más importante en la distancia de frenado [6-8].

El siguiente coeficiente es el “Pr (>|t|)”, que representa la significancia estadística de los factores en la variable distancia, si los valores P<0.05 significa que los factores tienen un efecto significativo en la variable respuesta, en la Tabla 13 se observa que los valores suspensión y distancia influyen de manera muy significativa en la distancia [6-8].

También es importante observar el apartado de “Error estándar residual”, este valor indica la precisión de la predicción del modelo, un RSE (error estándar residual) de valor más bajo, sugiere que el modelo tiene un mejor ajuste y que los valores tiene menos dispersión de residuos, en el caso del estudio el valor de RSE (error estándar residual) es de 0.1468, lo cual indica una menor dispersión de los residuos, indicando que el modelo es válido para nuestros datos [6-8].

R cuadrado múltiple y R cuadrado ajustado, ayudan para verificar que tan bien se ajusta el modelo a los datos obtenidos, teniendo un valor de R^2 de 0.9999, significa que 99.99% de la variabilidad de la distancia es explicada por el modelo, por otro lado para un R^2 ajustado se tiene un valor de 0.9998 indica que los factores velocidad y suspensión con Növin y sin Növin predicen en un 99.98% la variable distancia, es decir, con los datos obtenidos se puede predecir en un 99.98% la distancia de frenado de los vehículos [6-8].

Un F-estadístico alto indica que los factores de nuestro modelo son de relevancia a nuestra variable. En el caso del estudio, se tiene un valor de 3.143×10^4 indicando que nuestro modelo es muy significativo para nuestros datos y para predecir la distancia de frenado, por otro lado tenemos el apartado p-valor en el cual se busca tener valores menores a 0,05 para verificar que al menos uno de los factores es de influencia en nuestra variable respuesta, en el estudio se tiene un valor todos los factores son estadísticamente relevantes dado que su p-valor son menores al valor crítico [6-8], con todos los datos obtenidos, se observa que el modelo estadístico escogido para los datos, es válido, es decir, predice de manera muy eficiente la distancia de frenado.

Por último, está el apartado de F-estadístico, siendo un poco similar al R^2 y el R^2 ajustado, da una idea de si el modelo estadístico en conjunto es significativo o no, es decir, indica si al menos uno de los factores tiene relevancia con la variable respuesta [6-8].

Con todos estos datos, se define el modelo estadístico con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Distancia} = & -1.38125 * f_{\text{suspension1}} \\ & + 22.66 * f_{\text{velocidad1}} - 0.35875 \\ & * f_{\text{suspension1}} * f_{\text{velocidad1}} \end{aligned}$$

Después de obtener los resultados se empleó validaciones de los supuestos de los modelos de regresión para evaluar la solidez del modelo.

La primera prueba que se realizó es conocida como Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, conocida como Shapiro Test. Esta prueba evalúa si el conjunto de datos sigue una distribución normal. La normalidad de los datos es crucial porque muchas técnicas estadísticas, incluyendo la regresión lineal, asumen que los datos son normalmente distribuidos [6-8].

En la Tabla 14 se observa los resultados de la prueba de Shapiro, donde se tiene una respuesta w, la que representa y evalúa la normalidad de los datos, mientras más cercano sea este valor a 1 se sugiere que los datos son aproximadamente normales, en el estudio el valor de w es de 0.95894, siendo un valor cercano al 1, sugiriendo que los datos obtenidos no se desvían de la normalidad [6-8].

En la prueba de normalidad también se obtiene la respuesta p-valor, este valor sirve para aprobar o desestimar la hipótesis nula, la que menciona que si $P > 0.05$ los datos son normalmente distribuidos, para el presente estudio el p-valor es de 0.6426, sugiriendo que no existe suficiente evidencia para concluir que los datos son normalmente distribuidos [6-8].

Tabla 14: Resultados del test de Shapiro

Test de normalidad de Shapiro – Wilk	
Datos: resid(modelo)	
W= 0.95894	Valor-p = 0.6426
Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero	

Para verificar que los resultados de la prueba de normalidad Shapiro test son válidos se realizó la gráfica Q-Q residuos que se observa en la Figura 16, la cual sirve para verificar la distribución normal de los residuos [6-8].

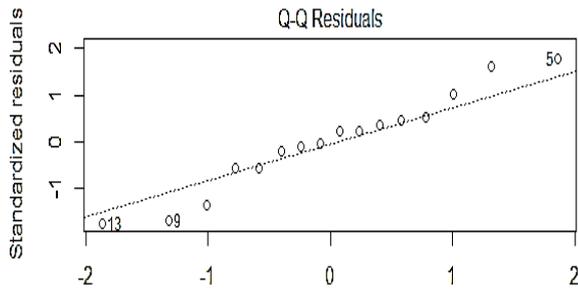


Figura 16. Grafica de distribución de residuos

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

La dispersión de los datos, a partir del test de Shapiro que se realizó anteriormente donde se obtuvo un p-valor de 0.6426 que al interpretarlo con la Tabla 14 se puede ver que existe normalidad a pesar de tener 4 puntos que no se encuentren tan alineados al centro de la recta, para poder mejorar la gráfica de Q-Q residuos, se necesitaría adquirir más datos, es decir, se debe realizar más pruebas válidas para obtener más datos para nuestro modelo, en el artículo no se realizó lo antes mencionado, por el motivo de que se contrastaron lo mencionado en el Norma de homologación ECE (Comisión Económica para Europa), 13-H con el R studio, se establece que solo se necesitan 3 pruebas válidas por cada velocidad para homologar los frenos. A pesar de tener los 4 datos que no se encuentran tan alineados a los demás valores, estos no afectan de manera considerable al estudio y al modelo.

La siguiente prueba que se realizó fue la de homocedasticidad, se aplicó la prueba de Goldfeld-Quandt, conocida como gptest, para verificar la homocedasticidad. La homocedasticidad implica que los residuos del modelo tienen una varianza constante a lo largo de los valores predichos. Es fundamental confirmar este supuesto porque la heterocedasticidad (varianza no constante) puede invalidar los resultados de las pruebas estadísticas y afectar la precisión de los intervalos de confianza y las predicciones.

En la Figura 15 se observan los datos obtenidos en la gptest donde se obtiene varios valores significativos para homocedasticidad de los datos [6-8].

Tabla 15: Resultados del gptest.

Test de Goldfeld – Quandt			
Datos: Modelo			
GQ= 0.71152	Df1 = 4	Df2= 4	Valor-p= 0.6252
Hipótesis alternativa: la varianza aumenta del segmento 1 al 2			

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero.

GQ representa la varianza de los residuos de los dos segmentos de los datos, un valor mayor a 1 sugiere que existe heterocedasticidad en los datos, para el estudio se tiene un valor para GQ de 0.71152, este valor sugiere que la varianza en los residuos del segmento dos es 0.71152 veces mayor que la varianza en el segmento uno, indicando que existe una disminución en la varianza, pero no significativa [6-8].

Al tener un df1 y un df2 igual a 4 significa que cada segmento tiene 4 grados de libertad, indicando que se usaron suficientes datos para el cálculo de la variable distancia.

Por otro parte, el p-valor sirve para verificar si la hipótesis nula se acepta o se rechaza, si el valor de $p > 0.05$, la hipótesis nula es aceptada, para el p-valor del estudio el valor es de 0.6252 siendo muy superior a 0.05, por lo tanto la hipótesis nula es aceptada, por ende nuestro se afirma que no existe suficiente evidencia para confirmar la presencia de heterocedasticidad en nuestros datos y que la varianza de los residuos si es constante [6-8].

Para la verificación de la prueba de homocedasticidad se realizó la gráfica como se muestra en la Figura 17, la cual representa una gráfica de Boxplot, donde se observa si existe la presencia de datos atípicos relevantes que afecten al modelo, en este caso se visualiza que no existen datos atípicos que afecten el modelo, también se observa la línea de la media que al comparar con los valores de GQ de 0.71152, se sugiere que la varianza en los residuos del segmento dos es 0.71152 veces mayor que la varianza en el segmento uno. Lo cual no es significativo [6-8].

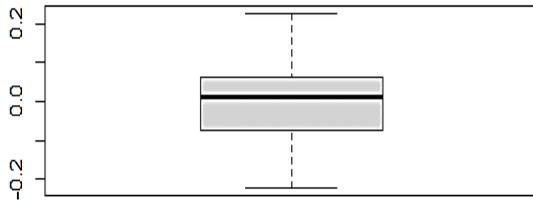


Figura 17. Grafica Boxplot del modelo.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Finalmente, se realizó la prueba del Factor de Inflación de la Varianza (VIF), conocida como vif test, para detectar la presencia de multicolinealidad, como se muestra en la Tabla 16 [6-8]. La multicolinealidad ocurre cuando dos o más predictores en el modelo están altamente correlacionados entre sí. Esto puede causar inestabilidad en las estimaciones de los coeficientes de regresión, haciendo que sean difíciles de interpretar y menos fiables. El VIF ayuda a identificar estos problemas, permitiendo tomar medidas correctivas, como la eliminación de predictores redundantes o la aplicación de técnicas de regularización [6-8].

Tabla 16: Resultados de la prueba VIF

>Vif (modelo)		
$F_{\text{suspensión}} = 2$	$F_{\text{velocidad}} = 2$	$F_{\text{suspensión} : \text{velocidad}} = 3$

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

Mientras que el valor de VIF se más cercano al 1, se indicaría que no existe colinealidad entre nuestros factores, en el caso del estudio los valores de VIF para la velocidad y la suspensión son de 2 y el VIF para la interacción de la velocidad y la suspensión es de 3 lo que demuestra que existe una colinealidad baja, lo que no es de relevancia para el estudio, lo que da a saber que los datos, que los coeficientes, los factores y las variables están correctos, y que tienen una buena precisión [6-8].

Finalmente, para darle mayor valor a $Pr(>|t|)$ se realizaron las gráficas a continuación. En la Figura 18 se analiza la relevancia que tiene las diferentes velocidades y la suspensión tanto con Növin y sin Növin con la distancia de frenado. En el primer caso se tiene la relación entre la $f_{\text{suspensión}}$ y la distancia, donde en el eje x se observa los valores de -1 y 1, donde -1 representa

a la suspensión sin Növin y donde 1 representa a la suspensión con Növin, donde se visualiza que al implementar los dispositivos de absorción de impacto la distancia de frenado disminuye en aproximadamente 1.38 metros para la velocidad de 60km/h y de 1.73 metros a los 100km/h, indicando que la distancia de frenado con Növin es más eficiente y seguro que la suspensión sin Növin [6-8]. En el segundo caso se tiene la relación entre las velocidades y la distancia donde en el eje x tenemos los valores de -1 y 1, sabiendo que -1 representa la velocidad de 60km/h y 1 representa la velocidad de 100km/h. En el eje Y tenemos las distancias de frenado en metros y se visualiza que a 60km/h la distancia de frenado es mucho menor que a 100km/h con una diferencia de 22.3013 metros, observando que, a mayor velocidad, la distancia de frenado también va a ser mayor.

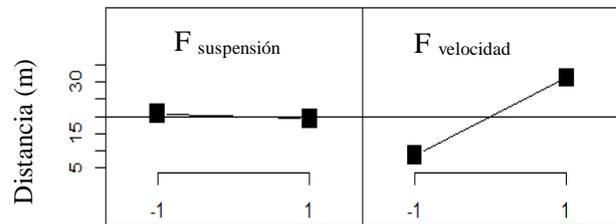


Figura 18. Grafica de los efectos principales para la distancia.

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

En la Figura 19 se observa dos partes, una relacionada con la suspensión y la otra con la velocidad, en la parte de la suspensión tenemos los índices -1 que representa la suspensión sin Növin y el índice 1, el cual representa la suspensión con Növin, en el lado derecho de la gráfica se observa la línea de los datos, la línea negra representa la suspensión con Növin y la línea roja entre cruzada cuando no se implementa los Növin, donde se puede decir que al variar las velocidades de 100km/h a 60km/h la suspensión con Növin sigue siendo más eficiente ya que se encuentra por debajo de la línea roja, es decir, la distancia de frenado es menor [6-8]. En la segunda parte de la gráfica se evaluará el factor de la velocidad, donde en el eje Y el -1 representado por una línea roja es la velocidad de 60km/h y el 1 representado por la línea negra es una velocidad de 100km/h, en el eje X -1 representa suspensión sin Növin y 1 suspensión con Növin, donde se verifica que a

diferentes velocidades la distancia de frenado va a ser menor cuando se implemente los Növin, recalcando que la implementación de los Növin mejora la distancia de frenado de un vehículo tanto a 60km/h como a 100km/h [6-8].

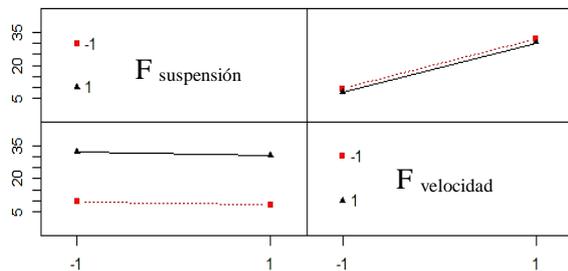


Figura 19. Matriz gráfica de interacción para distancia
Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

En la Figura 19 se observa que no existen interacciones entre las variables velocidad y suspensión, lo que significa que no existe relación entre los dos factores, es decir, el factor velocidad no se ve afectada con los cambios en el factor suspensión o viceversa.

Pero los dos factores si se relacionan directamente con la variable distancia, es decir, si se afecta algo en la suspensión o la velocidad, eso afecta directamente a la distancia de frenado.

3.5. Validación del estudio

Para la validación del estudio se realizó otras pruebas con el dispositivo de absorción de impacto instalados y sin ellos.

Se las realizó bajo los mismos parámetros establecidos pero con una velocidad de 80km/h para verificar que los dispositivos de absorción de impacto sirven bajo diferentes circunstancias de manejo y velocidad.

Tabla 17: Resultados pruebas a 80km/h

	Distancia	
	Sin dispositivo de absorción de impacto (m)	Con dispositivo de absorción de impacto (m)
80 km/h	13.46	11.98
	13.04	11.88
	13.54	11.79
	13.44	12.04

Fuente: Francisco Núñez y Luis Rosero

En la Tabla 17 se observa los resultados de las distancias de frenado bajo las nuevas condiciones de velocidad, donde se visualiza que la distancia de frenado también disminuye significativamente con un promedio de 1.44 m, indicando que los dispositivos de absorción de impacto cumple con el análisis estadístico y con los objetivos de seguridad mencionados, bajo diferentes condiciones de velocidad y de conducción.

4. Conclusiones

- Culminando el estudio se concluye que la implementación de los dispositivos de absorción conocidos como Növin en los espirales de tipo elástico del vehículo, mejoran significativamente la distancia de frenado, ya sea a una velocidad de 60km/h donde la diferencia de distancia fue de 1.38 metros aproximadamente de cuando no se utilizó el Növin y a una velocidad de 100km/h donde el Növin fue más eficiente existiendo una diferencia en la distancia de frenado de 1.73 metros aproximadamente.
- Gracias a los valores indicados en el coeficiente $Pr (>|t|)$, se llega a la conclusión de que los factores velocidad y suspensión tiene una alta relevancia en la variable distancia, es decir, que si se afectan los valores de los factores, eso afectará significativamente a nuestra variable de distancia, lo cual se puede verificar con el coeficiente del R^2 ajustado que es de 0.9998, indicando que los factores de velocidad y suspensión predicen en un 99.98% la variable de distancia de frenado.
- Por medio de los test de normalidad, homocedasticidad y multicolinealidad se puede concluir que el modelo es válido y confiable para los datos del estudio, ya que al tener un p-valor de 0.6426 en el Shapiro test, p-valor de 0.6252 en el gptest y valores de multicolinealidad entre $1 \leq VIF \leq 5$, sugiriendo que los residuos siguen una distribución normal, la varianza de los errores es constante en todas los niveles de las variables

predictores y que no existe correlación entre las dichas variables.

- Mediante las gráficas de los efectos principales de los factores en la variable distancia y la gráfica de intersecciones, se concluye que al implementar los Növin a diferentes velocidades, la distancia de frenado se reducirá de manera significativamente, siempre y cuando el sistema de frenos y la suspensión se encuentre en buen estado.
- Mediante la gráfica Q-Q residuos y el boxplot se puede concluir que no existen valores atípicos de relevancia que afecten al modelo estadístico.
- Al realizar la validación del estudio, se concluye que la implementación de los dispositivos de absorción de impacto benefician la distancia de frenado, ya que al realizar las mismas pruebas pero bajo a diferentes parámetros de velocidad, la distancia de frenado se redujo en 1.44 m, indicando que los dispositivos son eficientes.

5. Recomendaciones

- Se recomienda que se realicen las pruebas para obtener los datos de manera correcta, es decir, siguiendo al pie de la letra la Normativa de homologación ECE 13-H, donde se establecen características específicas como la temperatura ambiental, condiciones de la pista, condiciones del vehículo, velocidades, etc.
- Se recomienda que al realizar las pruebas se utilice el mismo tipo de neumático tanto para las pruebas con Növin y sin Növin, también se recomienda que al realizar las pruebas se lo realice con el mismo peso todo el tiempo.
- Al realizar las pruebas se recomienda tener en cuenta la seguridad de las personas que se encuentren afuera y adentro del vehículo para precautelar el bienestar de todos.
- Se recomienda que al realizar el modelo estadístico se realicen la mayor cantidad de pruebas para verificar que nuestro modelo sea el adecuado para nuestros datos.

Referencias

- [1] Junta Nacional de Seguridad en el Transporte, “Investigación de accidentes e incidentes,” Artículo. <https://www.usa.gov/es/agencias/junta-nacional-de-seguridad-en-el-transporte> (Junio. 04.2024)
- [2] “Agreement Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations* Addendum 12-H: UN Regulation No. 13-H Revision 4 Uniform provisions concerning the approval of passenger cars with regard to braking,” 2018. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XI-B-16&chapter=11&clang=en (Junio. 04. 2024)
- [3] Reyes Guillermo Gorky and Tamayo Juan Pablo, “Análisis del desempeño de los frenos en vehículos que incorporen el sistema antibloqueo (ABS) en caminos irregulares.,” Master Thesis, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2015.
- [4] Alzallú Soriano and José Antonio, “Servofreno y Abs. Orígenes” Publicación Didáctica. https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:yH2kOsdB6tAJ:scholar.google.com/+Servofreno+y+Abs.+Or%C3%ADgenes&hl=es&as_sdt=0,5 (Junio. 04. 2024)
- [5] AEADE, “Boletín Sector Autor en cifras,” Boletín. <https://www.aeade.net/boletin-sector-automotor-en-cifras/> (Junio. 04. 2024)
- [6] Francisco Fuentes Ramírez, “Diseño factorial 2²,” Publicación científica.

<https://rpubs.com/NoeFranco/809426>
(Junio. 04. 2024)

- [7] Organización Mundial de la Salud, “Traumatismos causados por el tránsito” Noticias. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries#:~:text=Los%20traumatismos%20debidos%20al%20tr%C3%A1nsito,se%20registra%20en%20esos%20pa%C3%A1ses>. (Junio. 04. 2024)
- [8] López Urrutia Fernada, “Diseño Factorial 2².”. https://rpubs.com/fer_12lu/809430
(Junio. 07. 2024)
- [9] Ayala Luis and Vallejo Juan, “Adaptación de un sistema de frenos abs a un vehículo fiat, para mejorar la seguridad del frenado,” bachelorThesis, Universidad técnica del norte, Imbabura, 2013.
- [10] Dongsheng Wu, Jun Li, Xiaoping Shu, Xiaojing Zha, and Beili Xu, “Test Analysis and Theoretical Calculation on Braking Distance of Automobile with ABS,” East China Jiaotong University, Nanchang, 2011.
- [11] Reyes Luis Alberto, “Implementación de un sistema de seguridad al frenado, en una unidad de carga muy liviana para reducir la distancia de frenado, ante el riesgo de accidentes en situaciones de emergencia.” ⁵ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, 2018.
- [12] Reyes Altamirano, Andres Angel, Melendez Lata, and David Jonathan, “Implementación de un sistema de suspensión y frenos en el prototipo de pista Mini Austin 1973 para la categoría TC 2000.” Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, 2022.
- [13] Növinnvento, “NÖVIN,” Ficha Técnica. <https://www.novinnvento.com/novin.html>
(Junio. 07.2024)
- [14] J. R. Cho, J. H. Choi, W. S. Yoo, G. J. Kim, and J. S. Woo, “Estimation of dry road braking distance considering frictional energy of patterned tires,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 42, no. 14–15, pp. 1248–1257, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.finel.2006.06.005.
- [15] Agencia Nacional de Transito, “Visor de siniestralidad nacional ” Estadísticas. <https://www.ant.gob.ec/historico-estadisticas-siniestros-de-transito/>
(Junio. 08. 2024)
- [16] M. Trzesniowski, *Suspension System*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. doi: 10.1007/978-3-658-39847-7.
- [17] D. Li *et al.*, “Test Analysis and Theoretical Calculation on Braking Distance of Automobile with ABS,” 2011.
- [18] G. Wu, G. Fan, and J. Guo, “Ride comfort evaluation for road vehicle based on rigid-flexible coupling multibody dynamics,” *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 3, no. 1, p. 013004, 2013, doi: 10.1063/2.1301304.
- [19] Legal Information Institute. “49 CFR § 571.135 - Standard No. 135; Light vehicle brake systems.” LII / Legal Information Institute.