

Universidad Internacional del Ecuador



**Facultad de Ciencias Técnicas
Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz**

Trabajo de Integración Curricular

Artículo Investigación para la obtención del Título de Ingeniería en Mecánica Automotriz

**DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE CÁLCULO DEL SISTEMA DE FRENOS
EN FUNCIÓN DE MODELACIÓN MATEMÁTICA**

**Rubén Santiago Criollo Jaramillo
Juan Sebastián Íñiguez Albán**

Director: MSc. Gorky G. Reyes C.

Quito, enero 2022

CERTIFICACIÓN

Nosotros, Rubén Santiago Criollo Jaramillo, Juan Sebastián Íñiguez Albán, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

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




Rubén Santiago Criollo Jaramillo



Juan Sebastián Íñiguez Albán

Yo, Guillermo Gorky Reyes Campaña, certifico que conozco a los autores del presente trabajo siendo ellos responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Guillermo Gorky Reyes Campaña

DEDICATORIA

Este artículo va dedicado principalmente a mis padres, que me han apoyado a lo largo de esta carrera y me han dado fuerzas para poder culminarla de una forma exitosa. Igualmente, a toda mi familia que siempre estuvo pendiente de mí y a Doménica Zurita que, a pesar de no haber estado desde el principio de este proyecto, ha sido una parte fundamental para la culminación de este.

- Rubén Santiago Criollo Jaramillo.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedicó a mi familia y amigos en especial a mis padres quienes siempre me brindaron su apoyo y esfuerzo para lograr culminar mi carrera universitaria y los cuales son mi pilar fundamental en mi vida y los cuales me ayudaron a forjarme como la persona que soy actual y finalmente a mis abuelos, mi nana, mis tíos, y primos quienes han aportado a lo largo de mi vida para continuar alcanzando mis sueños y metas, a todos ellos se los dedico.

- Juan Sebastián Íñiguez Albán.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por haber sido mi guía y de mis padres en todo momento. Agradezco a mi familia que ha brindado apoyo incondicional. A la Universidad Internacional del Ecuador por haberme abierto sus puertas para la escuela de Ingeniería Automotriz, a todos los docentes que han sembrado su semilla tanto intelectual como de carácter a lo largo de esta carrera. A Ing. Gorky Reyes como tutor de proyecto por haber guiado de una forma exitosa cada parte del artículo y finalmente a mis amigos “LP Garage” con los cuales se ha forjado una amistad profunda y un cariño tan grande de hermanos.

- Rubén Santiago Criollo Jaramillo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su bendición y por guiarme siempre en esta importante etapa de mi vida. A mis padres y hermano por su apoyo incondicional, por apoyarme en todo momento sin importar los problemas y dificultades.

Finalmente, un agradecimiento especial para mi director Ing. Gorky Reyes quien nos brindó su apoyo para realizar este trabajo y de igual manera a la facultad de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador, a sus docentes y autoridades por guiarme y brindar sus conocimientos.

- Juan Sebastián Íñiguez Albán.

Desarrollo de un programa de cálculo del sistema de frenos en función de modelación matemática.

Rubén Criollo¹, Juan Íñiguez²

¹ *Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador,
rucriolloja@uide.edu.ec, Quito – Ecuador*

² *Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador,
juiniguezal@uide.edu.ec, Quito - Ecuador*

Resumen

Introducción: La importancia de la realización de este artículo es recrear mediciones físicas con las cuales se desarrollará un software, en el cual se pueda dimensionar, analizar o modificar el sistema de frenos. Esto con el fin de que las modificaciones que se realicen a este sistema se lo puedan obtener de una forma técnica basándose en cálculos matemáticos. **Metodología:** Se ha utilizado un método experimental y un método teórico con la finalidad de contrastar los datos medidos de los datos calculados, y de esa forma obtener resultados que satisfagan a las condiciones reales de frenado en un auto. **Resultados:** Se obtiene una mejora en la distancia de frenado calculada por el software ya que en la prueba real realizada con una velocidad inicial de 60 km/h en suelo de adoquín de concreto y una temperatura ideal de 65°C en el sistema de frenos, se obtienen 11.18 m y el modelo matemático calcula 9.5m realizando un aumento del diámetro de los discos de freno en 5 cm. **Conclusión:** Al realizar la comparación de los resultados medidos y calculados, se obtiene una mejora inicial del 15% en la distancia de frenado, prueba suficiente de un buen funcionamiento del modelo matemático desarrollado. El mismo que es intuitivo para cualquier usuario y cumple con el objetivo principal de esta investigación.

Palabras clave: Software, frenos, distancia, modelo matemático, mejora.

Abstract

Introduction: The importance of this article is to recreate physical measurements which will be useful to the development of a software, which will be able to scale, analyze or modify the braking system of a car to provide technical modifications of this system based on mathematical calculations. **Methods:** In order to accomplish this objective, two methods were used. An experimental method and a theoretical method, in which data will be compared to obtain results that satisfy real braking conditions on a car. **Results:** An improvement in the braking distance calculated by the software is obtained, showing 9.5m in contrast to the real test that took place in a street made of concrete cobble, at an initial speed of 60 km/h and 65°C as an ideal temperature for the brake system were the braking distance resulted as 11.18 m. Adding to this result, the software also showed a 5cm increase in the diameter of the brake disc. **Conclusion:** The comparison between the real life and calculated results showed an initial improvement in the braking distance of 15%, giving enough proof of a good performance of the developed mathematical model, which is easy to use for any type of user, accomplishing the principal objective of this research.

Keywords: Software, brake, distance, mathematical model, improvement.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es imprescindible la disposición de elementos electrónicos y de simulación en conjunto con herramientas que facilitarán el trabajo de ingenieros y mecánicos, teniendo una guía certera en cómo acercarse a los sistemas de un vehículo de una forma rápida, segura y técnica. Es por eso que mediante la recolección de datos y mediciones físicas se desarrollará un software en el cual se pueda dimensionar, analizar o modificar el sistema de frenos [1]. Con el fin de que las modificaciones que se realicen a este sistema se lo culminen de una forma técnica basándose en cálculos matemáticos [2] que estarán incluidos en un software amigable para el usuario y con datos a tiempo real según se realicen modificaciones de los datos a ingresar, producto de mediciones y toma de datos.

El objetivo general de estudio es desarrollar un software que permita diseñar los parámetros de un sistema de frenos, mediante un modelo matemático para vehículos ligeros de turismo o deportivos [3]. Para lo cual será necesario determinar las variables necesarias para dimensionar el sistema de frenos.

[4] La importancia de este sistema es facilitar un rápido análisis del dimensionamiento del sistema de frenos, que permita realizar implementación eficiente y modificaciones adecuadas al sistema, para optimizar su funcionamiento, tanto en un vehículo de turismo, así como de competencia [5].

Desde hace muchos años los simuladores informáticos han permitido que se pueda demostrar cómo funciona un disco, una pastilla de freno, la presión del líquido de freno, la repartición de esa presión por todos los circuitos y las fuerzas involucradas en cada uno de los elementos para poder obtener un mejor entendimiento acerca de estos sistemas, de las variables que están involucradas en las mismas

y del comportamiento del vehículo en diferentes escenarios a los que va a ser sometido cuando se utilice el sistema de frenos [6].

[7] Igualmente, en la última década se ha podido estudiar la disipación de calor de los discos de freno y de una mayor apertura en el material con el cual las pastillas de freno son fabricadas según su propósito para las cuales fueron diseñadas [8]. Es por eso que se debe tomar en cuenta el uso al que va a ser expuesto este sistema y saber escoger los componentes con los que va a trabajar para que estos elementos sean confiables y se pueda evitar un recalentamiento del sistema y ocasione una posible falla del mismo.

Es importante señalar que el método con el que se llevará a cabo esta investigación será analítico práctico, debido a que está basada en datos y fórmulas reales en las cuales se desarrollan los diferentes cálculos del sistema de frenos del vehículo y mediante la medición práctica en diferentes escenarios reales como piso seco, mojado e irregular esto con diferentes estándares de pruebas del sistema de frenos en los que se debe someter a un estrés constante [9], para poder corroborar los cálculos del software a desarrollar y tener validez de sus resultados.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El sistema de frenos se define como un mecanismo en el cual la absorción de energía convierte el movimiento del vehículo en calor mientras se encarga de detener las ruedas del vehículo, este es el mecanismo más importante del vehículo debido a que es el sistema encargado de preservar la seguridad del conductor y los pasajeros.

CENTRO DE GRAVEDAD

El centro de gravedad de un vehículo es considerado como el punto en el cual se encuentra concentrado su peso máximo. Por lo

que este punto es el que se encuentra mayormente atraído hacia el centro de la tierra. La zona idónea donde un auto puede llevar este punto de gravedad es en medio de las cuatro llantas y a su vez lo más pegado al suelo, algo a tomar en cuenta es la altura del vehículo, ya que la masa sube el centro de gravedad y hace que el vehículo se vuelva más inestable. Por lo que es necesario mantener un equilibrio entre estos dos factores, peso y masa, en otras palabras, la determinación del centro de gravedad es importante debido a que gracias a esto se determina el comportamiento que tendrá el vehículo. [10]

Se considera además los efectos dinámicos anteriormente mencionados dependerán o variarán también debido a la aplicación y tipo de vehículo, además del número de pasajeros y cargas adicionales que se encuentren en el mismo [10]

Por lo que según Martin Pacheco B. se procede a calcular el centro de gravedad de la siguiente manera.

$$TP = \left(\frac{av}{g}\right) * \left(\frac{h}{L}\right) * P \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

TP:Transferencia de pesos

g:Aceleración de la gravedad

h: es la altura del centro de gravedad al suelo

av:Desaceleracion medida en gravedades

L:Distancia entre eje delantero y trasero

P:Peso

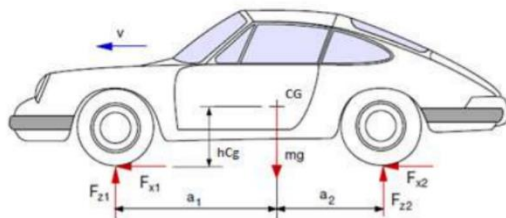


Figura 1: Ubicación de centro de gravedad

Fuente: [10]

1.1 FUERZA DE FRENADO

Podemos entender que la fuerza de frenado se aplica al vehículo en movimiento el cual

dispone de una energía cinética que se podría entender como el equivalente a la fuerza de impulsión creado gracias a la velocidad media del desplazamiento. El efecto de frenado reside en convertir la energía cinética producida por el vehículo en movimiento en calor que se produce al existir rozamiento entre las partes mecánicas de los frenos. Por otra parte, también hay que tener en consideración que la fuerza de frenado tiene un similar valor que la fuerza de rozamiento y por lo tanto se calculará mediante el producto entre el peso que carga sobre una rueda y el coeficiente de adherencia entre ella y el suelo. [11]

Por lo que se procede a calcular la fuerza de frenado de la siguiente manera [12]

Ff, ed + Ff, ep

Ff: Fuerza de frenado

ed: Eje delantero

ep:Eje posterior

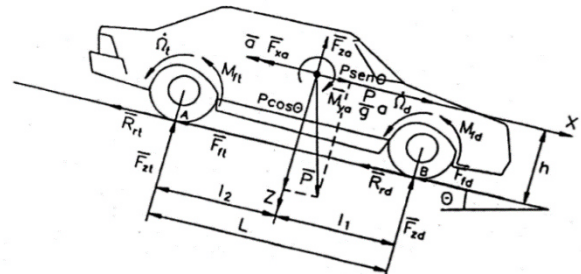


Imagen 2: Solicitaciones que actúan sobre un vehículo en el proceso de frenado

Fuente: [11]

1.2 PAR DE FRENADO

El par de frenado se basa en el rozamiento entre las pastillas contra el disco para crear una fuerza de fricción y que ésta a su vez cree el par de frenado. Para obtener la fuerza de frenado que actúa se presumirá que la presión es uniforme [12]

Algo a tomar en consideración es que el par de frenado debe proporcionar el sistema de freno debe ser similar que el momento el cual se producen las fuerzas de rozamiento respecto al centro de la rueda. Así pues, bastara solamente

con calcular ese momento para saber el par de frenado que deben generar los frenos. [13]

$$N_{max} = N_d + N_t$$

$$N_d = F_{f,d} * R_d$$

$$N_t = F_{f,t} * R_t$$

N_d: Par de frenado del eje delantero

N_t: Par de frenado del eje trasero

R_d: Radio nominal del neumático delantero

R_t: Radio nominal del neumático trasero

1.3 BALANCE ÓPTIMO DE FRENADO

Para lograr alcanzar el equilibrio óptimo de frenado, el cociente que debe existir entre las fuerzas de frenado delanteras y traseras deberá ser similar al cociente entre las fuerzas verticales delanteras y traseras, por lo que su proceso de cálculo es el siguiente

Se puede obtener el balance óptimo de frenado de la siguiente manera. [12]

$$\frac{F_{fren,d}}{P_{d,d}} = \frac{F_{fren,t}}{P_{t,d}}$$

F_{fren,d}: es la fuerza del eje delantero

F_{fren,t}: es la fuerza del eje trasero

P_{d,d}: es el peso en el eje delantero durante la desaceleración

P_{t,d}: es el peso en el eje trasero durante la desaceleración

Hay que tomar en cuenta que el cociente de las fuerzas delanteras y traseras es un parámetro fijo el cual está fundamentado en el dimensionamiento de los componentes del sistema, la relación que se forma entre las fuerzas verticales delanteras y traseras además de esto esta es una variable basada en la deceleración y geometría del vehículo. [12]

1.4 DIMENSIONAMIENTO DEL DISCO DE FRENO

Para lograr un óptimo frenado, se debe determinar las dimensiones del disco en condiciones idóneas en el vehículo. Para ello se utiliza el par y la fuerza de frenado [14]

Según Emilio J. Lima B. se procede a calcular el dimensionamiento de freno de la siguiente manera

$$D_{disco} * \frac{N_{max}}{F_{max}}$$

D_{disco}: Diámetro del disco de freno

N_{max}: Par de frenado total

F_{max}: Fuerza de frenado total



Imagen 3: Disco de freno

Fuente: [15]

1.5 FUERZAS EN EL PEDAL DE FRENO Y REPARTIDOR DE FRENADA

El pedal de freno es el elemento mediante el cual el conductor llega a ejercer según su necesidad una fuerza que será amplificada dependiendo de las necesidades del frenado. De este modo se puede comprobar que el aumento de la fuerza aplicada por el conductor es igual a esta misma fuerza multiplicada por la relación de pedal. [12]

Las fuerzas en el pedal de freno y repartidor de frenada de la siguiente manera

$$F_{s,p} * \frac{L_2}{L_1}$$

F_{s,p}: Fuerza de salida del pedal

L₂: distancia del centro de gravedad al eje delantero del vehículo

L₁: distancia del centro de gravedad al eje trasero del vehículo

Esta fuerza se verá repartida de igual manera a cada una de las bombas de freno si el repartidor de frenada se encuentra ajustado a un porcentaje del 0%, es decir, que esta se encuentre en una posición de equilibrio. [12]

1.6 FUERZA DE SALIDA A LAS BOMBAS

La función primordial de la bomba de frenos es convertir la presión del pie en movimiento del líquido de frenos hacia los pistones quienes son los encargados de presionar las pastillas contra los discos para que estos se detengan. En su función principal se basa en la transformación de la fuerza mecánica de la presión que es ejercida por el conductor sobre el pedal de freno en presión hidráulica. Esta presión es transmitida a los pistones de las ruedas que accionan los frenos. [16]

Según Ciadro, E se procede a calcular la fuerza de salida a las bombas de la siguiente manera

$$F_{e,b} = F_{s,r} f$$

F_{e,b}: Fuerza lineal a la entrada de la bomba

F_{s,r}, *f*: Fuerza a la salida del repartidor de frenada

1.7 FUERZAS LINEALES GENERADAS EN LAS PINZAS DE FRENO

La principal función de la pinza de freno es convertir la presión hidráulica transferida a través de los conductos en una fuerza mecánica lineal.

Según Emilio J. Lima B. se procede a calcular las fuerzas lineales generadas en las pinzas de freno de la siguiente manera

$$F_{pinza\ d} = n^{\circ} * P_{piston\ d} * A_{piston\ d}$$

$$F_{pinza\ t} = n^{\circ} pistones * P_{piston\ t} * A_{piston\ t}$$

F_{pinza d}: Fuerza lineal generada por la pinza de freno en el eje delantero

F_{pinza t}: Fuerza lineal generada por la pinza de freno en el eje trasero

A_{piston d}: Área efectiva del pistón de una de las caras de la pinza en el eje

A_{piston t}: Es el área efectiva del pistón de una de las caras de la pinza en el eje trasero

n^o pistones: es el número de pistones que posee por cara cada pinza

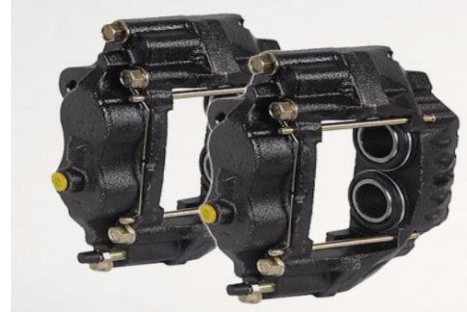


Imagen 4: Pinzas de freno

Fuente: [12]

1.8 FUERZAS DE FRICCIÓN DISCO-PASTILLA

En el proceso de frenado se reduce la velocidad del vehículo gracias a la fricción, convirtiendo la energía cinética del en calorífica, provocando de este modo un aumento en la temperatura del sistema. Esta transformación se realiza mediante el rozamiento de dos superficies del sistema de frenado. Por lo que se observa este comportamiento cuando el conductor presiona el pedal de freno, se efectúa una presurización en el circuito hidráulico y gracias a esto los émbolos de las pinzas presionan las pastillas de freno contra el disco. [2] En este contacto es el momento en el cual se produce la transformación de energía. Debido a ello a estos componentes deben contar con algunas características determinadas, ya que estos deben soportar altas temperaturas sin llegar a desgastarse excesivamente en un corto periodo de tiempo, y a su vez contar con un buen coeficiente de rozamiento para poder frenar el vehículo de una manera óptima. También otro factor a tener en cuenta es el coeficiente de rozamiento del material de fricción este debe ser lo más estable posible en diferentes velocidades y a diferentes presiones de forma tal que el conductor pueda predecir el resultado del frenado cuando trate de desacelerar el vehículo. [2]

Se pueden calcular las fuerzas de fricción disco-pastilla de la siguiente manera

$$F_{friccion\ d} = F_{pinza,\ d} * \mu_{pad,\ d}$$

$$F_{friccion\ t} = F_{pinza,\ t} * \mu_{pad,\ t}$$

F fricción d: Fuerza de fricción generada por cada pinza por la oposición a la rotación del disco producido por las pastillas de freno. Tomando en cuenta los subíndices que se dividen (d) el cual se refiere al eje delantero y el subíndice (t) que se refiere al eje trasero

μ_{pad} : Coeficiente de fricción correspondiente a cada pastilla de freno



Imagen 5: Disco-Pastilla
Fuente: [12]

1.9 PAR DE FRENADO POR CONTACTO DE DISCO-PASTILLA

Se lo puede definir como el procedimiento por el cual se consigue depositar una capa uniforme de material de fricción el cual proviene de la pastilla sobre la superficie de la cara del disco el cual tiene a su vez la tarea de transferir al exterior como energía térmica la energía convertida durante el frenado en otras palabras ayudar a detener el vehículo a través de la fricción que se llega a crear en consecuencia de la orden que se genera cuando se presiona el pedal de freno

1.10 FUERZA DE FRENADO EN LOS NEUMÁTICOS

Este efecto se evidencia comprendido al momento de experimentar en el vehículo transferencia de carga por lo que la capacidad de frenado se vería alterada por lo que con ello se puede llegar a averiguar la máxima fuerza de frenado que cada uno de los ejes es capaz de producir por medio de los neumáticos con las siguientes fórmulas

$$F_{f,d} = \mu * P_d$$

$$F_{f,t} = \mu * P_t$$

Donde:

F_{f,d}: es la fuerza de frenado en el eje delantero

F_{f,t}: es la fuerza de frenado en el eje trasero

μ : es el coeficiente de fricción máximo entre los neumáticos y el asfalto

Gracias a las expresiones anteriores se puede llegar a concluir que como transferencia de cargas la capacidad de frenado del eje delantero se incrementa mientras que la del eje trasero disminuye. [15] Debido a esto se debe recalcar que esto supone una adherencia constante del 1,6 durante la desaceleración es decir se considera que se está aprovechando la máxima adherencia entre el neumático y el asfalto durante el proceso de frenado.



Imagen 6: Fuerza de frenado en los neumáticos
Fuente: [10]

1.11 DISTANCIA DE FRENADO ESTIMADA

Para tener una idea de cómo se comportará el vehículo ante una situación de frenado se debe integrar la desaceleración hallada del vehículo con ello se puede obtener la velocidad del mismo gracias a esto se puede determinar la distancia de frenado con la siguiente fórmula

$$D_f = \frac{V_i^2}{2 * a_v}$$

Donde:

D_f es la distancia de frenado

V_i es la velocidad inicial antes del frenado

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Método

Los métodos que se van a utilizar se los divide en dos, uno experimental y otro teórico mediante el uso del modelo matemático. En la parte experimental se realizan pruebas en el banco de prueba de suspensión y frenado para obtener el peso de cada eje y para el peso en el

eje delantero con el vehículo levantado en la parte posterior para poder calcular la altura del centro de gravedad. Además, se realizan pruebas de frenado reales las cuales servirán para comparar con los resultados del modelo matemático, de igual forma se puede calcular la desaceleración mediante el uso de la velocidad y distancia que se obtengan en la prueba. El método teórico se basa en el cálculo de las variables independientes que el usuario ingresa en el modelo matemático para obtener las variables dependientes principales como la desaceleración del auto, el diámetro de los discos de freno y la distancia de frenado.

La forma de realizar el programa es de una forma jerárquica, pues se utiliza una estructura que va concatenada entre sí para llegar a un resultado, es por eso que primeramente se realiza un diagrama en donde se coloca la forma en la que el modelo matemático se desarrollará, esto es mediante la clase principal que sería el vehículo en general, en donde se encontrará la información general del auto o mejor conocido como las especificaciones del vehículo. Igualmente, esta clase cuenta con sus partes que en este caso será el sistema de frenos y por último cuenta con subpartes que será todo lo que conforma al sistema de frenado, así como se lo representa en el anexo 10.

2.2 Materiales

Los materiales que se van a utilizar para el desarrollo de este proyecto son los datos generales del vehículo tales como las medidas de los neumáticos, su peso general y en cada eje, distancia entre ejes, distancia de vía, medidas del pistón de la bomba de freno, diámetro del pistón de la mordaza, número de pistones en la mordaza, ancho de la pastilla de freno y la velocidad inicial antes del frenado. Estos datos se necesitan para realizar la simulación en el programa el cual se está desarrollando en un lenguaje de programación denominado JavaScript mediante la herramienta de edición de código fuente llamado Visual Studio Code con lo que se desarrollará una interfaz gráfica.

2.2.1 Vehículo de pruebas:

Se utilizó un auto Volkswagen Gol del año 2003, motor 1.8 con el sistema de frenos standard para realizar las pruebas de frenado reales y de igual forma maquinaria para obtener el peso total del auto, y los pesos en cada eje, junto con las medidas de las partes necesarias para la simulación. Se utilizó este vehículo debido a que se encuentra una gran cantidad de autos de este modelo y principalmente de este segmento que forma parte del tipo de vehículo subcompacto hatchback.

2.2.2 Equipo de medición:

El equipo de medición a utilizar es el banco de pruebas de suspensión y frenos de la marca Beissbarth, maquinaria ubicada en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador.

2.2.3 Lugar de pruebas reales:

Se realizaron las pruebas de frenado en una calle larga secundaria y sin inclinación de adoquín de concreto, debido a que no existe un gran flujo de circulación de autos en esta calle. El tipo de suelo en donde se realizaron las pruebas de frenado cuenta con un coeficiente de fricción de $\mu=0.8$ [17]

2.2.4 Neumáticos:

Neumáticos nuevos marca Sportiva Compact con medida 175/70 R13 con un coeficiente de fricción de $\mu=0.8$.



Imagen 7: Neumáticos instalados en el auto
Fuente: Autores

2.3 NORMATIVA DE PRUEBA DE FRENADO EN EL ECUADOR

Mediante el Reglamento Técnico ecuatoriano RTE INEN 034 (4r) el cual establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir los vehículos automotores que circulen en el territorio ecuatoriano, con la finalidad de proteger la vida e integridad de las personas; así como el fomentar mejores prácticas al conductor, pasajero y peatón. [18] Se determinan las siguientes condiciones para las pruebas de frenado.

Pruebas: prueba de frenado dinámica

Se utilizó este tipo de pruebas dinámicas debido a que es un método rápido y efectivo además de costo accesible con el cual se pueden ejecutar varias pruebas en un corto periodo de tiempo y de esta forma llevar a cabo la comprobación de los diferentes materiales y partes que se modifiquen del sistema de freno y realizar la puesta a punto de este, además esta prueba se asemeja lo más posible a lo que es un frenado de emergencia que se puede llegar a dar en la vida cotidiana. [19]

Norma:

Normativa Addendum 12-H: Regulation No. 13-H basada en la adopción de prescripciones técnicas uniformes para los vehículos de ruedas y los equipos y piezas que puedan montarse o utilizarse en dichos vehículos y a las condiciones de reconocimiento recíproco de las homologaciones concedidas sobre la base de dichas prescripciones [20]

Procedimiento experimental:

El rendimiento prescrito por la normativa Addendum 12-H: Regulation No. 13-H para los sistemas de frenado se basa en la distancia de frenado y la desaceleración media totalmente desarrollada. El rendimiento de un sistema de frenado se determinará midiendo la distancia de frenado en relación con la velocidad inicial del vehículo y midiendo la desaceleración media totalmente desarrollada durante el ensayo. La

distancia de frenado será la distancia recorrida por el vehículo desde el momento en que el conductor comienza a accionar el control del sistema de frenado hasta el momento en que el vehículo se detiene, la velocidad inicial será la velocidad en el momento en que el conductor comience a accionar el control del sistema de la prueba se realizará a 60km por hora en el vehículo escogido.

Para la homologación de cualquier vehículo, la prestación de frenado se medirá durante los ensayos en carretera realizados en las siguientes condiciones:

Tabla 1: Condiciones para realizar una prueba de frenado

| Condiciones para realizar una prueba de frenado | |
|---|--|
| 1er paso | Asegurarse de realizar la prueba a la velocidad establecida para el tipo de vehículo a probar. |
| 2do paso | Durante los ensayos, la fuerza aplicada al control de frenos para obtener el rendimiento prescrito no deberá superar la fuerza máxima establecida. |
| 3er paso | En las pruebas de frenado, y en particular en las de alta velocidad, en general se deberá comprobar el comportamiento del vehículo durante el frenado |
| 4to paso | La temperatura ideal para realizar la prueba de frenado debe ser entre 65°C y 100°C en los discos de freno y en los tambores |
| 5to paso | Cada prueba debe repetirse en el vehículo en vacío; puede haber, además del conductor, una segunda persona en el asiento delantero que sea responsable de tomar nota de los resultados de la prueba |
| 6to paso | La velocidad a realizar la prueba debe tener cierto margen de tolerancia, pero siempre se debe alcanzar el rendimiento mínimo establecido. |
| 7mo paso | En estos ensayos, la fuerza aplicada al control deberá ajustarse de forma que se alcance una desaceleración media de $3 m/s^2$ durante cada aplicación de freno; podrán efectuarse dos ensayos preliminares para determinar la fuerza de control adecuada. |
| 8vo paso | Para recuperar la velocidad después de la frenada, la caja de cambios debe utilizarse de |

tal manera que alcance la velocidad en el menor tiempo posible.

Fuente: [20]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al obtener los datos del vehículo se calcula el radio de la rueda, la altura del centro de gravedad y la transferencia de pesos los cuales son datos de partida para que el cálculo se pueda realizar de una manera adecuada.

Después se realizan pruebas reales con el vehículo sobre adoquín de concreto, el cual cuenta con un coeficiente de fricción de $\mu=0.8$, y a una velocidad de 60 km/h como velocidad inicial, ya que se pretende llegar a 0 km/h como velocidad final. Con el vehículo estipulado anteriormente se representan los resultados de la prueba en la Tabla 2.

Tabla 2: Distancia de frenado a 60 km/h

| # de prueba | Distancia de frenado a 60 km/h | |
|-------------|--------------------------------|------------------------|
| | Distancia | Desaceleración |
| 1era prueba | 19.2m | 7.23 m/s ² |
| 2da prueba | 14.36m | 9.66 m/s ² |
| 3era prueba | 13.9m | 9.98 m/s ² |
| 4ta prueba | 12.54m | 11.07 m/s ² |
| 5ta prueba | 11.18m | 12.41 m/s ² |

Fuente: Autores

Se puede observar en la Tabla 2 que el resultado de la prueba 1 y la prueba 5 varían en gran manera, esto se debe a que en la 1era prueba los frenos estaban a temperatura ambiente, esto se lo hizo para poder tener un punto de comparación del rendimiento del frenado cuando los frenos están a una temperatura ambiente versus a cuando los frenos ya están a una temperatura adecuada para las pruebas que es de 65°C a 100°C según se estipula en la norma.

Después se realiza la simulación con todos los datos del vehículo utilizado para realizar una comparación entre las pruebas reales y los resultados simulados junto a los elementos que se deben mejorar para que exista una reducción de la distancia de frenado. El software que ha sido desarrollado en JavaScript recopila los

datos que el usuario ha ingresado y mediante un orden jerárquico calcula los elementos con las fórmulas anteriormente explicadas para llegar a un resultado como se puede observar en las imágenes 8 y 9. A partir de los resultados que se obtienen de forma teórica o mediante el software se realiza la comparación entre los resultados reales y teóricos que se obtienen de las pruebas.

Frenos

Datos generales Datos por eje

Distancia entre ejes: 2.468 m

Distancia de vía o trocha: 1.628 m

Peso total del vehículo: 1010 kg

Peso del eje delantero con vehículo nivelado: 620 kg

Peso del eje posterior: 390 kg

Altura de elevación del eje posterior: 0.13 m

Peso eje delantero con eje posterior elevado: 635 kg

Cálculos de freno

Radio de la rueda: 0.288 m

Altura del centro de gravedad: 0.985 m

Transferencia de pesos longitudinal: 3152.24 N

Transferencia de pesos transversal: 4778.7 N

Fuerza de frenado: 808 kgf

Par de frenado: 232.38 kgf*m

Balance óptimo de frenado: IDEAL

Diámetro óptimo del disco de freno: 0.288 m

Imagen 8: Primer prototipo de software (1)

Fuente: Autores

Diámetro del pistón de la bomba de freno: 0.02 m

de pistones en el caliper: 1

Diámetro del pistón del caliper: 0.0545 m

Coefficiente de fricción de la pastilla de freno: 0.5 μ

Ancho de la pastilla de freno: 0.100 m

Velocidad del vehículo antes de frenar: 60 Km/h

Distancia de frenado actual: 11.18 m

Fuerza total de salida del pedal: 15 kgf

Fuerza de entrada a la bomba: 15 kgf

Presión hidráulica total: 39821.09 kgf/m²

Radio efectivo del disco de freno: 0.238 m

Par de frenado entre pastilla-disco: 22.07 kgf*m

Fuerza de frenado en los neumáticos: 153.49 kgf

Desaceleración: 14.63 m/s²

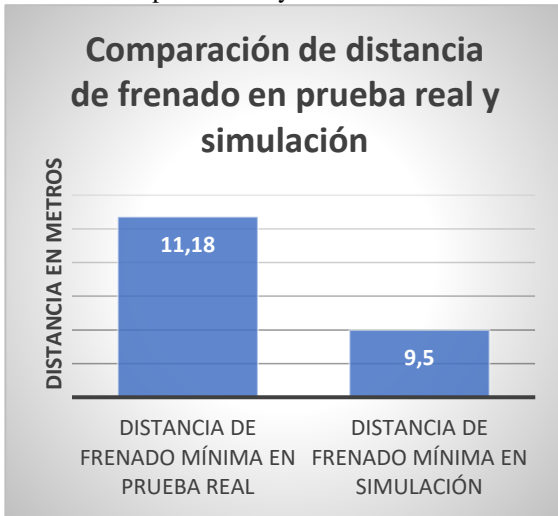
Distancia de frenado: 9.50 m



Imagen 9: Primer prototipo de software (2)

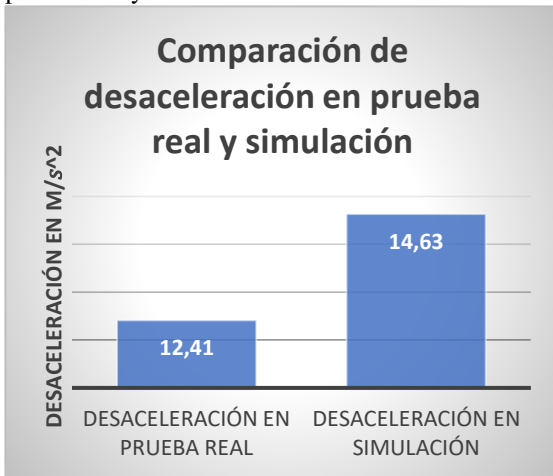
Fuente: Autores

Gráfico 1: Comparación de distancia de frenado en prueba real y simulación



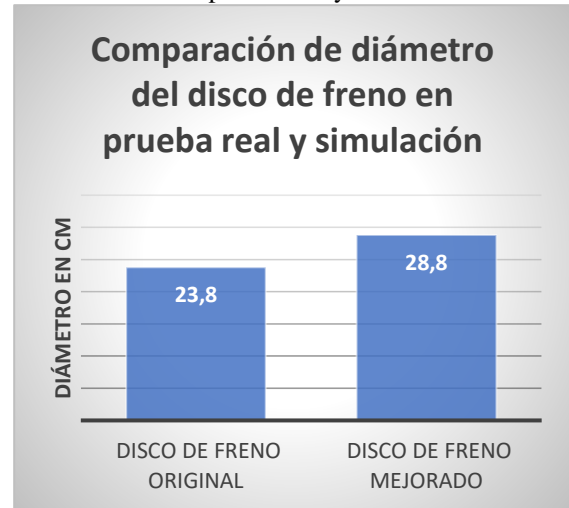
Fuente: Autores

Gráfico 2: Comparación de desaceleración en prueba real y simulación.



Fuente: Autores

Gráfico 3: Comparación de diámetro del disco de freno en prueba real y simulación



Fuente: Autores

Como se observa los gráficos 1, 2 y 3 se logran reducir 1.68 metros de la distancia de frenado al aumentar 5 cm del diámetro del disco de freno. De igual forma, la desaceleración se logra incrementar en 2.22 m/s^2 de la prueba con una menor distancia de frenado.

4. CONCLUSIONES

El modelo matemático ha sido desarrollado con éxito, pues la forma de utilizar la interfaz gráfica es de forma totalmente intuitiva, esto quiere decir que es fácil de usar y comprender para cualquier tipo de usuario con niveles básicos de conocimiento automotriz hasta un usuario profesional en el área. Los resultados que se han obtenido mediante el modelo matemático han sido totalmente satisfactorios, ya que demuestran que al realizar ciertas mejoras que el programa determina se puede reducir desde un 15% la distancia de frenado de un vehículo.

Los mejores resultados obtenidos en las pruebas reales fueron en condiciones favorables para la medida, pues fue realizado en suelo seco, con poca o nula inclinación y con las partes utilizadas para el frenado en buenas condiciones en una temperatura adecuada, dando como resultado una reducción de 1.68m en el cálculo realizado por el software, ya que en la prueba

real se obtuvieron 11.18 m en la distancia de frenado mientras que en el software se obtuvo una distancia de 9.50 m, cumpliendo con un rango real de frenado y llegando a satisfacer el objetivo principal del estudio. De igual forma el software calcula que para un mejor frenado se debe aumentar el diámetro del disco de freno 5 cm, esto quiere decir de 23.8 cm que es el disco original a 28.8 cm. También se pudo comprobar que la desaceleración en las pruebas reales nos da como resultado 12.41 m/s^2 y en comparación con la desaceleración calculada en el software que es de 14.63 m/s^2 . Lo que quiere decir que los resultados están totalmente apegados a la realidad y se cumplen con los objetivos establecidos para el estudio de una forma satisfactoria.

Se concluye finalmente que el modelo matemático y el software desarrollado puede ser aplicado al diseño y dimensionamiento de las partes y piezas del sistema de frenos del vehículo para mejorar u optimizar el sistema de frenos. Así como aplicar en estudios de dinámica que permita hacer un desarrollo del sistema de frenos desde cero.

5. REFERENCIAS

- [1] E. Criado, "Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student," Marzo 2012. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/14460>. [Accessed 12 Septiembre 2020].
- [2] S. Ebrahimi-Nejad and M. Kheybari, "Brake System Design for Sports Cars using Digital Logic Method," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 7, no. 4, p. 14, 2017.
- [3] S. Shi, "Automobile brake system," 24 Mayo 2016. [Online]. Available: <https://www.theseus.fi/handle/10024/111425>. [Accessed 12 Septiembre 2020].
- [4] S. Nagurnas, V. Mitunevičius, J. Unarski and W. Wach, "Evaluation of veracity of car braking parameters used for the analysis of road accidents," *Transport*, vol. 22, no. 4, p. 6, 2007.
- [5] C. Hohmann, K. Schiffner, K. Oerter and H. Reese, "Contact analysis for drum brakes and disk brakes using ADINA," *Computers and Structures*, vol. 72, no. 1, p. 14, 1999.
- [6] F. Talati and S. Jalalifar, "Analysis of heat conduction in a disk brake system," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 45, no. 8, p. 14, 2009.
- [7] S. Nagesh, C. Siddaraju, S. Prakash and M. Ramesh, "Characterization of Brake Pads by Variation in Composition of Friction Materials," *Procedia Materials Science*, vol. 5, no. June 2016, p. 9, 2014.
- [8] B. K. Kumbhar, S. R. Patil and S. M. Sawant, "A Comparative Study on Automotive Brake Testing Standards," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 98, no. 4, p. 6, 2017.
- [9] B. I. B. Morales, Diseño y construcción de un banco para la determinación del centro de gravedad y transferencia de pesos en vehículos livianos, Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [10] J. L. A. Salazar, FUERZAS DESARROLLADAS EN EL VEHICULO, Madrid, 2010.
- [11] M. Pacheco B, *Diseño automotriz*, Quito, 2017.
- [12] E. C. Ocaña, DISEÑO Y CÁLCULO DEL SISTEMA DE UN FORMULA STUDENT, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 9 de Febrero de 2012.
- [13] I. C. Triay, DISEÑO DEL SISTEMA DE FRENADO DE UN AUTOMÓVIL CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA, MATERIALES, ENERGÍA DISIPADA, PAR DE FRENADO, FUERZAS DE ACCIONAMIENTO Y CIRCUITO HIDRAULICO, Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, 17 de junio de 2018.
- [14] D. E. C. Cueva, diseño de construcción del sistema de frenos de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico, Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana , Febrero 2018.
- [15] E. J. L. B., *PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA, BASADO EN LOS LINEAMIENTOS , PROPUESTOS POR SAE INTERNACIONAL , DEL EQUIPO FORMULA SAE EN LA ,*

UNIVERSIDAD FERMÍN TORO,
CABUDARE: UNIVERSIDAD
FERMÍN TORO, MARZO DEL 2014.

- [16] J. S. L. FABIÁN AYALA VEGA,
“DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UN
SISTEMA AUXILIAR DE FRENOS
CON CONTROL ELECTRÓNICO”,
LATACUNGA: ESCUELA
POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO,
2005.

- [17] Gustavo R. Di Rado, Daniel S. Presta
García, G. Devincenzi, "Análisis de las
Fuerzas que Actúan en la Interface
Neumático Carretera. Modelos de
Simulación de Aceleración," 2013.
[Online]. Available:
[https://www.semanticscholar.org/paper/
An%C3%A1lisis-de-las-Fuerzas-que-
Act%C3%BAan-en-la-Interface-Rado-
Garc%C3%ADa/e2e3651fdafede1085d
3f96a377fe1ff17148be7](https://www.semanticscholar.org/paper/An%C3%A1lisis-de-las-Fuerzas-que-Act%C3%BAan-en-la-Interface-Rado-Garc%C3%ADa/e2e3651fdafede1085d3f96a377fe1ff17148be7). [Accessed
2021].

- [18] INEN, "RESOLUCIÓN No. 16 382,"
Quito, 13 /Marzo / 2015.

- [19] C. C. C. Herman Fernández, *Banco de
pruebas para ser usado en el frenado
dinámico de los motores de inducción*,
Puerto Ordaz: Universidad Politecnica
Antonio Jose De Sucre, 2011.

- [20] U. NATIONS, "Addendum 12-H:
Regulation No. 13-H," Geneva, 4
October 2011.

- [21] A. B. MOHD, "Development of Brake
System Model," p. 24, 2008.

6. ANEXOS

Anexo 1:



Anexo 2:



Anexo 3:

```
"inputParameters": {
  "wheelbase": {
    "value": null,
    "alias": "WB",
    "units": "cm"
  },
  "trackWidth": {
    "value": null,
    "alias": "TW",
    "units": "cm"
  },
  "frontAxleWeightLeveled": {
    "value": null,
    "alias": "FAWL",
    "units": "kg"
  },
  "rearAxleElevationHeight": {
    "value": null,
    "alias": "RAEH",
    "units": "cm"
  },
  "frontAxleWeightWithRearAxleElevated": {
    "value": null,
    "alias": "FAWRAE",
    "units": "kg"
  },
}
```

Anexo 4:



Anexo 5:



Anexo 6:



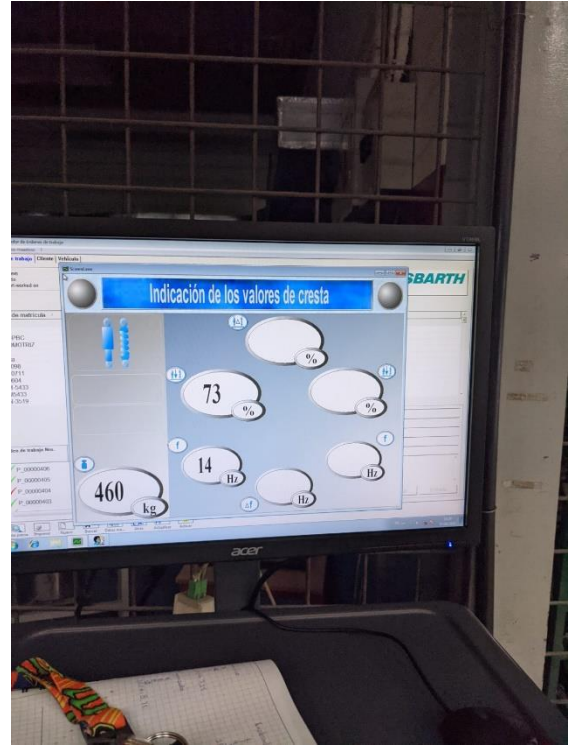
Anexo 7:



Anexo 8:



Anexo 9:



Anexo 10:

