



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA UNA SUSPENSIÓN ACTIVA POSTERIOR
APLICADO A UN VEHÍCULO MONOPLAZA TIPO FÓRMULA SAE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título
de Ingeniero Automotriz e Ingeniero Mecatrónico

AUTORES: NELSON DAVID CEVALLOS RÍOS

RAÚL SANTIAGO PESÁNTEZ URGILÉS

TUTOR: ING. DIEGO RENÉ URGILÉS CONTRERAS, MSTR.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Nelson David Cevallos Ríos con documento de identificación N° 1105799181 y Raúl Santiago Pesántez Urgilés con documento de identificación N° 0105783872; 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.

Cuenca, 18 de julio del 2023

Atentamente,



Nelson David Cevallos Ríos
1105799181



Raúl Santiago Pesántez Urgilés
0105783872

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

Nosotros, Nelson David Cevallos Ríos con documento de identificación N° 1105799181 y Raúl Santiago Pesántez Urgilés con documento de identificación N° 0105783872, 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 Proyecto técnico: “Diseño del sistema de control para una suspensión activa posterior aplicado a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Automotriz e Ingeniero Mecatrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente de 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.

Cuenca, 18 de julio del 2023

Atentamente,



Nelson David Cevallos Ríos

1105799181



Raúl Santiago Pesántez Urgilés

0105783872

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego René Urgilés Contreras con documento de identificación N° 0104431374, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA UNA SUSPENSIÓN ACTIVA POSTERIOR APLICADO A UN VEHÍCULO MONOPLAZA TIPO FÓRMULA SAE, realizado por Nelson David Cevallos Ríos con documento de identificación N° 1105799181 y por Raúl Santiago Pesántez Urgilés con documento de identificación N° 0105783872, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana

Cuenca, 18 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Diego René Urgilés Contreras, Mstr.

0104431374

Dedicatoria

Santiago Pesántez

El presente proyecto de titulación está dedicado:

A Dios, que me ha dado fortaleza, guía y luz durante todo mi transcurso por la carrera, permitiéndome alcanzar mis metas y objetivos, y a Él le dedico todo mi esfuerzo por ser mejor.

A mi familia, en especial a mis padres, que me han motivado siempre a continuar, apoyándome en los pasos que he recorrido. A mis hermanos, para que el empeño puesto en este trabajo los inspire a realizar las cosas con toda nuestra capacidad.

Finalmente, a todos los amigos que he hecho en este camino en la universidad, algunos incluso desde mucho antes, pues esta obra no se habría conseguido sin su compañía.

David Cevallos

El presente proyecto de titulación está dedicado:

Con mucho amor a mis padres, Cathy y Nelson; que han sido mi amparo y mis consejeros durante toda mi vida; a mis hermanos, Sebas y José Andrés que me hacen falta para todo, son mi motivación para continuar hacia adelante; a mis abuelitos, mis otros padres, Marco y Judith, que son mi ejemplo a seguir y por su apoyo incondicional; Marco y Birmania, por el gran apoyo y confianza hacia mí.

A mi tía Diani, mis primos Sophi, Renato y Agus que forman parte de mis motivaciones y por el aliento que siempre me brindan y a toda mi familia porque forman parte de mí.

También se las dedico a mis mascotas, Canela, Lucas y Shaya por el amor, la paz y felicidad que me dan para así despojarme de todo lo negativo.

Finalmente, a mis amigos que han formado parte de este gran proceso de preparación y experiencias en la universidad y fuera de ella.

Agradecimientos

Santiago Pesántez

Agradezco infinitamente a Dios por la infinita bondad que tiene al ayudarme a cumplir esta meta, y a los dones que me ha dado, siendo éstos los que me han permitido conseguirla. Agradezco desde el fondo de mi corazón a mi familia, por todo el apoyo que me han dado en mi camino. Con especial cariño a mi abuelita Marina, quien siempre puso de su ayuda para permitirme continuar estudiando; a mi papá le agradezco su apoyo y aporte de experiencia en todo lo que he aprendido; a mi madre por cada consejo y por no permitirme a mí mismo exigirme menos.

Agradezco también encarecidamente a mi tutor Diego Urgilés, por las horas invertidas en este trabajo, el apoyo y la fe en que este proyecto sería excepcional. Así también, a mi compañero David Cevallos, por compartir esta experiencia y este logro, pues juntos lo conseguimos realizar. Y agradezco a mis amigos, de quienes su amistad valoro profundamente, pues junto a ellos pude construir grandes cosas, vivir alegrías y tristezas, y espero tenerlos siempre cerca para el camino que la vida nos pueda dar.

David Cevallos

Agradezco primeramente a Dios y a la Virgen María por ser la luz de mi vida, por la fortaleza, fe, esperanza y bendiciones que han derrochado en mi y en mis seres queridos.

Le agradezco a mi familia por el apoyo dado, en especial a mi papi y a mi mami por sus sacrificios, por sus consejos, por su valimiento y por darme fuerzas para no desistir, le agradezco a mi papi Marco por sus enseñanzas y hacerme amar las matemáticas, a mi mami muñe por sus bendiciones y apoyo incondicional, a Diani por su aliento, a mi primo pancho José por haberme recibido en su morada casi todo el tiempo de mis estudios universitarios.

Doy las gracias también a mi tutor Diego Urgilés por la confianza y guía para realizar este proyecto, le agradezco a mi compañero Santiago, por su apoyo, enseñanza y por esta gran experiencia compartida, en la que juntos alcanzamos finalizar este proyecto. Doy gracias a mis amigos que han compartido experiencias y anécdotas desde el primer día de clases hasta el final.

Índice

Índice	VI
Lista de Tablas.....	IX
Lista de Figuras	X
Resumen	XIII
Abstract.....	XIV
1. Introducción.....	1
2. Problema.....	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del Problema	2
2.3. Importancia y Alcances.....	3
2.4. Delimitación	3
2.4.1. Espacial o Geográfica.....	3
2.4.2. Temporal.....	3
2.4.3. Sectorial o Institucional	4
2.5. Problema General.....	4
2.6. Problemas Específicos.....	4
3. Objetivos.....	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. Marco Teórico	5
4.1. La Fórmula SAE.....	5
4.2. Elementos Sistema de Suspensión de un Vehículo Fórmula SAE.....	6
4.2.1. Reglamento Respecto a los Sistemas de Suspensión para Fórmula SAE.....	12

4.3.	Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva	13
4.3.1.	Sistemas de Suspensión Activa	13
4.3.2.	Sistemas de Suspensión Semiactiva	13
4.4.	Estado del Arte Internacional, Regional, Nacional y Local	14
4.5.	Propuestas Electromagnéticas	16
4.5.1.	Propuesta de Suspensión Electromagnética de EEE 351 Term Project	16
4.5.2.	Propuesta de Amortiguador MONOSHOCK	17
4.6.	Mecanismos Electromagnéticos Similares	18
4.6.1.	Motor Lineal Magnético Reciprocante	18
4.6.2.	Tecnología MAGLEV	19
5.	Marco Metodológico	20
5.1.	Fuerza del Campo Magnético de un Solenoide	20
5.2.	Corriente Admisible de los Cables según su Sección	21
5.3.	Materiales de Alta Permeabilidad Magnética	22
5.4.	Modelo Matemático de Suspensión Activa	24
5.5.	Requerimientos de Carga de la Suspensión	28
5.6.	Dimensiones del Actuador	29
5.7.	Cálculo de Electroimanes	31
5.8.	Explicación del Funcionamiento del Concepto del Actuador	32
5.9.	Primeras Pruebas en SIMULINK	33
5.10.	Primera Propuesta de Control	38
5.11.	Segunda Propuesta de Control	42
6.	Resultados	47
6.1.	Resultado del Diseño de Electroimanes	47

6.2.	Primeros Resultados del Comportamientos del Sistema.....	47
6.3.	Resultados de Primera Propuesta	50
6.4.	Resultados Segunda Propuesta.....	52
6.5.	Comparación con el Sistema Original.....	54
6.6.	Propuesta de Diseño Electrónico.....	57
6.6.1.	PCB Principal	58
6.6.2.	Fuente Aislada	62
6.6.3.	Fusible Electrónico	63
6.6.4.	Conjunto MULTIBOARD.....	64
6.7.	Sensor	65
6.8.	Propuesta del Diseño 3D	66
6.8.1.	Primera Propuesta en 3D	66
6.8.2.	Segunda Propuesta en 3D	69
7.	Conclusiones.....	71
8.	Recomendaciones	72
9.	Referencias	74
	ANEXOS	80
	Anexo A: Planos de la primera propuesta	81
	Anexo B: Planos de la segunda propuesta.....	82

Lista de Tablas

Tabla 122
Tabla 228
Tabla 331
Tabla 447

Lista de Figuras

Figura 14
Figura 2.....6
Figura 3.....7
Figura 4.....8
Figura 5.....8
Figura 6.....9
Figura 7.....10
Figura 8.....10
Figura 9.....11
Figura 10.....17
Figura 11.....18
Figura 12.....19
Figura 13.....20
Figura 14.....24
Figura 15.....25
Figura 16.....26
Figura 17.....26
Figura 18.....27
Figura 19.....29
Figura 20.....30
Figura 21.....32
Figura 22.....33
Figura 23.....34
Figura 24.....35
Figura 25.....37
Figura 26.....37
Figura 27.....38
Figura 28.....39

Figura 29.....	40
Figura 30.....	41
Figura 31.....	42
Figura 32.....	43
Figura 33.....	45
Figura 34.....	46
Figura 35.....	46
Figura 36.....	48
Figura 37.....	49
Figura 38.....	49
Figura 39.....	50
Figura 40.....	50
Figura 41.....	51
Figura 42.....	51
Figura 43.....	52
Figura 44.....	53
Figura 45.....	53
Figura 46.....	54
Figura 47.....	55
Figura 48.....	56
Figura 49.....	57
Figura 50.....	58
Figura 51.....	59
Figura 52.....	59
Figura 53.....	60
Figura 54.....	61
Figura 55.....	62
Figura 56.....	62
Figura 57.....	63
Figura 58.....	64

Figura 59.....	64
Figura 60.....	65
Figura 61.....	66
Figura 62.....	67
Figura 63.....	68
Figura 64.....	69
Figura 65.....	70

Resumen

Los sistemas de suspensión activa mejoran el rendimiento de una suspensión mediante el uso de actuadores, sensores y sistemas de control. Para el presente proyecto, se presenta una propuesta de sistema de control para una suspensión activa posterior, utilizando tecnología electromagnética aplicada a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE, siendo utilizado para el estudio el vehículo fórmula SAE eléctrico que se encuentra en la Universidad Politécnica Salesiana en su sede de Cuenca. El vehículo mencionado posee actualmente un sistema de suspensión pasivo, que para cambiar sus condiciones o las calibraciones de suspensión debe estar en reposo y la tarea de calibración se efectúa manualmente. Con una propuesta de un actuador electromagnético se desarrolla un modelo matemático adecuado para establecer un sistema de control, determinando estos parámetros a través de un método bibliográfico y con softwares de simulación, principalmente MATLAB. Posterior a esto, se diseña una propuesta de gestión electrónica, que aplique las características y funciones del control diseñado, convirtiendo el sistema convencional en una suspensión activa. Con esto, se obtuvieron resultados favorables en la simulación de los desplazamientos tanto del chasis como del neumático, demostrando que el sistema de suspensión activa propuesto genera una mejora notable frente al sistema pasivo actualmente colocado en el vehículo.

Palabras clave: Suspensión Activa, Formula SAE, Electromagnético, Sistema de Control, Gestión Electrónica.

Abstract

Active suspension systems improve the performance of a suspension through the use of actuators, sensors and control systems. For the present project, a proposal of a control system for a rear active suspension is presented, using electromagnetic technology applied to a single-seater vehicle type formula SAE, being used for the study the electric formula SAE vehicle that is in the Salesian Polytechnic University at its Cuenca's Campus. The mentioned vehicle currently has a traditional suspension system, which to change its conditions or suspension calibrations must be at rest and the calibration task is performed manually.

With a proposal of an electromagnetic actuator, a proper mathematical model is developed to establish a control system, determining these parameters through a bibliographic review and with software simulation, using MATLAB, SIMULINK Tools. On the other hand, an electronic management proposal is designed, which applies the characteristics and functions of the designed control system, converting the conventional system into an active suspension. Thus, favorable results were obtained in the displacements' simulation of the main two variables of the mathematical model: chassis and tire, when it could demonstrate that the proposed active suspension System, generates a significant improvement over the conventional system currently installed in the vehicle.

Keywords: Active Suspension, Formula SAE, Electromagnet, Control System, Electronic Management.

1. Introducción

El sistema de suspensión de un vehículo busca aislar del chasis las irregularidades del camino y las aceleraciones producidas por la conducción, mediante el uso de elementos pasivos y activos, dependiendo del tipo de sistema. Los sistemas que involucran elementos activos requieren que su control actúe adecuadamente para garantizar los objetivos del sistema, sean estos de rendimiento en competencia o de confort, y para esto resulta esencial una etapa de diseño que considere las variables involucradas en la conducción (Hurel, Terán, Flores, Peralta, & Flores, 2017).

Para el presente proyecto, se analiza el caso de un vehículo monoplace tipo fórmula SAE, el cual posee un sistema de suspensión pasivo, tanto delantero como trasero, obligando a que el ajuste del sistema se realice con el vehículo detenido y su comportamiento no pueda variar durante pruebas ni competencias, además de no poder analizar el rendimiento del sistema en tiempo real. Debido a esta situación, se busca implementar un sistema de suspensión activa que permita realizar estas operaciones de forma automática, o incluso ajustarla de remotamente, además de obtener comunicación con el vehículo para analizar el rendimiento de la suspensión en tiempo real, mediante un actuador que funcione con tecnología electromagnética, y un diseño de control para dicho actuador.

Existen diversos tipos de actuadores que utilizan tecnología electromagnética para modificar el movimiento de un elemento, como los motores lineales magnéticos o la tecnología MAGLEV, e incluso algunas propuestas de diseño y sistemas de suspensión que actualmente utilizan actuadores magnéticos, los cuales permiten analizar las posibles formas de solucionar la problemática planteada.

Finalmente, al referir la tecnología electromagnética, se debe recalcar la importancia de la selección de materiales para el manejo de los campos electromagnéticos, así como también el análisis comportamiento eléctrico del circuito que genera los campos, para con ello también determinar los componentes para la gestión electrónica y las características del control.

2. Problema

2.1. Antecedentes

El sistema de suspensión de un vehículo es aquel que permite mantener en contacto las ruedas con el suelo para asegurar la adherencia en la vía. Para controlar este sistema, existen distintos tipos de suspensión, entre ellos, los sistemas de suspensión electrónica, por sus siglas en inglés como ECS (electronically controlled suspension) integrando la innovación tecnológica para que los vehículos ofrezcan mayores comodidades a la conducción y mejores prestaciones de seguridad al volante (canalMOTOR, 2019).

También, empresas como BOSE han desarrollado sistemas de suspensión electromagnéticas dedicadas al confort del manejo, donde su diseño combina un motor electromagnético, un amplificador de potencia y unos detallados algoritmos matemáticos para controlar este sistema (Seijo, 2007).

En la actualidad, muchas universidades alrededor del mundo, incluyendo universidades ecuatorianas, realizan estudios y diseños relacionados al análisis del comportamiento físico de los sistemas de amortiguamiento aplicados a cierto tipo de vehículos. Sin embargo, existe la posibilidad de ampliar el conocimiento en aplicaciones reglamentarias para las competencias de fórmula SAE, con el objeto de mejorar los sistemas de suspensión a diferentes condiciones de rendimiento.

2.2. Descripción del Problema

Los sistemas de suspensión más comúnmente utilizados implementan amortiguadores hidráulicos que, por lo general, no cuentan con regulación automática, y los ajustes deben realizarse manualmente con el vehículo detenido. Esto coloca a los sistemas con control electrónico, de entre ellos los que utilizan electromagnetismo para el manejo de los elementos mecánicos, en una gran ventaja de manejo del vehículo, pudiendo implementar sistemas que modifiquen los parámetros de la suspensión en tiempo real, mejorando el rendimiento en competencia de un vehículo monoplace tipo fórmula SAE.

La necesidad, por tanto, de un sistema de control para la suspensión posterior de un vehículo tipo fórmula SAE se presenta a la hora de modificar los parámetros de dicha suspensión, en base al monitoreo que el sistema de control permite realizar al rendimiento del vehículo durante una carrera o durante pruebas.

Además, el diseño eficiente del sistema de control garantiza un adecuado dimensionamiento para la selección de componentes dentro de los componentes electrónicos que potenciarán las características de la suspensión posterior aplicado a un vehículo monoplace tipo Fórmula SAE.

2.3. Importancia y Alcances

El sistema de suspensión de un vehículo de competición requiere mantenerse siempre en óptimas condiciones, por lo que los ajustes de dicha suspensión deben realizarse de forma automática al momento de ser requerido un cambio durante el manejo.

Para que estos ajustes se modifiquen, se requiere de un sistema de control que monitoree constantemente las características de la suspensión, para que actúe oportunamente para mejorar el rendimiento del vehículo tipo fórmula SAE durante una carrera.

Además, la toma de datos por parte del sistema de control permitirá un mejor análisis de lo que sucede con la suspensión posterior de un vehículo tipo fórmula SAE durante el manejo en competencia o pruebas.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o Geográfica

El proyecto se desarrollará en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, Ecuador, en la Calle Vieja 12-30, parroquia El Vecino.

2.4.2. Temporal

La investigación se realizará durante las materias de Trabajo de Titulación 1 y 2, durante 400 horas, desde el año 2022 hasta el 2023.

2.4.3. Sectorial o Institucional

El presente proyecto se llevará a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana, en su Sede Matriz Cuenca.

Figura 1

Croquis de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca



2.5. Problema General

¿Cuál es el mejor diseño para el sistema de control de una suspensión activa posterior aplicado a un vehículo tipo fórmula SAE?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Es posible realizar una investigación bibliográfica acerca de diseños de sistemas de control para una suspensión activa posterior de un vehículo monoplace tipo fórmula SAE?
- ¿Cuál es el diseño de un sistema de control para a una suspensión activa posterior aplicado a un vehículo monoplace tipo fórmula SAE?

- ¿Cuál es el diseño electrónico para el sistema de control de la suspensión activa posterior aplicado a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de control para una suspensión activa posterior aplicado a un vehículo tipo fórmula SAE.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica acerca de diseños de sistemas de control para una suspensión activa posterior de un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE.
- Diseñar un sistema de control para una suspensión activa posterior aplicado a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE.
- Elaborar una propuesta de diseño electrónico para el sistema de control de la suspensión activa posterior aplicado a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE.

4. Marco Teórico

4.1. La Fórmula SAE

La Fórmula SAE es una competencia en la cual participan equipos de estudiantes universitarios de pregrado y posgrado a concebir, diseñar, fabricar, desarrollar y competir con vehículos pequeños estilo fórmula, permitiendo que los equipos tengan la oportunidad de demostrar su creatividad y habilidades de ingeniería en comparación con equipos de otras universidades de todo el mundo (SAE INTERNATIONAL, s/f).

Estas competencias parten de un evento organizado por la rama estudiantil SAE, fundada por Ron Matthews en 1980 en la Universidad de Texas. Para la siguiente competencia, varias empresas apoyaron el proyecto y sirvieron de jueces desde empresas como General Motors, Ford, Southwest Research Institute, una variedad de compañías petroleras y, quizás lo más notable, el famoso piloto/ingeniero/propietario de autos de carreras Jim Hall (FORMULA SAE , s/f).

La Fórmula SAE actualmente consiste en una competencia de educación en ingeniería que requiere la demostración de habilidades de diseño y construcción para medir el rendimiento de los vehículos en una serie de eventos, tanto fuera como dentro de la pista contrarreloj. Cada competencia brinda a los equipos la oportunidad de demostrar su creatividad y habilidades de ingeniería en comparación con equipos de otras universidades del mundo (SAE INTERNATIONAL, 2021).

4.2. Elementos Sistema de Suspensión de un Vehículo Fórmula SAE

El sistema de suspensión tiene la función de amortiguar las vibraciones y movimientos de un vehículo causados por las imperfecciones en la superficie del camino. Su objetivo principal es garantizar que las ruedas estén en contacto constante con el suelo, lo cual contribuye a mejorar la estabilidad del vehículo, así como el manejo y la comodidad del conductor.

Figura 2

Sistema de Suspensión Trasero



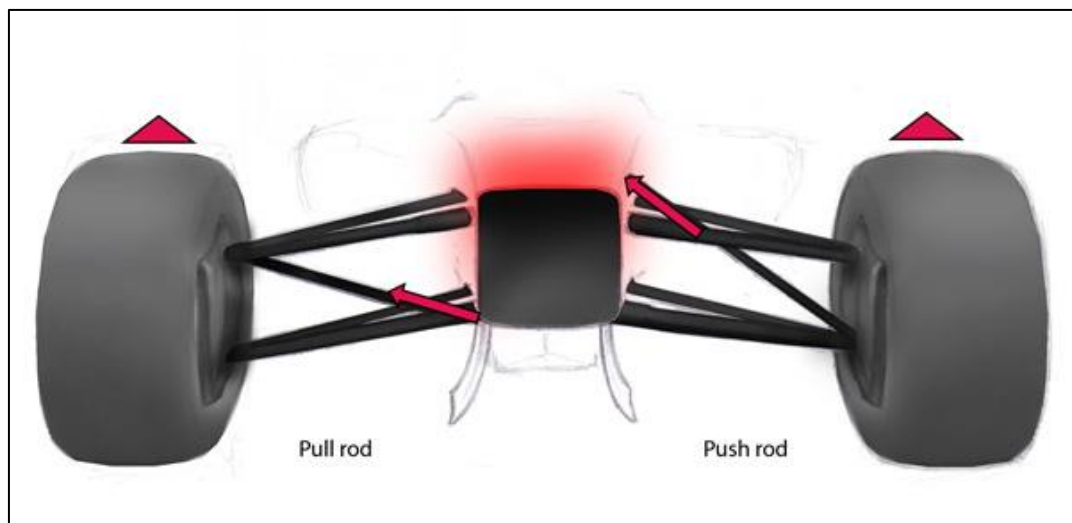
Nota: Sistema de Suspensión Trasero Izquierdo del Vehículo Formula SAE de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca

El sistema de suspensión de un vehículo Formula SAE consta de los siguientes elementos:

- **Brazos de suspensión:** Los brazos de suspensión en los vehículos tipo Formula SAE, son componentes cruciales de los sistemas de suspensión sofisticados utilizados en estos automóviles de carreras, ya que su función principal es la de mantener unidos a las ruedas con el chasis. Estos brazos, también son conocidos como brazos de suspensión A-arms, y son parte integral de la suspensión delantera y trasera de los monoplazas. Cabe destacar que estos brazos cuentan con una barra de empuje, que es la que transmite las vibraciones de la rueda a los muelles y el amortiguador, esta barra puede estar dispuesta de dos formas que son las Push-Rod o Pull-Rod (Auquilla & Torres, 2016).

Figura 3

Brazos de Suspensión

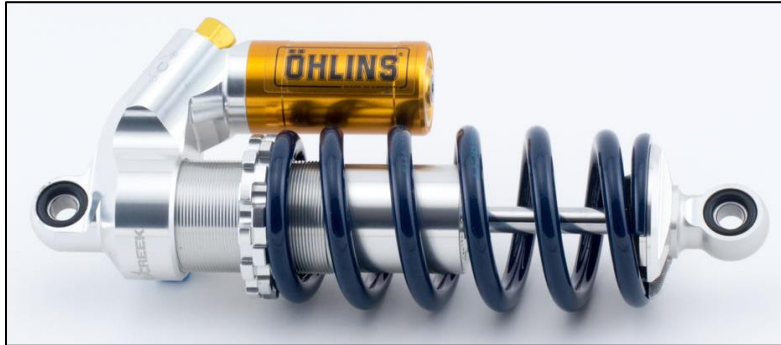


Nota: Brazos de suspensión con configuración Pull-Rod y Push-Rod (Santos, s.f.)

- **Resortes o muelles:** Los resortes son considerados componentes elásticos que posibilitan un movimiento relativo entre las ruedas y el chasis, donde este movimiento varía según su disposición (Auquilla Ocampo & Torres Romero, 2016).
- **Amortiguadores:** Estos transforman la energía cinética que se da en los muelles en resistencia dinámica y calor, para conseguir que las oscilaciones se anulen lo más rápido (Auquilla & Torres, 2016).

Figura 4

Muelles y Amortiguador de una suspensión



Nota: Amortiguador y resorte Öhlins usado en el Vehículo Formula SAE (Öhlins, s.f.)

- **Rótulas:** Conocidas como Ball-Joints, se usan en las uniones móviles del sistema de suspensión, que serían los brazos de suspensión y rockers, estas permiten el movimiento controlado en toda dirección, hacia arriba, abajo y giro de las ruedas del vehículo cuando la suspensión está en movimiento, ya que tienen la capacidad de auto alinearse. (Auquilla & Torres, 2016)

Figura 5

Rótulas



Nota: Rótulas usadas en vehículos tipo Formula SAE (Staff, 2021)

- **Rockers:** También son llamados balancines, su función principal es dirigir y gestionar las fuerzas generadas por el contacto de la rueda con la superficie de la pista hacia el amortiguador. Estos balancines suelen tener una forma triangular o en L, y están equipados con tres orificios que sirven como puntos de anclaje, que son para la conexión del pivote, otro para la unión con la barra de empuje o la barra de tracción, y el último se emplea para la unión con el propio amortiguador. (Auquilla & Torres, 2016)

Figura 6

Rockers



Nota: Rockers usada en el vehículo tipo Formula SAE

- **Neumáticos:** Los neumáticos tienen la tarea de absorber las primeras vibraciones causadas por las imperfecciones del terreno, con el objetivo de asegurar una adherencia constante a la superficie. Estos trabajan en conjunto con el sistema resorte-amortiguador, para transmitir todas las fuerzas y momentos que se dan cuando el vehículo está en movimiento. (Caraguay & Caraguay, 2015)

Figura 7

Neumáticos usados en vehículos Formula SAE



Nota: Neumáticos Hoosier usados en vehículos tipo Formula SAE (Hoosier, s.f.)

- **Aros:** Es el componente en que el neumático se instala para mantener su forma, estos deben tener dimensiones y pesos precisos para asegurar un rendimiento óptimo del vehículo ya que también proporciona la estabilidad necesaria al mismo.

Figura 8

Aros para vehículos Formula SAE

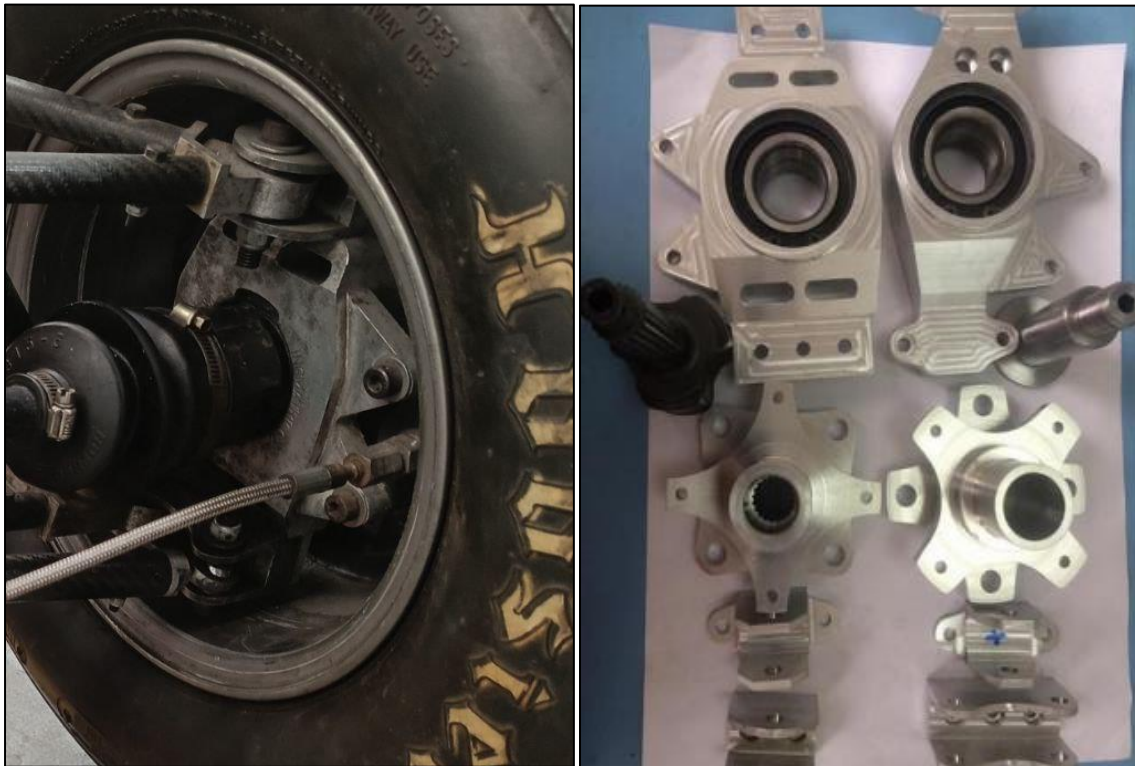


Nota: Aro Braid Sturace FSAE usados en el vehículo Formula SAE (BRAID USA, s.f.)

- **Manguetas:** Se la conoce como portamangueta o portamaza, que actúa de punto de apoyo o sujeción de la rueda para facilitar su rotación de manera fluida, a esto se le suma la tarea de transmitir las fuerzas y momentos al sistema de suspensión, ya que se conecta al eje de tracción, los brazos de suspensión y barra de dirección. (Renting Finders, s.f.)

Figura 9

Manguetas para vehículos Formula SAE



Nota: Manguetas del vehículo Formula SAE Eléctrico (Medina & Morocho, 2017)

- **Consideraciones estructurales:** Al momento de que un automóvil se está movilizandoo a velocidades altas y realiza giros bruscos al tomar curvas pronunciadas o muy cerradas, el sistema de suspensión trabaja con el fin de conservar la estabilidad y capacidad de maniobra del vehículo; evitando así la pérdida del control o que vuelque. Esto se logra usando componentes de suspensión hechos de materiales que posean propiedades que permitan a los componentes resistir las vibraciones, torsiones y la flexión sin romperse ni deformarse.

4.2.1. Reglamento Respecto a los Sistemas de Suspensión para Fórmula SAE

Una de las principales condiciones para el diseño de un sistema de suspensión que sea aceptado para los eventos de fórmula SAE se encuentra en el reglamento. Se establece que “el vehículo debe tener un sistema de suspensión completamente operativo con amortiguadores, delanteros y traseros, con un recorrido de rueda mínimo utilizable de 50 mm, con un conductor sentado” (SAE International, 2022).

“Los oficiales del evento pueden descalificar vehículos que no representen un intento serio de un sistema de suspensión operativo, o que demuestren un manejo inapropiado para un circuito de autocross” (SAE International, 2022).

Requisitos Críticos de Sujetadores

El reglamento tiene un apartado que detalla las normativas requeridas para los sujetadores en el vehículo, incluyendo los de la suspensión. Aquí se indica que cualquier sujetador crítico debe cumplir, como mínimo, uno de los siguientes:

- a. SAE Grado 5
- b. Grado métrico 8.8
- c. Especificaciones AN/MS
- d. Equivalente o mejor que el anterior, según lo aprobado por una Cuestión de Reglas o en una Inspección Técnica

También, está designado que todos los sujetadores críticos roscados deben ser uno de los siguientes:

- Cabeza hexagonal
- Accionamiento empotrado hexagonal (tornillos de cabeza hueca o tornillos/pernos Allen)
(SAE International, 2022)

Así mismo, están indicadas otras características necesarias, como que los sujetadores críticos se deben asegurar de forma que no se aflojen accidentalmente aplicando mecanismos de bloqueo positivo, o que al menos dos roscas completas deben sobresalir de cualquier contratuerca (SAE International, 2022).

4.3. Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva

Los sistemas de suspensión activa y semiactiva buscan de mejorar las características de los sistemas de suspensión pasiva. La suspensión pasiva posee sus parámetros predeterminados y no regulables automáticamente, por lo que se caracterizan por almacenar la energía directamente en los resortes, la cual es disipada mediante amortiguadores. Los parámetros de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento pueden ser calibrados, pero se mantendrán fijos tras dicha calibración, presentando problemas de confort o maniobrabilidad. Por tanto, para solucionar estos problemas, se conciben los sistemas de suspensión activa o semiactiva. (Hurel Ezeta, Mandow, & García Cerezo, 2013).

4.3.1. *Sistemas de Suspensión Activa*

“Una suspensión activa almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionar es regulado a través de sensores y controladores.” (Hurel Ezeta, Mandow, & García Cerezo, 2013) Estos sistemas permiten combinar el confort, control y maniobrabilidad mediante adicionar actuadores que permitan manipular parámetros como la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento del sistema de suspensión, en función de señales registradas por diversos sensores, y controlados por un sistema electrónico (Hurel Ezeta, Mandow, & García Cerezo, 2013) (Alvarado Palomino, 2020).

Existen diversas formas de realizar un control activo de un sistema de suspensión. Se puede ir por el camino de integrar un actuador hidráulico para crear fuerzas para compensar el balanceo y cabeceo del auto (Alvarado Palomino, 2020). Así también, es posible integrar sistemas electromagnéticos para un control activo, como lo ha desarrollado la marca Bose (Otero, 2018), aunque puedan estos últimos también considerarse sistemas semiactivos.

4.3.2. *Sistemas de Suspensión Semiactiva*

“La suspensión semiactiva se caracteriza por tener amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento es modificado por un control externo” (Hurel Ezeta, Mandow, & García Cerezo, 2013).

Existen diferentes sistemas de suspensión que son considerados como sistemas semiactivos:

- Los amortiguadores magnetorreológicos, cuya respuesta varía con el campo magnético aplicado.
- Los amortiguadores electrorreológicos, de respuesta variable con el campo eléctrico aplicado.
- Los amortiguadores neumáticos, usados generalmente en autobuses y camiones.
- Los amortiguadores de fricción seca, altamente no lineales y basados en la fricción entre superficies en contacto.

Estos sistemas al momento de realizar su control se comportan de manera discontinua, por lo que pueden causar ruido en su aplicación, aunque siendo generalmente aplicados en vehículos ligeros (Hurel Ezeta, Mandow, & García Cerezo, 2013).

4.4. Estado del Arte Internacional, Regional, Nacional y Local

En la actualidad, muchos países realizan estudios y diseños relacionados al análisis del comportamiento físico de los sistemas de amortiguamiento aplicados a cierto tipo de vehículos. Además, estos estudios están disponibles y presentes desde varios años atrás.

Por ejemplo, en España, la Universidad de Cantabria, con estudiantes como Joaquín Maza Rey, ha aportado con el diseño cinemático y dinámico del sistema de suspensión para un vehículo de competición de fórmula Student, en donde se analizan los tipos de configuraciones de los sistemas de suspensión y sus geometrías, el análisis de distintas condiciones, la dinámica del vehículo, tomando en cuenta los requerimientos de la competición para el planteamiento del diseño y su posterior simulación en Softwares como MSC ADAMS (Maza Rey, 2016).

También, existen proyectos como, por ejemplo, de diseño y fabricación de suspensiones aplicadas a la fórmula Student, validando diseños cinemáticos para este proyecto, realizado en la Universidad Politécnica de Valencia, buscando realizar el diseño de la geometría de la suspensión adecuada para vehículos de la fórmula Student, dado que es crucial en el comportamiento dinámico del prototipo. Es por ello por lo que su optimización, según sus autores, requiere de un estudio

exhaustivo de la cinemática de los puntos que conforman la suspensión (García García & García Manrique, 2019).

En Alemania, un estudio sobre suspensiones mecatrónicas semiactivas y activas de vehículos, y describe el concepto de suspensiones que integran componentes comprende electroimanes y válvulas, así como sensores para desviación, presión y aceleración. Dicha integración resulta mediante el procesamiento de la información permite una suspensión y un diagnóstico de fallas que se adaptan a los parámetros (Fischer & Isermann, 2003).

Sin embargo, el campo de la investigación realizada a nivel internacional conlleva encontrar mejores referencias con información más relevante para el presente estudio, como lo realizado en Chicago, US, con el Instituto de Ingeniero Eléctricos y Electrónicos (IEEE), quienes han desarrollado un modelo no lineal integral de un sistema de suspensión de vehículos que se puede utilizar para estudiar algoritmos de control para sistemas de suspensión activa. Este modelo es el resultado del análisis de la cinemática y la cinética de los sistemas de suspensión activa, tomando como referencia modelos preexistentes (Nonlinear modeling of vehicle suspension system, 2000).

Además, existen proyectos que han desarrollado, como en el siguiente caso realizado en China, la optimización multiobjetivo del sistema de suspensión activa en vehículos eléctricos con In-Wheel-Motor frente a los efectos negativos del acoplamiento electromecánico, donde uno de los objetivos fue el planteamiento de un método de control correspondiente basado en el sistema de suspensión activa y se lleva a cabo el proceso de optimización (Zhe Li, Ling Zheng, Yue Ren, Yinong Li, & Zhoubing Xiong, 2019).

A nivel regional, existen varios estudios relacionados con la temática. Uno de estos estudios, fue realizado en Bogotá, Colombia, en donde se analizó el comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla, obteniendo un modelo teórico, programado con el software Matlab, que permite el análisis dinámico de una suspensión independiente de doble horquilla, en un banco de pruebas experimental de la Universidad Nacional de Colombia (Arzola de la Peña & Castro Torres, 2019).

A nivel nacional, se han realizado una menor cantidad de estudios al respecto, pero no prescindibles para ser tomados en cuenta. Por ejemplo, desde la Universidad Particular

Internacional SEK, Quito, se han planteado proyectos de esta índole, uno de ellos el siguiente, que revisan las características de modelado y optimización para el diseño del sistema y de suspensión McPherson, donde el objetivo es caracterizar los procesos de diseño en los contextos de aplicación de software de simulación, resaltando las técnicas predictivas de multicuerpos, elementos finitos y modelado matemático. para la identificación de sus características de trabajo al aplicarlo en la suspensión (Vega, Llanes Cedeño, Molina, & Rocha Hoyos, 2018).

También, la Escuela Politécnica Superior de Chimborazo ESPOCH plantea un sistema de suspensión activa, utilizando electroimanes que sirvan de apoyo a la suspensión de un vehículo a escala, utilizando el modelo matemático de la suspensión con el actuador electromagnético, con base en los principios teóricos de electromagnetismo aplicado en sus componentes, donde se comprobó la viabilidad del proyecto para futuras investigaciones y un prototipo para el avance de suspensiones tecnológicas en el campo automotriz (RAMOS OCAÑA, 2019).

Finalmente, analizando los trabajos realizados a nivel local en la ciudad de Cuenca, se puede encontrar que se ha podido realizar el estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico para la fórmula Student en la Universidad Politécnica Salesiana, con el objetivo de promover la competitividad que genera la Formula Student ha desencadenado en una serie de estudios y avances tecnológicos con el fin de mejorar cada vez más el rendimiento de los monoplazas para que se desenvuelvan con éxito ante las exigencias de la competencia (Arévalo, Medina, & Valladolid, 2018).

4.5. Propuestas Electromagnéticas

4.5.1. Propuesta de Suspensión Electromagnética de EEE 351 Term Project

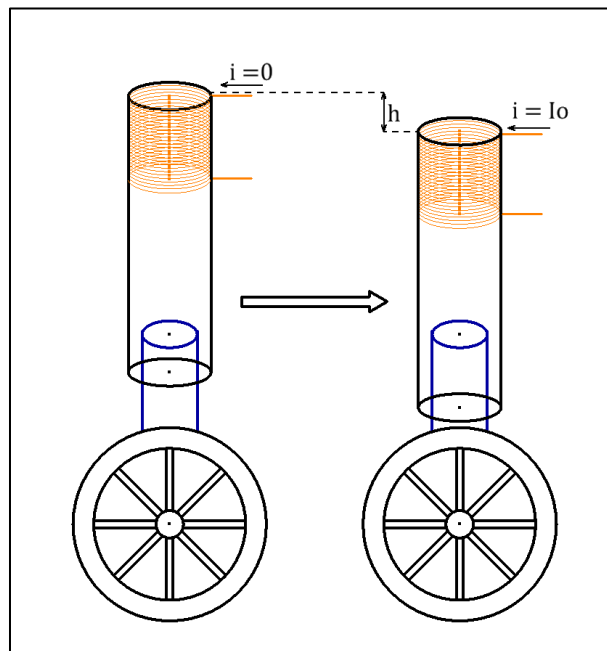
El 16 de febrero del año 2020, en la Universidad de Bilkent, un grupo de estudiantes desarrolló un proyecto trimestral con el objetivo de construir un prototipo de suspensión electromagnética aplicable a distintos sistemas, desde trenes MAGLEV hasta lanzadores de naves espaciales.

Este prototipo funciona mediante el uso de imanes repulsivos como elemento de amortiguación, junto con un ajuste de altura predeterminado, dicho en sus palabras (Alikaşifoğlu, Electromagnetic Suspension System - Bilkent University EEE 351 Term Project [Archivo de Vídeo], 2020).

Este sistema consigue producir el efecto de amortiguación al alterar constantemente la resistencia de un campo magnético a través de un lazo cerrado de realimentación en su sistema de control, como se aprecia en la figura 1 (Alikaşifoğlu, Electromagnetic Suspension System - Bilkent University EEE 351 Term Project [Archivo de Vídeo], 2020) (Alikaşifoğlu, Yaşar Yavuz, & Üçüncü, Bilkent University - Fall 2019 - EEE 351 Best Project, 2019).

Figura 10

Esquema del Sistema de Suspensión Electromagnética



Nota: La suspensión utiliza las fuerzas magnéticas como reemplazo de una amortiguación hidráulica (Alikaşifoğlu, Electromagnetic Suspension System - Bilkent University EEE 351 Term Project [Archivo de Vídeo], 2020) (Alikaşifoğlu, Yaşar Yavuz, & Üçüncü, Bilkent University - Fall 2019 - EEE 351 Best Project, 2019).

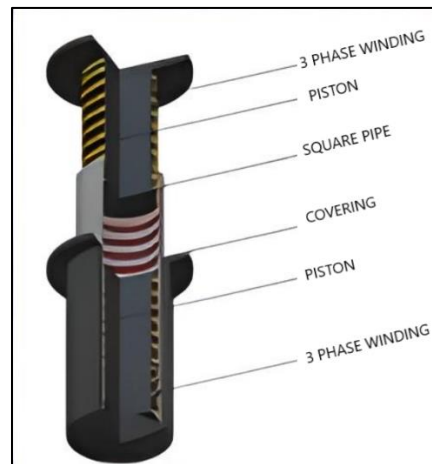
4.5.2. Propuesta de Amortiguador MONOSHOCK

Este diseño de amortiguador, propuesto por estudiantes B-TECH del departamento de ingeniería Mecánica de la KMEA Engineering College, se basa en el uso de la propiedad electromagnética de la repulsión de mismos polos entre sí, de dos electroimanes. Funciona de manera que dichos electroimanes se ensamblan uno sobre el otro, como se enseña en la figura 2, dependiendo así su

capacidad de amortiguación de la fuerza que ejerzan dichos imanes con su respectivo sistema de control (Hareesh, Fahad, Dhiraj , Govind, & Pradeep, 2020).

Figura 11

Modelo Propuesto de Amortiguador MONOSHOCK



Nota: Propuesta de diseño de amortiguador electromagnético MONOSHOCK, con electroimanes trifásicos (Hareesh, Fahad, Dhiraj , Govind, & Pradeep, 2020).

Los electroimanes dimensionados para esta aplicación, como se observa en la figura 2 anterior, manejan un bobinado trifásico, el cual es importante a la hora de realizar el control de estos imanes. La tecnología estaría asimilada a las aplicaciones de levitación magnética MAGLEV.

4.6. Mecanismos Electromagnéticos Similares

4.6.1. Motor Lineal Magnético Reciprocante

Este motor permite realizar un movimiento lineal por parte del imán A, como se indica en la figura 3. El mecanismo se encuentra armado dentro de una jeringa colocada de forma vertical, permitiendo que la fuerza de la gravedad regrese al imán A nuevamente a su posición inicial.

El imán activa el interruptor magnético, permitiendo pasar la corriente a través de la bobina B, la cual se convierte en un electroimán, el cual, si la polaridad es correcta, atraerá al imán hacia esta.

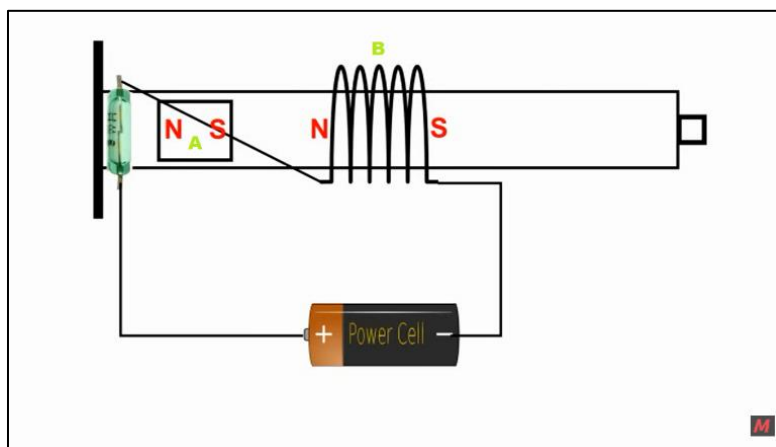
Al alejarse el imán del interruptor magnético, este último se abre y el paso de la corriente por la bobina B se corta, apagando así el electroimán. Pero el imán A no se detendrá al instante, debido a

la inercia que lleva, hasta detenerse por la fuerza de la gravedad para posteriormente regresar a su posición inicial.

De vuelta en su posición inicial, el imán vuelve a activar el interruptor magnético, permitiendo nuevamente el paso de la corriente hacia la bobina, para que el ciclo vuelva a empezar (Rodríguez-Achach, 2015).

Figura 12

Circuito de Funcionamiento de un Motor Lineal Magnético Reciprocante



Nota: El circuito ejemplificado en la figura muestra el motor construido con una jeringa (Rodríguez-Achach, 2015).

4.6.2. Tecnología MAGLEV

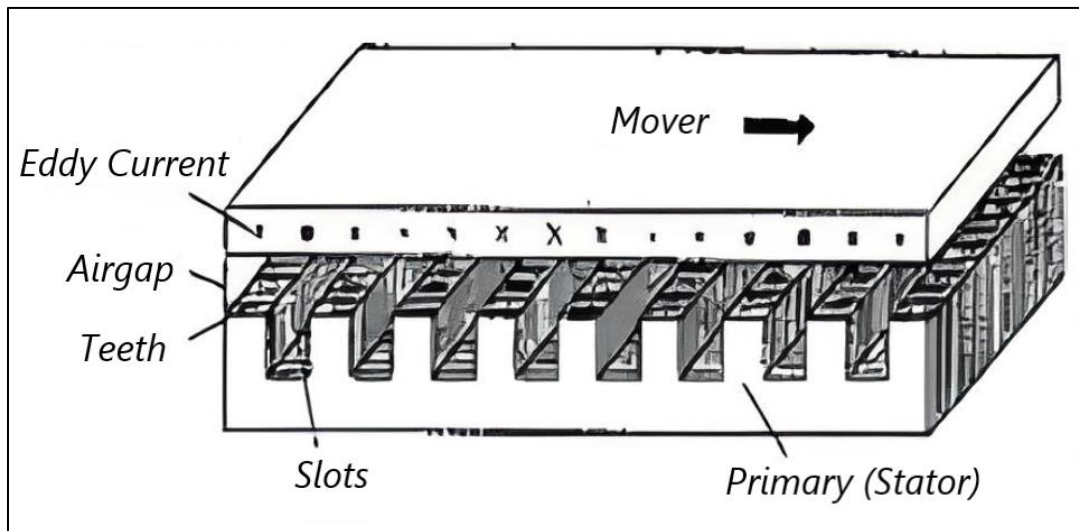
MAGLEV, término derivado de levitación magnética, es una tecnología aplicada ampliamente en sistemas de transporte de levitación. Esta tecnología tiene como principio la suspensión de un objeto en el aire utilizando únicamente campos magnéticos como soporte. “Los campos se utilizan para revertir o contrarrestar el tirón gravitacional y cualquier otra aceleración contraria” (Hamid Yaghoubi, 2013).

Existen distintos tipos de tecnología MAGLEV, y los principios de su propulsión, la fuerza que permite desplazarse en un eje horizontal, tienen como uno de sus principios el que se rige en los motores de inducción lineales. Estos funcionan de forma que “Los campos magnéticos variantes espacio-tiempo son generados por la parte primaria a través del espacio aéreo e inducen la fuerza

electromotriz en la parte secundaria, una hoja-conductor” (Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, & Ju Lee, 2006).

Figura 13

Motor de Inducción Lineal



Nota: Un motor de inducción lineal tipo LP, que se permite el movimiento utilizando la fuerza de empuje conocida como Lorentz (Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, & Ju Lee, 2006).

5. Marco Metodológico

5.1. Fuerza del Campo Magnético de un Solenoide

Un solenoide es un hilo metálico, generalmente cobre, cubierto y enrollado en forma de espiral, ya sea sobre un cilindro o en vacío. Es llamado también como bobina, y al pasar una corriente eléctrica a través de éste, genera un campo magnético (helloauto, s.f.). Dicho campo magnético posee su respectiva densidad de flujo magnético, pudiendo ser calculada mediante la ecuación 1, donde B es la densidad del flujo magnético en teslas, μ_0 es la permeabilidad magnética del material dentro del solenoide o bobina, N es el número de espiras de la bobina, I es la intensidad de corriente que pasa por el solenoide y L es la longitud del solenoide (Vidaurre Garayo, 2018)

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (1)$$

Mediante este dato, se puede también calcular la fuerza magnética aplicada por un electroimán, mediante la ecuación 2, donde F es la fuerza portante de un electroimán, y A es la superficie de las caras de los polos del electroimán (Zapata Sánchez, 2011).

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (2)$$

Mediante estas dos ecuaciones principales, se puede encontrar la forma de expresarlas como la función de transferencia que rija el comportamiento de las bobinas que controlarán a los electroimanes del sistema electromagnético de la propuesta de solución, siendo a considerar como las variables requeridas de manejar a la Fuerza y a la Corriente. (Zapata Sánchez, 2011)

De cierta forma, se pueden combinar los conceptos que rigen a las ecuaciones 1 y 2 para así obtener la ecuación 3, la cual también toma en cuenta la distancia x que existe desde el polo del electroimán hacia el elemento que busca atraer (Zapata Sánchez, 2011). Dicha distancia, aplicada al concepto del amortiguador del sistema de suspensión, sería la distancia del recorrido que va a realizar el amortiguador gracias al sistema de control.

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 AN^2 \left(\frac{I}{x}\right)^2 \quad (3)$$

5.2. Corriente Admisible de los Cables según su Sección

El cable del bobinado del solenoide para un electroimán debe soportar una determinada corriente, y a su vez, las dimensiones del cable determinarán la cantidad de vueltas que puede tener un electroimán para que tenga unas dimensiones determinadas.

Según la norma UNE 60364-5-52 de 2014, la corriente admisible de los cables es la siguiente:

Tabla 1*Corriente Admisible de los Cables de Cobre*

Sección (mm ²)	Sin ventilación (A)	Con ventilación (A)
0.35	1	1
0.5	3	3
0.75	8	10
1	10.5	12
1.5	13	15.5
2.5	18	21
4	24	28
6	31	36
10	42	50
16	56	68
25	73	89
35	89	111
50	108	134
70	136	171
95	164	207
120	188	239

Nota: La tabla describe la cantidad de corriente que pueden admitir los cables de cobre, con y sin ventilación, según su sección, acorde a la norma UNE 60364-5-52 de 2014 (UNE, 2014)

5.3. Materiales de Alta Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética relativa de un material es un factor necesario para calcular la fuerza de un campo magnético de un solenoide. Como se puede observar en las ecuaciones 1 y 3, la permeabilidad magnética del material μ_0 es proporcional a la fuerza y cantidad de campo magnético del solenoide. En el vacío, $\mu_0 = 4\pi(10)^{-7}$, pero al incluir cualquier material dentro del solenoide, la forma de determinar la permeabilidad absoluta es multiplicando la permeabilidad relativa del material μ_r por la permeabilidad del vacío, como se muestra en la ecuación 4:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (4)$$

Existen diferentes materiales, elementos y aleaciones que poseen una alta permeabilidad magnética relativa, fundamental para mejorar el comportamiento de un electroimán. Los materiales con mayor permeabilidad magnética generalmente son aleaciones que poseen componentes como el Níquel y el Molibdeno aleados con Hierro. Estas aleaciones pueden ser:

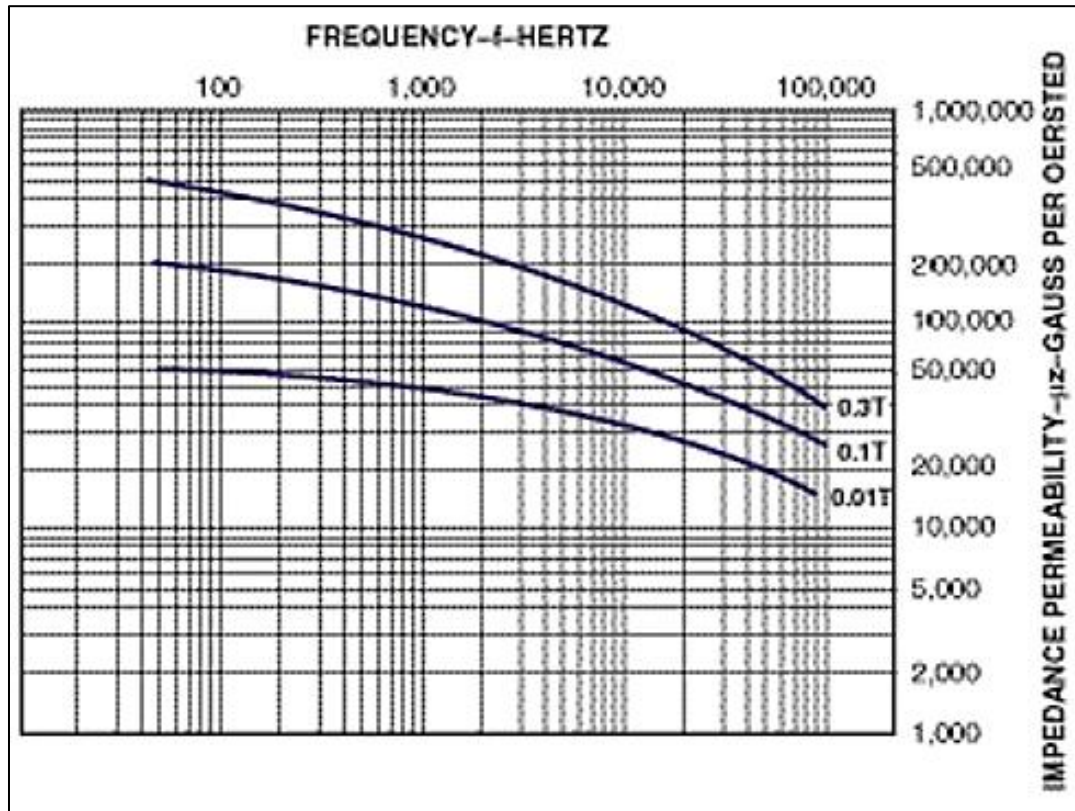
- Permalloy 78 (21% Fe, 78.5% Ni, 0.3% Mn): Permeabilidad relativa de 100000 B (GAUSS)
- Permalloy 4-79 (16.7% Fe, 79% Ni, 4% Mo, 0.3% Mn): Permeabilidad relativa de 100000 B
- Mu metal (18% Fe, 75% Ni, 2% Mo, 5% Cu): Permeabilidad relativa de 100.00 B
- Supermalloy (20% Fe, 75% Ni, 5% Mo): Permeabilidad relativa de 800000 B

El Níquel es el elemento que mayor concentración presenta en este tipo de aleaciones de alta permeabilidad magnética, siendo la Supermalloy la que tiene la mayor permeabilidad (MATBASE, 2012).

Sin embargo, existe un material más llamado METGLAS, una aleación basada en cobalto que consigue alcanzar una permeabilidad magnética de 1000000 B sumada a una magnetostricción alta (Metglas, 2012). Este nivel de permeabilidad se alcanza al aplicarle cierto nivel de frecuencia, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 14

Curvas de Permeabilidad de Impedancia Típicas



Nota: La figura muestra las Curvas de permeabilidad de impedancia típicas en recocido sin campo del METGLAS 2714A (Metglas, 2012).

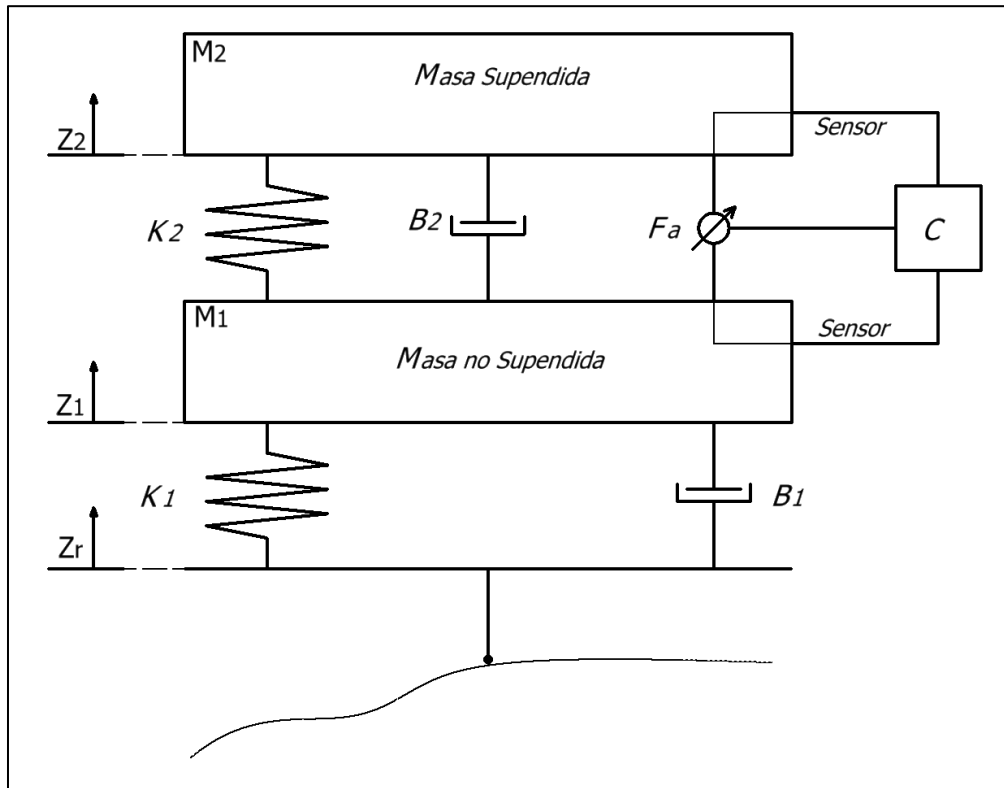
La principal desventaja del METGLAS es su dificultad y alto costo de adquisición, siendo un material fabricado por una limitada cantidad de empresas a nivel mundial.

5.4. Modelo Matemático de Suspensión Activa

El modelo matemático de una suspensión es un elemento fundamental para el análisis y diseño de sistemas de suspensión activa. Se basa en un sistema ampliamente analizado de doble masa-resorte-amortiguador, como se muestra en la siguiente figura, utilizando las variables de Z_r como el desplazamiento del camino, Z_1 como el desplazamiento el desplazamiento del neumático, Z_2 como el desplazamiento del chasis, y para el caso de un sistema activo se incluye la variable F_a como la fuerza ejercida por el actuador, incluido como se muestra en la figura:

Figura 15

Modelado de un Sistema de Suspensión Activa de un Vehículo

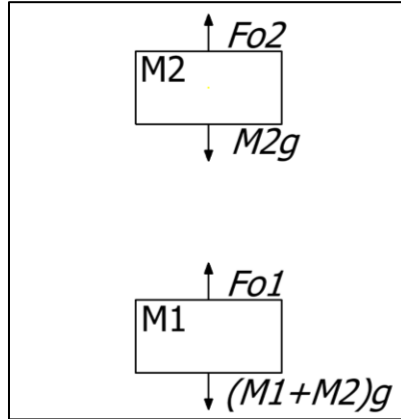


Nota: En la figura se muestra el gráfico que esquematiza las partes principales de un sistema de suspensión activa, analizado para una de las cuatro ruedas de un vehículo (Hurel, Terán, Flores, Peralta, & Flores, 2017).

Para realizar un análisis de las fuerzas que actúan sobre las masas, es necesario realizar diagramas de cuerpo libre. En primer lugar, se considera al sistema en reposo, haciendo que el chasis esté sometido a una fuerza proporcional a su masa, designada como $M2$ mientras que la fuerza de la masa no suspendida es proporcional al conjunto de masas rueda-chasis, $M1$ y $M2$ respectivamente (GUERRERO ANGULO, 2015).

Figura 16

DCL del Sistema en Reposo

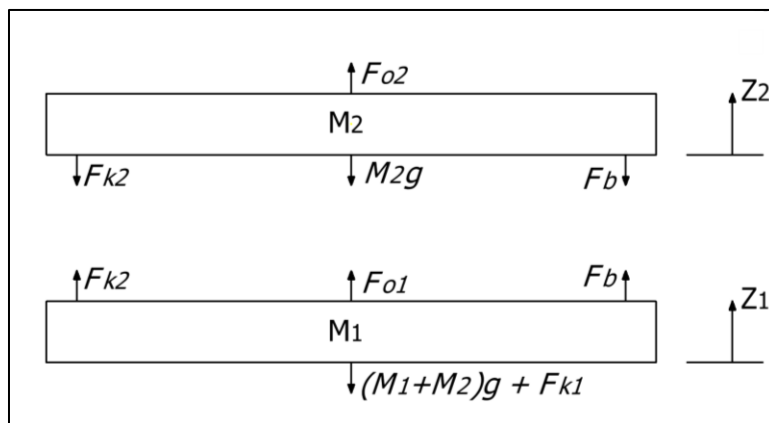


Nota: El diagrama muestra la forma en que actúan las fuerzas del sistema sobre las masas en reposo (GUERRERO ANGULO, 2015).

Al momento de ingresar una variación en el terreno, el equilibrio del sistema se rompe, y las fuerzas que actúan, cambian para cada una de las masas, pudiendo describirse mediante otro diagrama de cuerpo libre, como el de la siguiente figura:

Figura 17

DCL del Sistema con Variación del Terreno

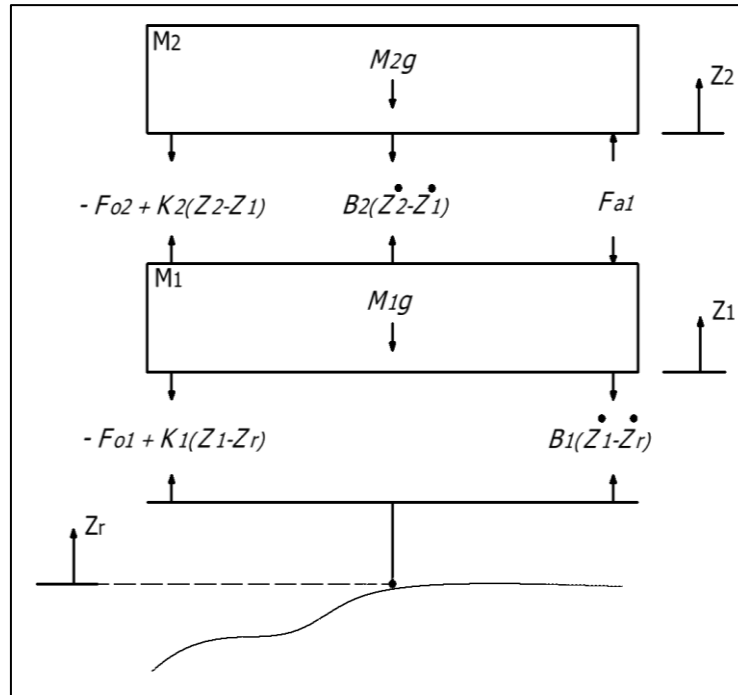


Nota: El diagrama muestra la forma en la que actúan las fuerzas del sistema sobre las masas cuando se ingresa una variación en el terreno, rompiendo el equilibrio (GUERRERO ANGULO, 2015).

Sin embargo, a este sistema se le debe incluir la acción del actuador electromagnético, siendo esta la fuerza F_a , que se efectúa, para este caso, en la misma dirección que el muelle del sistema de suspensión, contrario a la acción del neumático, resultando en lo siguiente:

Figura 18

DCL de la Suspensión Activa



Nota: En este diagrama se toma en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre el sistema de suspensión activa.

Con lo anterior, se pueden obtener las siguientes ecuaciones que describen el movimiento, en base a la segunda ley de Newton, de las masas:

$$M_2 \ddot{Z}_2 = -F_a - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2(Z_2 - Z_1) \quad (5)$$

$$M_1 \ddot{Z}_1 = F_a + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2(Z_2 - Z_1) - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1(Z_1 - Z_r) \quad (6)$$

Juntando y pasando las ecuaciones al dominio de la frecuencia, se puede obtener la función de transferencia, descrita en la siguiente ecuación, la cual permitirá realizar el control del sistema posteriormente.

$$\frac{Z_2}{Z_r} = \frac{(B_1s + K_1)(M_2s^2 + B_2s + K_2)}{M_1M_2s^4 + Cs^3 + Ds^2 + (B_1K_2 + B_2K_1)s + K_1K_2} \quad (7)$$

La ecuación 7 posee los términos C y D que corresponden a conjuntos de valores constantes: $C = M_2B_1 + M_2B_2 + M_1B_2$ y $D = K_1M_2 + K_2M_2 + B_1B_2 + M_1K_2$.

También, la fuerza F_a no se ve reflejada en la ecuación por ahora, ya que, en un principio, se la considerará como una constante, hasta determinar la forma de efectuarse el accionar del actuador electromagnético.

5.5. Requerimientos de Carga de la Suspensión

El sistema de suspensión se ve afectada por diversas fuerzas verticales y horizontales, que se deben a diversas condiciones durante el manejo, como una condición de inclinación, o un obstáculo en la pista. De este conjunto de fuerzas, las que resultan poseer mayores valores, son las fuerzas verticales. Los resultados de los totales de estas fuerzas están descritos en la siguiente tabla (Auquilla Ocampo & Torres Romero, 2016):

Tabla 2

Fuerzas Verticales

Fuerzas Verticales	[N]
Transferencia de masa longitudinal	1138.05
Transferencia de masa lateral	1458.98
Fuerzas al pasar por un obstáculo	5170.95
Fuerza Total en la Rueda	7767.98

Nota: La tabla muestra el total de la fuerza que debe soportar la suspensión ante las diferentes cargas que pueden aplicársele durante una carrera (Auquilla Ocampo & Torres Romero, 2016).

5.6. Dimensiones del Actuador

Dado que se ha tomado como referencia al vehículo eléctrico monoplace tipo fórmula SAE de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, se sabe que éste tiene instalado un amortiguador TTx25 MKII de la marca ÖHLINS, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 19

Amortiguador ÖHLINS Instalado en el Vehículo de Referencia

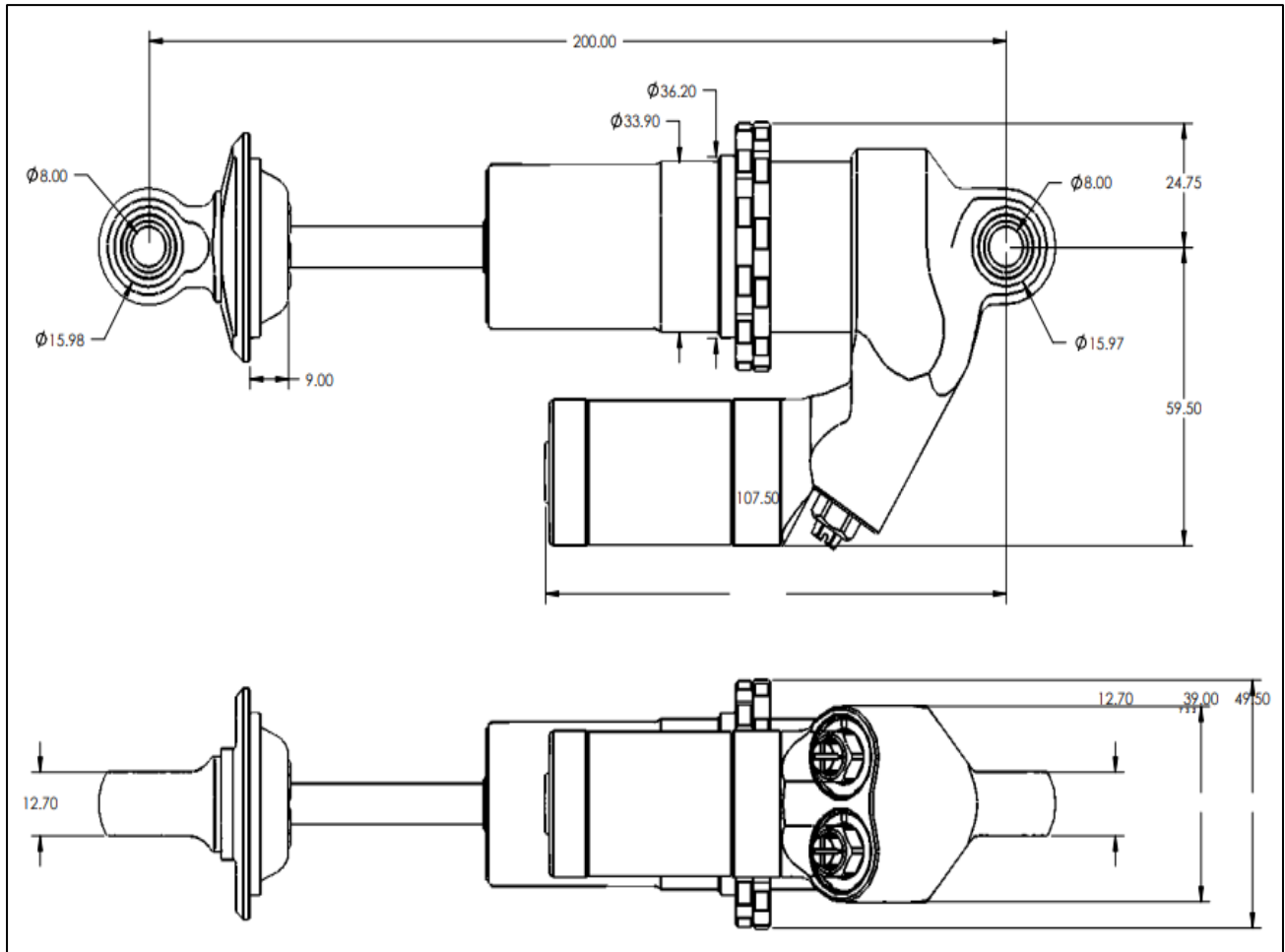


Nota: La imagen muestra el amortiguador TTx25 MKII de la marca ÖHLINS instalado en el vehículo para sus cuatro ruedas.

Con esta referencia, se requiere delimitar las dimensiones del actuador a las especificaciones que poseen los amortiguadores TTx25 MKII de la marca ÖHLINS. Esto se puede observar en el siguiente plano.

Figura 20

Plano con las Dimensiones Exteriores de un Amortiguador TTx25 MKII de la marca ÖHLINS



Nota: Las dimensiones del amortiguador están definidas para todos los modelos de esta serie, desde los que poseen 200 mm de longitud y 57 mm de recorrido, como es el caso mostrado en la figura, como hasta el modelo de 267 mm de longitud y 90 mm de recorrido (ÖHLINS, 2015).

5.7. Cálculo de Electroimanes

Los datos anteriores, tanto de fuerza como de longitudes y desplazamientos, permitirán calcular y definir, de igual forma, las dimensiones de los electroimanes para el actuador electromagnético que permita realizar el control del sistema. Para esto, se describe la siguiente tabla:

Tabla 3

Tabla de Requerimientos para los Electroimanes

Requerimiento	Valor
Longitud	< 100 mm
Fuerza Mínima	7767.98 N

Nota: En la tabla se muestran los valores mínimos que deben cumplir los electroimanes calculados.

Una condición importante es la de otorgar un factor de seguridad a la fuerza, para aumentar la seguridad y robustez de este componente a la hora de implementarse. Para esto, se ha utilizado un factor $F_S = 1.4$ haciendo que la fuerza que se busca sea de 10875.172 N.

Para estos requerimientos, se opta por utilizar los siguientes materiales: cable de 0.75 mm² de sección, aproximadamente 1 mm de diámetro, y un núcleo de Supermalloy, dado que es el que otorga una mayor permeabilidad de campo magnético, a la vez que no es complicado de conseguir.

Se utilizan entonces las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 para crear un programa en MATLAB para calcular los valores. Considerando que la corriente es la variable que se buscará manipular en el control, para el primer cálculo se la considerará como constante y se le asignará su valor máximo.

Figura 21

Programa en MATLAB para Cálculo de Electroimanes

```
16 %% Componentes del Actuador
17 %---- Permeabilidad
18 - u0 = 4*pi*((10)^(-7)); % permeabilidad magnética en el vacío
19 - ur = 800000; % permeabilidad magnética relativa del material interior de la bobina % (Hierro = 5000) (Superpermalloy = 800000)
20 - u = u0*ur; % permeabilidad magnética absoluta
21
22 %---- Bobinado
23 - dc = 0.001; % diámetro del cable en metros
24 - L = 0.05; % longitud de la bobina en metros
25 %-- Electroimán
26 - nn = 10; % número de pasadas electroimán
27 - N = (L/dc)*nn; % número de espiras electroimán
28
29 %---- Densidad del Campo Magnético
30 - I = 1.7; % corriente en amperios
31 - B = (u*I*N)/L; % densidad del campo magnético electroimán
32
33 %---- Área del la superficie del polo del electroimán
34 - d = 0.01; % diámetro del polo del electroimán en metros
35 - r = d/2; % radio del polo del electroimán en metros
36 - A = pi*(r)^2; % área de la superficie del polo del electroimán en metros cuadrados
37
38 %---- Fuerza Portante del Electroimán
39 - Fi = ((B^2)*(A))/(2*u); % Fuerza del electroimán en Newtons
40 - Fik = Fi/1000 % Fuerza en KiloNewtons
41
42 - KE = (1/2)*u*A*(N^2);
43
44 - xd = L; % Distancia del polo del electroimán hacia el elemento atraído en metros
45 - F2 = (1/2)*u*A*(N^2)*((I/xd)^2); % Fuerza del electroimán en Newtons
46 - F2k = F2/1000 % Fuerza del electroimán en KiloNewtons
```

Nota: La figura muestra todas las variables relevantes para el cálculo ingresadas en MATLAB.

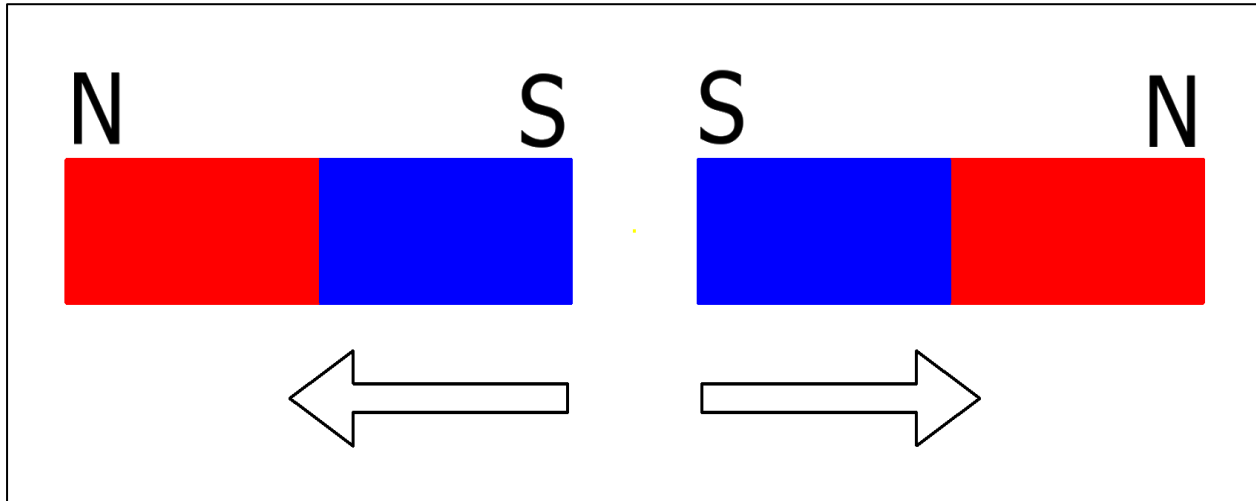
Cuando se corre el programa, se pueden variar los parámetros de la tabla 4 en el apartado de resultados para los electroimanes. Esto permite determinar la mejor configuración para generar la fuerza requerida.

5.8. Explicación del Funcionamiento del Concepto del Actuador

El actuador consta de dos electroimanes. Cada uno de estos ellos se encuentra orientado de manera que los polos norte o sur de ambos queden enfrentados, provocando que se repelan entre sí. Este concepto se puede observar en la siguiente figura:

Figura 22

Representación de la Repulsión de Imanes



Nota: La figura muestra la representación de los imanes al juntarse, provocando su repulsión.

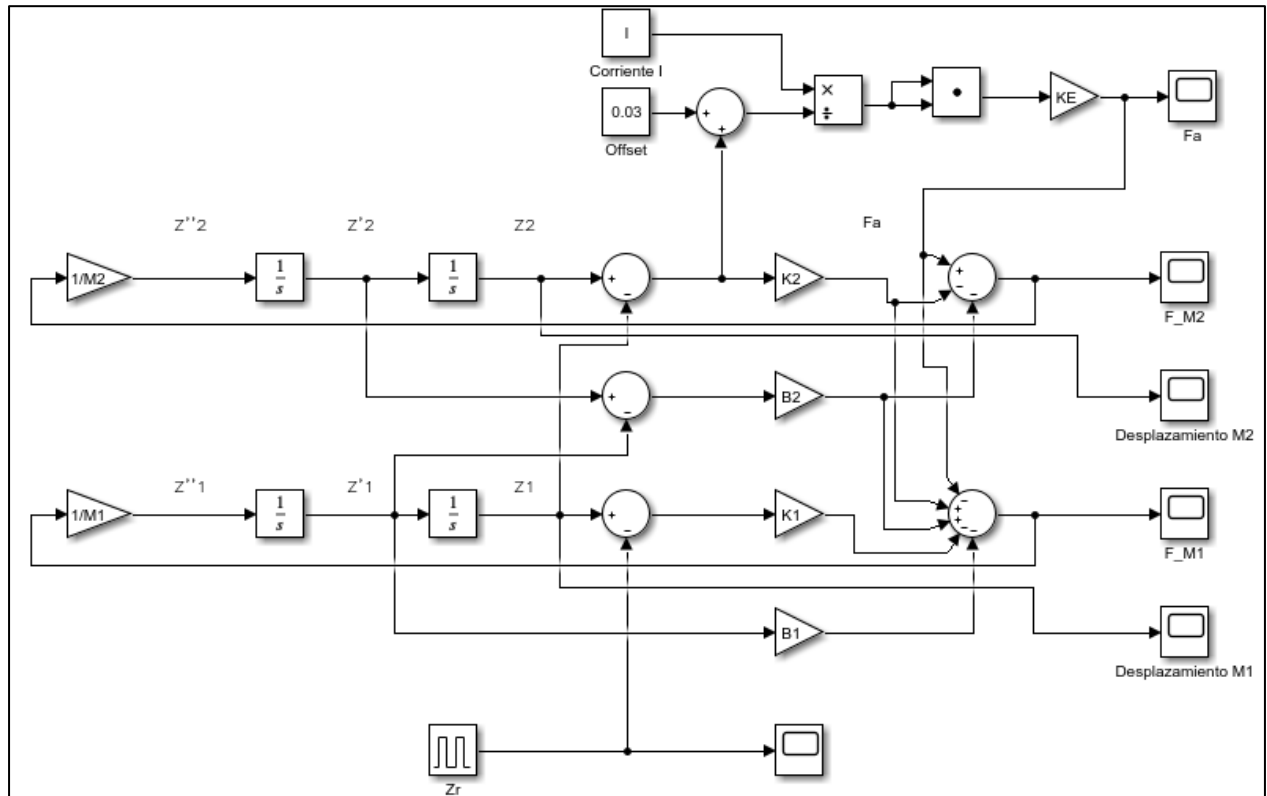
La fuerza con la que se repelen los imanes dependerá de la fuerza del campo magnético, descrita por la ecuación 3, la cual está en función de la corriente y de la distancia entre los imanes. De esta forma, se relaciona la ecuación 3 con el modelo de la suspensión, dado que ésta fuerza dependería así mismo de la distancia entre las dos masas, descrita por $(Z_2 - Z_1)$ en las ecuaciones 5 y 6.

5.9. Primeras Pruebas en SIMULINK

Utilizando las ecuaciones 3, 5 y 6 se crea un sistema de bloques en MATLAB SIMULINK que permita simular el comportamiento de la suspensión. Este modelo se puede ver en la siguiente figura:

Figura 23

Modelo en SIMULINK Inicial



Nota: Este sistema de bloques está dispuesto de manera que la fuerza del actuador solo dependa de la variación de la distancia entre las dos masas del modelo de suspensión, dejando a la corriente como una constante.

Mediante el apoyo en sistema de bloques, se diseñará el control, mediante un sistema cerrado de control para utilizar la corriente como la variable a manipular, resultando en el desplazamiento de la masa 2 como la variable controlada, manteniendo así el principio descrito en la función de transferencia de la ecuación 7.

Las componentes de masas y constantes de elasticidad fueron obtenidas de forma empírica y utilizando la documentación propia del vehículo. Los datos que se obtuvieron de forma bibliográfica fueron las siguientes:

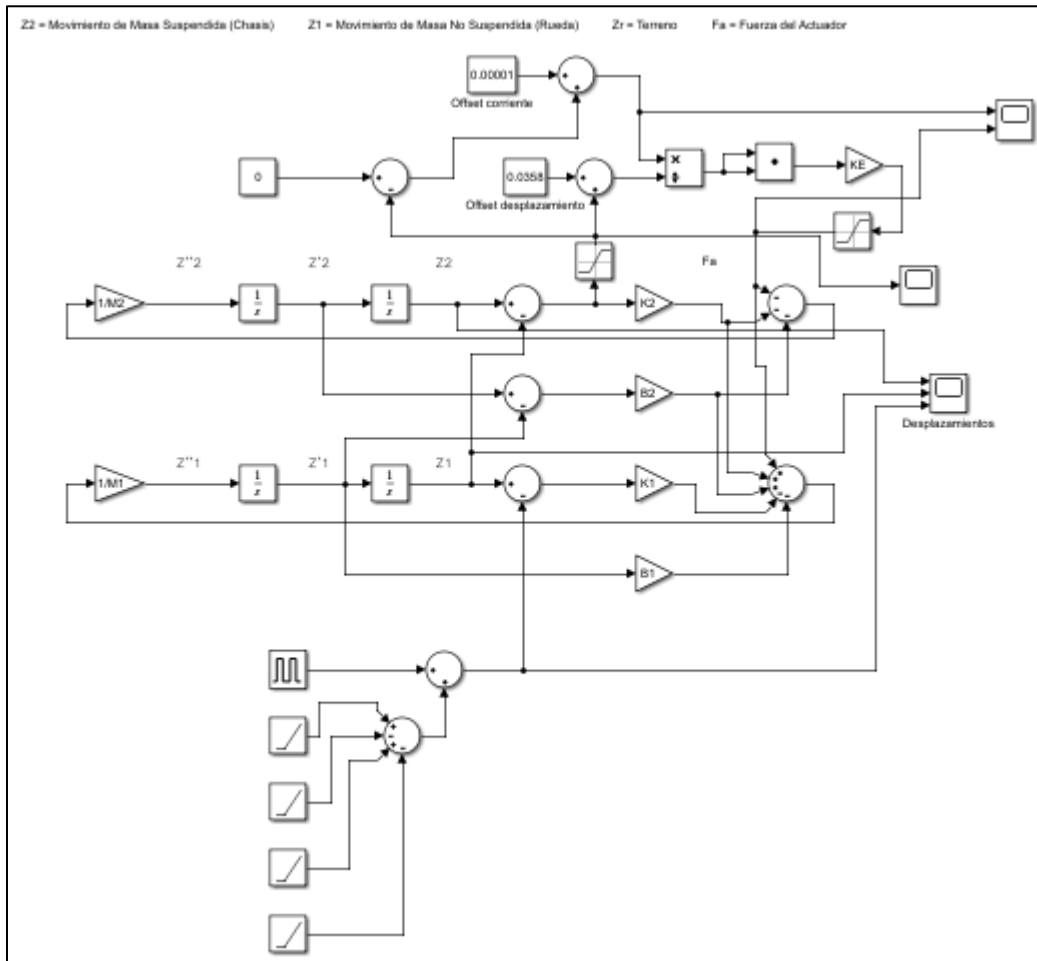
- Rigidez del neumático $K_1 = 132322.756 \text{ N/m}$

- Rigidez del muelle $K_2 = 34960.62 \text{ N/m}$

Al implementar de mejor manera esta fuerza en el diagrama de SIMULINK, se obtiene lo siguiente:

Figura 24

Modelo en SIMULINK Modificado



Nota: La figura muestra el modelo de SIMULINK modificado, incluyendo límites y precargas al funcionamiento del sistema, para describir mejor su funcionamiento, pero siendo aún un modelo con un control solamente realimentado. Adicionalmente, se cambió la función de entrada para analizar el sistema en una condición más realista, pudiendo verse en el apartado de Primeros Resultados.

Posteriormente se modificó la función de la fuerza del actuador, dividiéndola en dos componentes, de corriente y de distancia, para adecuar correctamente el diagrama de bloques. Las componentes se obtienen de la ecuación 3, y aplicando series de Taylor, se obtiene lo siguiente (RAMOS OCAÑA, 2019):

$$F_a(i, x) = \frac{1}{2} \mu_0 AN^2 \left(\frac{I}{x} \right)^2 = KE * \left(\frac{I}{x} \right)^2$$

$$F_a(i, x) = 2 * KE * \frac{i_0}{x_0^2} * i - 2 * KE * \frac{i_0^2}{x_0^3} * x \quad (8)$$

$$K_i = 2 * KE * \frac{i_0}{x_0^2} \quad (9)$$

$$K_x = 2 * KE * \frac{i_0^2}{x_0^3} \quad (10)$$

$$F_a = K_i * i - K_x * x \quad (11)$$

Con esto, se puede integrar en la sumatoria de fuerzas de la siguiente manera en las ecuaciones 5 y 6, obteniendo las ecuaciones 12 y 13:

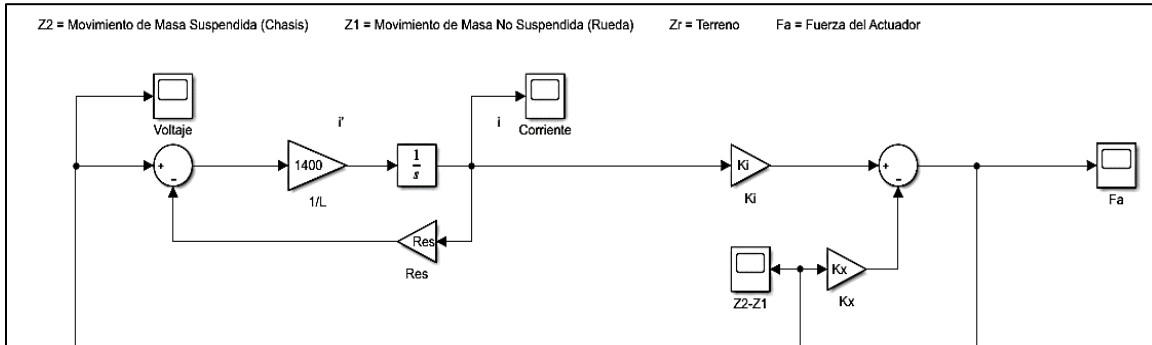
$$M_2 \ddot{Z}_2 = (K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1)) - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2(Z_2 - Z_1) \quad (12)$$

$$M_1 \ddot{Z}_1 = -(K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1)) + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2(Z_2 - Z_1) - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1(Z_1 - Z_r) \quad (13)$$

Con esto, se implementa el siguiente diagrama en SIMULINK:

Figura 25

Diagrama de Fuerza en Componentes en SIMULINK

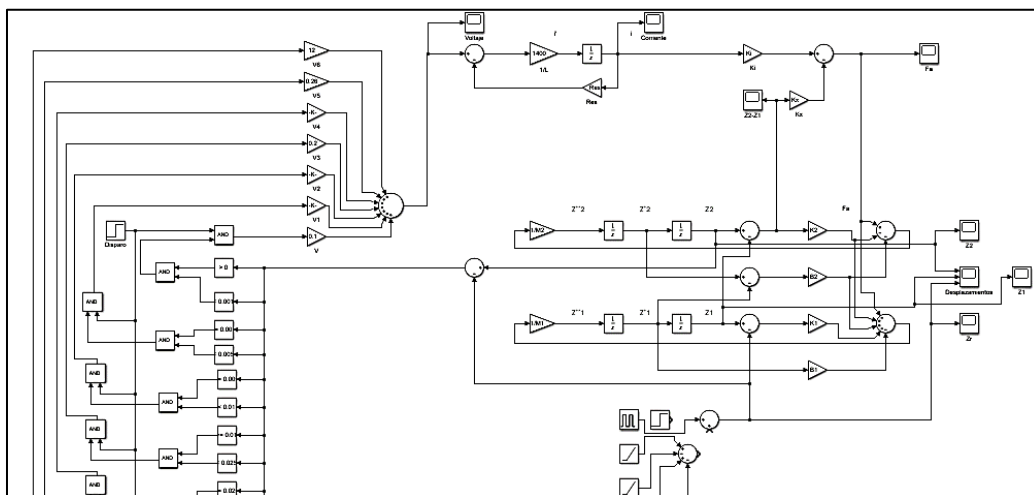


Nota: La figura muestra el diagrama de SIMULINK de la fuerza del actuador dividida en sus dos componentes, de corriente y distancia.

La entrada de voltaje, en esta etapa, poseía un control ON/OFF que reaccionaba en función de la posición del chasis, como se aprecia en la siguiente figura siguiente del diagrama completo:

Figura 26

Diagrama Completo de SIMULINK con Control ON / OFF



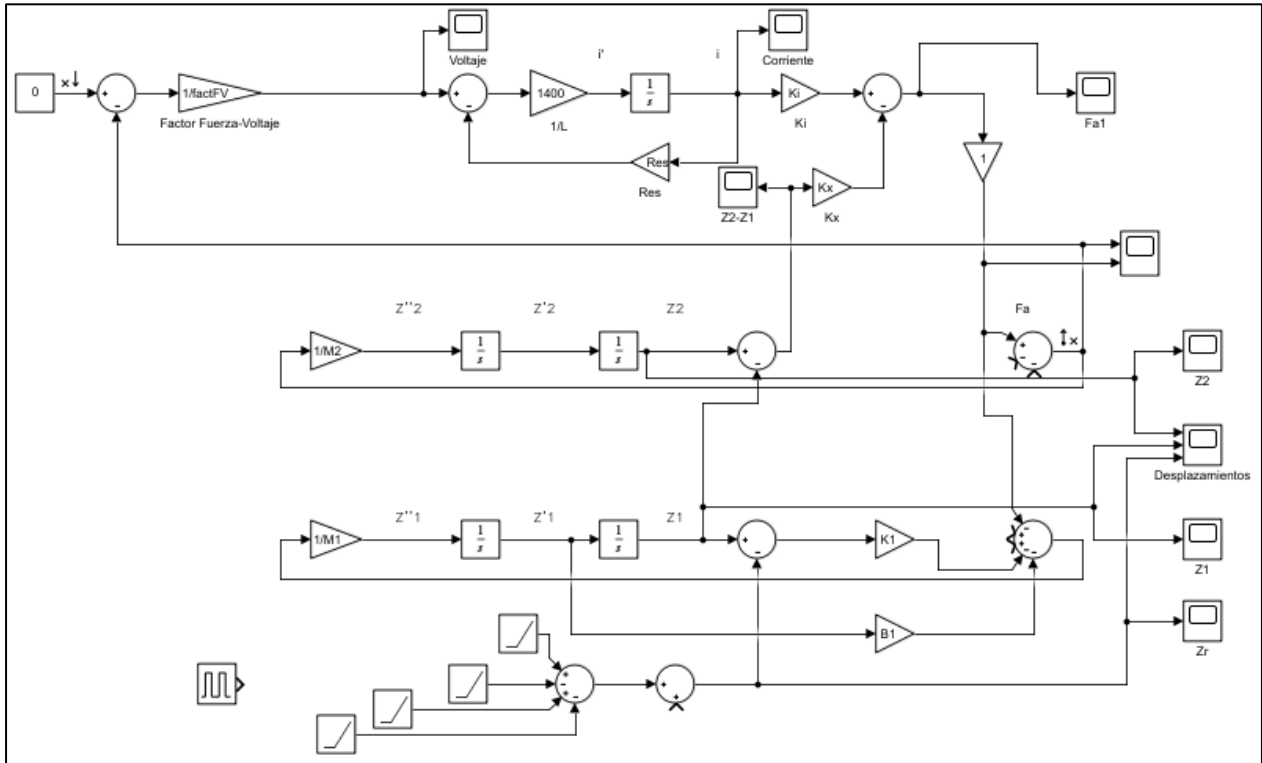
Nota: La figura muestra el diagrama de bloques que simula un control ON / OFF en función de la posición del chasis, otorgando la entrada de voltaje al actuador. Los resultados de este sistema están en las figuras 37, 38 y 329.

5.10. Primera Propuesta de Control

Considerando los sistemas anteriormente probados, y observando su comportamiento en los resultados, se busca establecer las necesidades del control. Partiendo del siguiente diagrama:

Figura 27

Diagrama Completo Inicial para Primera Propuesta de Control



Nota: En la figura se puede observar en la parte superior el diagrama de bloques que describe a los electroimanes, seguido de los bloques que forman la sumatoria de fuerzas en el chasis, para finalmente tener los bloques de la sumatoria de fuerzas en el neumático, con la señal de la pista de entrada.

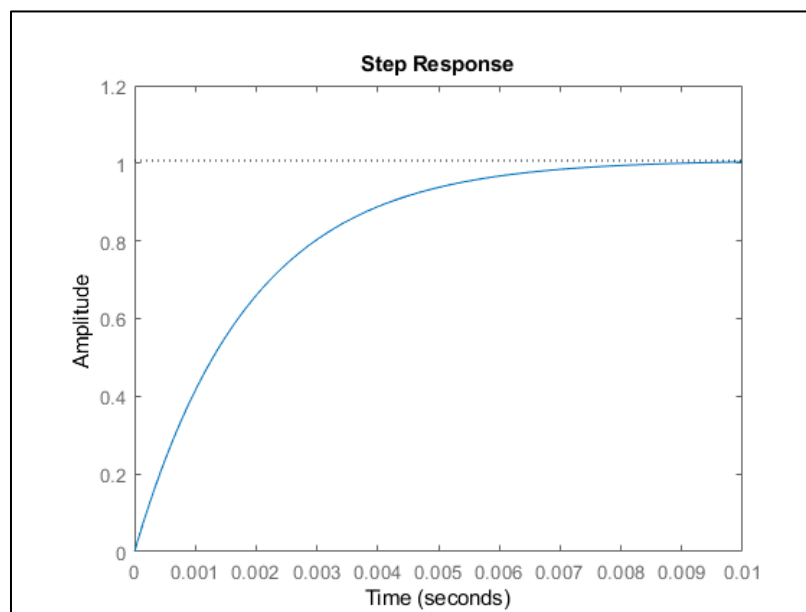
Para esta propuesta, se optó por eliminar el muelle del sistema de la suspensión, para utilizar únicamente el actuador para estabilizar el sistema. Con esto establecido, se obtuvo la función de transferencia del sistema mediante la app de MODEL LINEARIZER en SIMULINK. Esta es la siguiente:

$$G_{s1} = \frac{534.8 s^2 + 4862 s + 6.482 * 10^6}{s^3 + 538.9 s^2 + 16970 s + 6.437 * 10^6} \quad (14)$$

Esta función, que tiene por entrada a la referencia de fuerzas y la salida es la sumatoria de fuerzas en el chasis, posee un comportamiento rápido y sobre amortiguado, como se puede observar en la siguiente figura al darle una entrada escalón:

Figura 28

Respuesta del Sistema Sin Control ante un Escalón



Nota: La respuesta del sistema implica que la sumatoria de fuerzas del sistema alcanza el valor deseado en 0.01 segundos, a la vez que su descarga es de la misma velocidad.

Si bien es cierto que se desea que el sistema reaccione ante cualquier fuerza de la forma más rápida posible, la descarga debe ser lenta. Por tanto, los objetivos del control son los siguientes: carga rápida y descarga lenta.

Para conseguir estas consideraciones, la señal de voltaje debe ser controlada mediante una función de controlador que siga las siguientes características: tener un tiempo de asentamiento lento, pero alcanzar los valores deseados de forma rápida. Así, la función del controlador es la siguiente:

$$\text{Tiempo de Asentamiento} = TS$$

$$TS = 400 \text{ segundos}$$

$$\text{Polo} = \frac{-4}{TS} = -0.01 \quad (15)$$

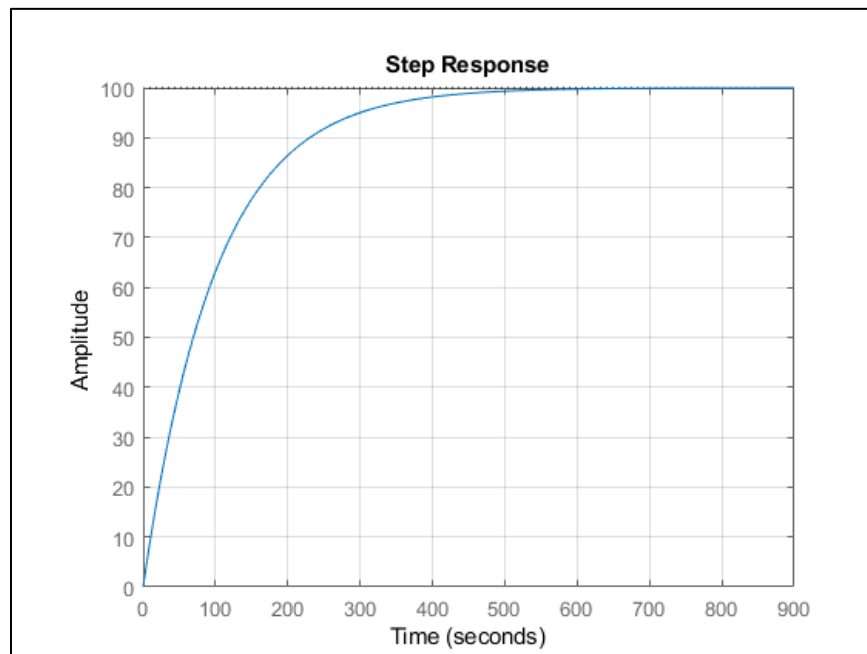
Considerando que se busca que la señal mantenga su forma sobre amortiguada, se determina el polo para un controlador con sistema de primer orden, resultando en la siguiente función:

$$G_{control} = \frac{1}{s + 0.01} \quad (16)$$

Esto permite que la descarga del voltaje, y por ende la fuerza del actuador, se descargue de forma lenta, como se describe en la siguiente figura:

Figura 29

Respuesta del Control de Voltaje Previo



Nota: Se puede observar en la figura que el controlador genera un error en estado estable gigantesco, al sobrepasar el valor de referencia del escalón unitario. Sin embargo, esto será deseable y explicado más adelante.

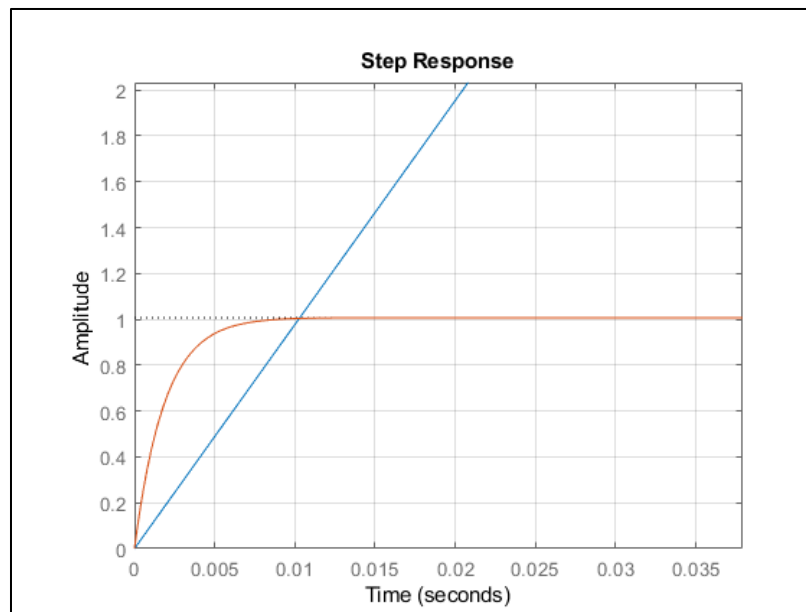
El sistema responde de manera que la carga, y por tanto su descarga, es lenta. Sin embargo, la condición de carga previa del sistema era la requerida, por lo que, para contrarrestar el retraso de la carga, se buscará alcanzar el valor de referencia en el mismo tiempo, mas no el valor de asentamiento, mediante una ganancia correspondiente al valor de reducción del polo de primer orden, en este caso $K = 100$, y su función sea:

$$G_{control} = \frac{100}{s + 0.01} \quad (17)$$

De esta forma, el sistema tiene un comportamiento como el descrito en la siguiente figura:

Figura 30

Respuesta del Controlador de Voltaje Definitivo

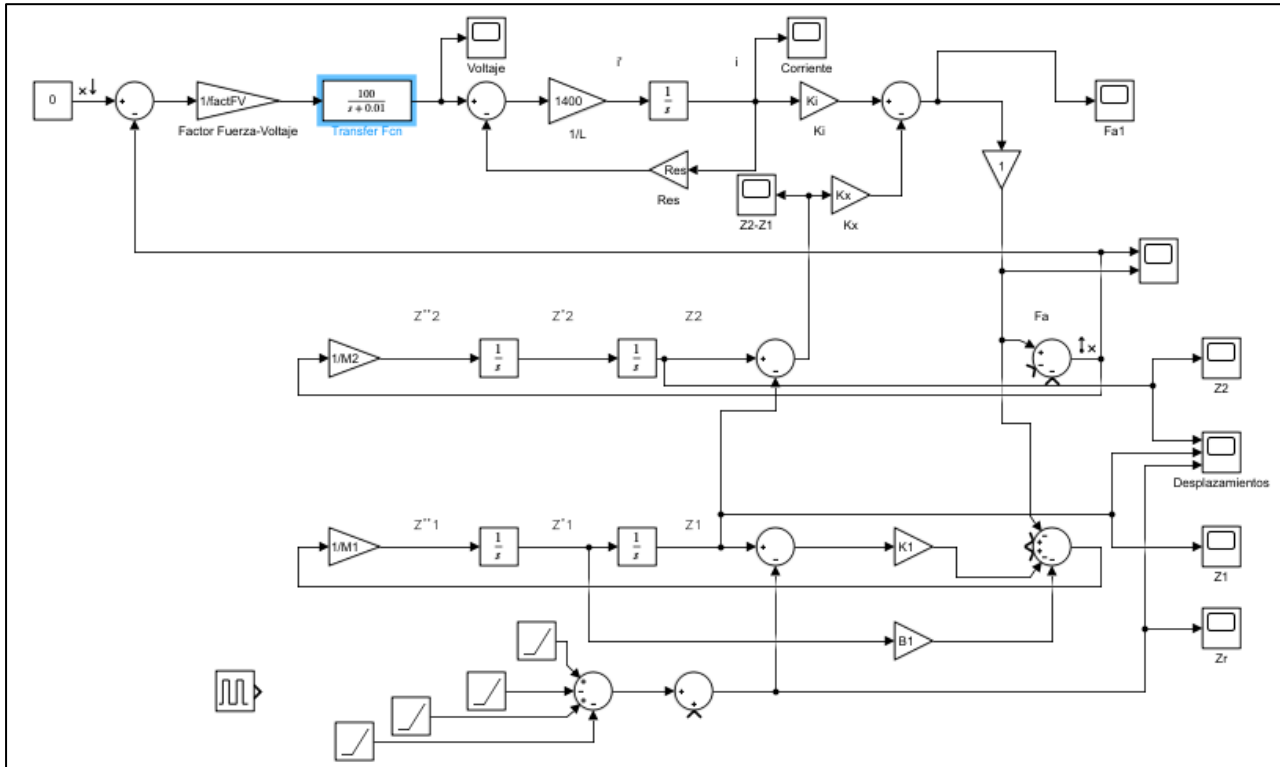


Nota: La figura muestra como la señal del controlador (señal azul) alcanza en el mismo instante el valor de referencia que la función original (señal roja). Si bien posee un error en estado estable de igual forma gigantesco, al momento de llegar al valor de referencia de su entrada, su desconexión haría que su descarga sea lenta.

El diagrama entonces resultaría en lo indicado en la figura a continuación. Los resultados de los desplazamientos se pueden observar en el apartado de Resultados de Primera Propuesta.

Figura 31

Diagrama en Simulink de la Primera Propuesta de Control



Nota: En la figura, señalado en azul, se puede ver la integración del controlador.

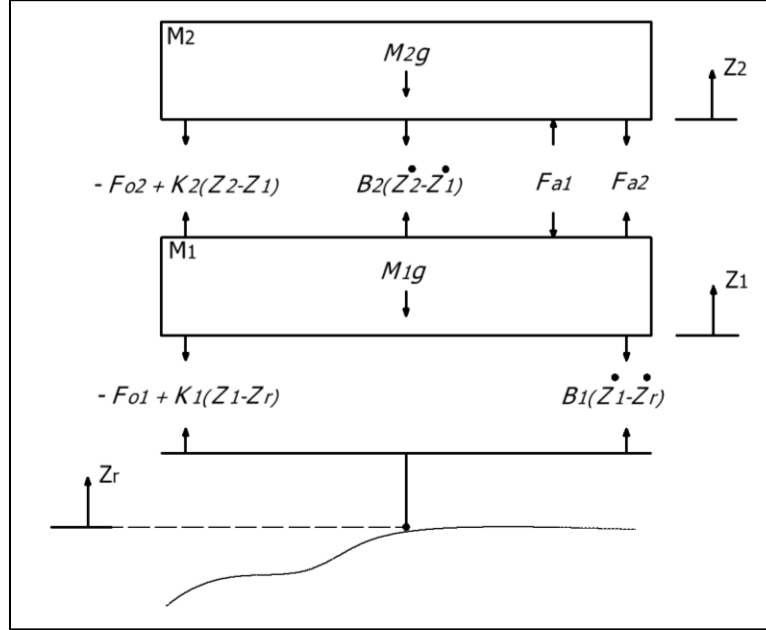
5.11. Segunda Propuesta de Control

Como segunda propuesta para la solución del proyecto, se ha planteado un “amortiguador” con dos electroimanes. Cabe destacar que esta propuesta cuenta básicamente con dos sistemas de control en uno solo, es decir; uno para cada electroimán, y cada control es el mismo del que se usó para la primera propuesta.

Es así que se debió realizar un nuevo DCL, del que, al basarnos en un modelo de cuarto de vehículo de un diagrama de fuerzas de una suspensión activa, se realizó un nuevo diagrama propio para el sistema, es decir; que ya cuente con las dos fuerzas correspondientes a los electroimanes, F_{a1} y F_{a2} ; el nuevo diagrama se lo puede apreciar en la figura 32:

Figura 32

DCL de la Segunda Propuesta de Control



Nota: En la figura, se destaca que DCL es similar al de la Figura 8, pero se agrega una fuerza F_{a2} de actuador añadida al sistema, representando los dos electroimanes.

Este diagrama nos servirá para obtener las nuevas funciones del sistema; nuevamente se toma en cuenta que los resortes están con fuerzas iniciales dadas por:

$$F_{01} = (M_2 + M_1) g \quad (18)$$

$$F_{02} = M_2 g \quad (19)$$

En base al diagrama y a la segunda ley de Newton, se pueden obtener las siguientes ecuaciones que describen el movimiento de las masas:

$$M_2 \ddot{Z}_2 = F_{a1} - F_{a2} - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - (-F_{02} + K_2(Z_2 - Z_1)) - M_2 g \quad (20)$$

$$M_1 \ddot{Z}_1 = -F_{a1} + F_{a2} + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + (-F_{02} + K_2(Z_2 - Z_1)) - M_1 g - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - (-F_{01} + K_1(Z_1 - Z_r)) \quad (21)$$

Nuevamente consideramos las ecuaciones 18 y 19 para simplificar 20 y 21 y las fuerzas gravitacionales son eliminadas ya que se las considera nulas, y obtenemos las siguientes funciones:

$$M_2\ddot{Z}_2 = F_{a1} - F_{a2} - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2(Z_2 - Z_1) \quad (22)$$

$$M_1\ddot{Z}_1 = -F_{a1} + F_{a2} + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2(Z_2 - Z_1) - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1(Z_1 - Z_r) \quad (23)$$

Aplicamos el mismo proceso que se usó para obtener las ecuaciones 12 y 13, y el resultado son las siguientes ecuaciones:

$$M_2\ddot{Z}_2 = (K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1))_1 - (K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1))_2 - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2(Z_2 - Z_1) \quad (24)$$

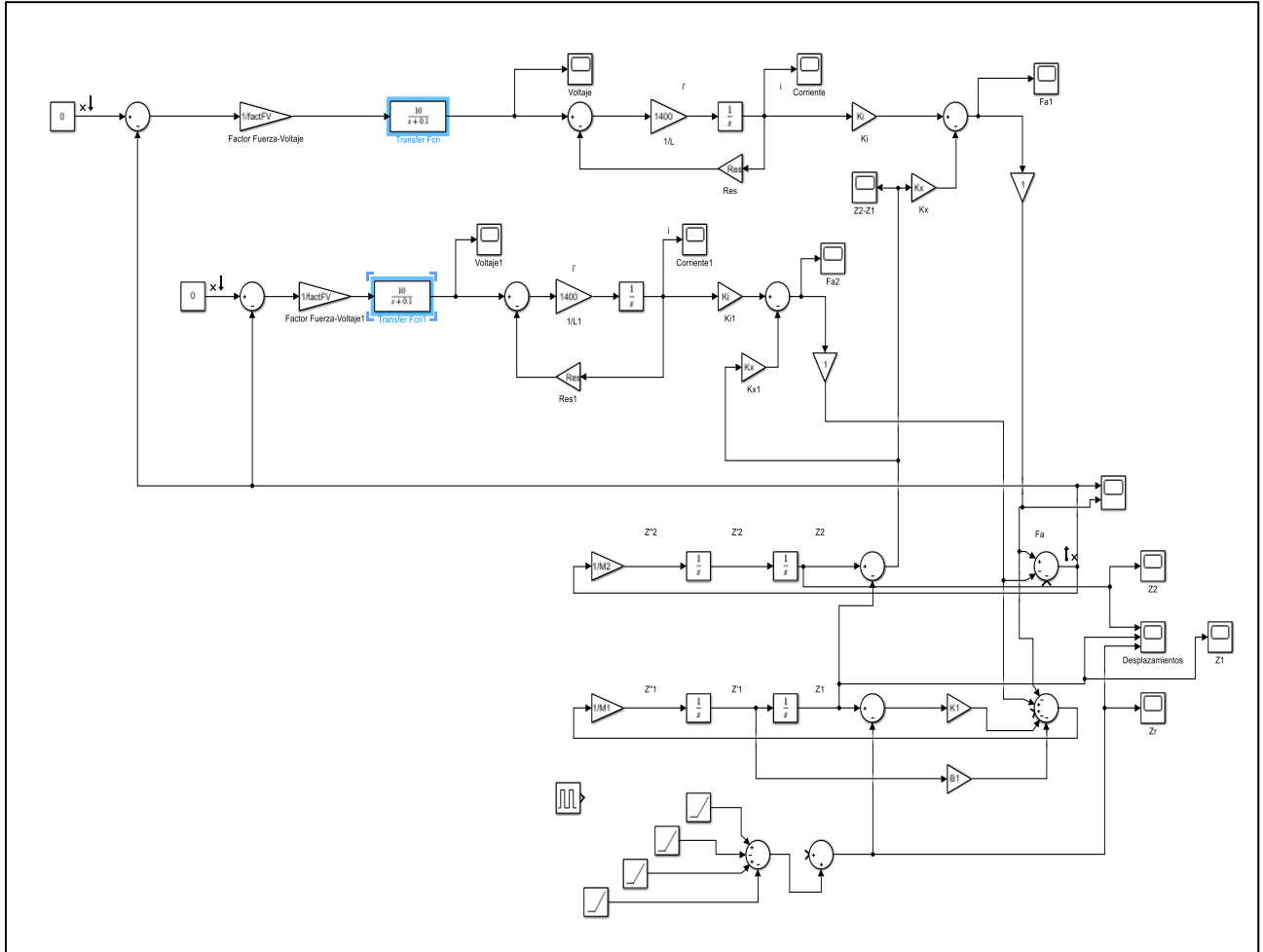
$$M_1\ddot{Z}_1 = -(K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1))_1 + (K_i * i - K_x * (Z_2 - Z_1))_2 + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2(Z_2 - Z_1) - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1(Z_1 - Z_r) \quad (25)$$

El diagrama entonces resultaría en lo indicado en la figura a continuación. Los resultados de los desplazamientos se pueden observar en el apartado de Resultados de Segunda Propuesta.

Cabe mencionar que para esta propuesta también se eliminó el muelle del sistema de suspensión para utilizar únicamente el actuador y así estabilizar el sistema.

Figura 33

Diagrama en Simulink de la Segunda Propuesta de Control

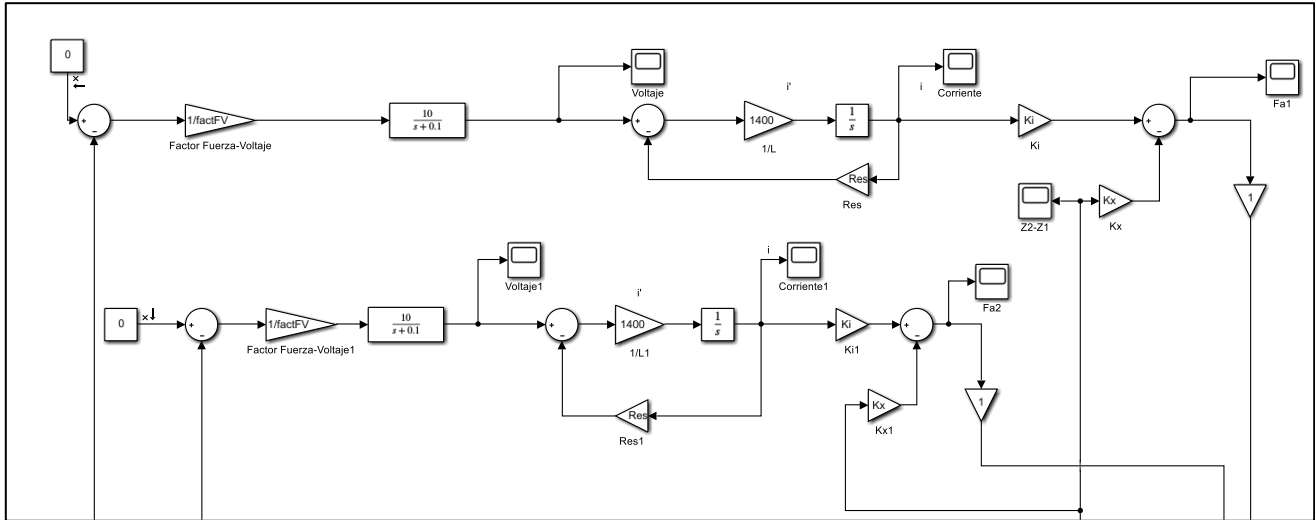


Nota: Se observa los dos sistemas de control en la parte superior; y señalado en azul se puede ver la integración de los controladores.

Para una mejor apreciación del modelado en Simulink, se divide en dos partes, la parte superior que abarca todo el sistema de control y la parte inferior que es el sistema de suspensión con la entrada de pista.

Figura 34

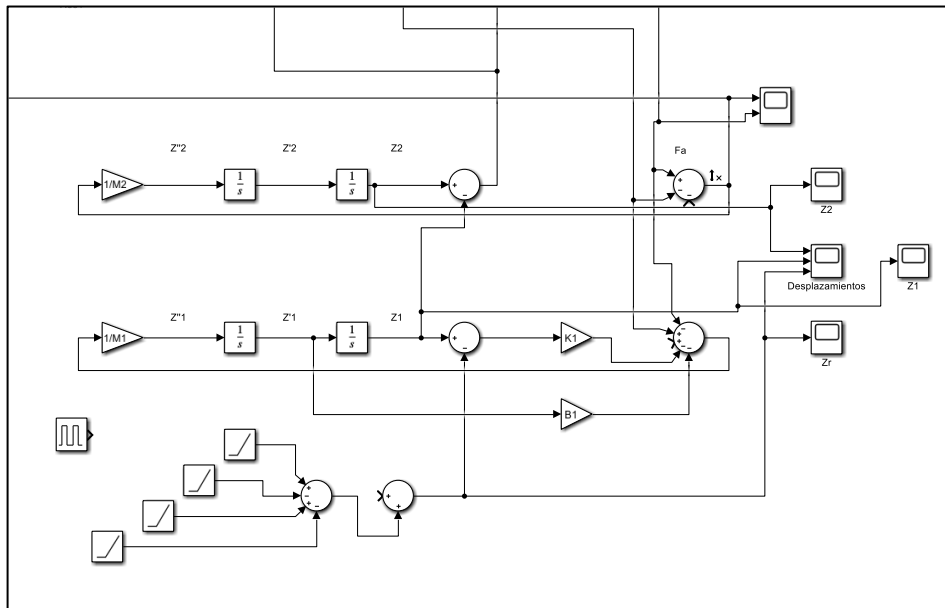
Parte Superior en Simulink de la Segunda Propuesta de Control



Nota: En esta figura se observa la parte superior del diagrama, en la que se destaca el sistema de control de ambos electroimanes.

Figura 35

Parte Superior en Simulink de la Segunda Propuesta de Control



Nota: Parte inferior del diagrama, en la que se observa el sistema de suspensión.

6. Resultados

6.1. Resultado del Diseño de Electroimanes

Los electroimanes y su requerimiento de corriente fueron limitados para realizar una acción de

Tabla 4

Parámetros de los Electroimanes

Parámetro	Valor
Longitud	50 mm
Número de espiras	500
Diámetro del núcleo	10 mm
Campo magnético	1.7090e+4 teslas
Corriente máxima	1.7 A
Fuerza máxima	11.4093 kN

Nota: La tabla muestra las características y parámetros que deben poseer los electroimanes para las condiciones requeridas.

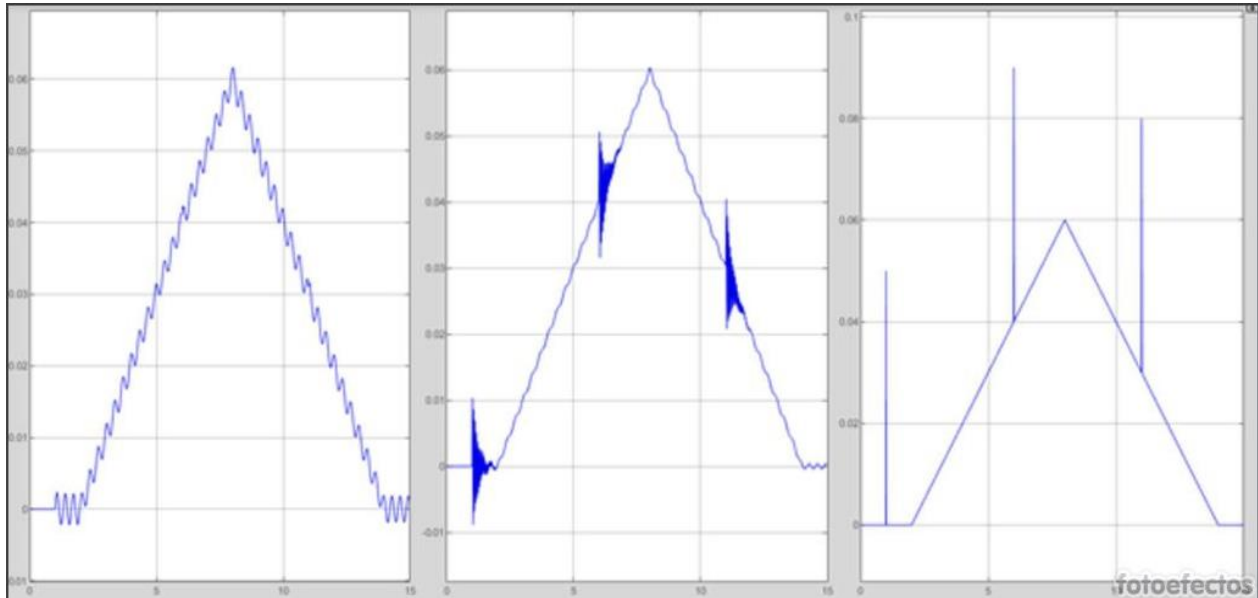
Estos valores son los requeridos para que el actuador funcione, permitiendo diseñar con ellos el actuador con el que se realizará el control.

6.2. Primeros Resultados del Comportamientos del Sistema

Utilizando el modelo de la figura 24, se pueden obtener los siguientes resultados:

Figura 36

Desplazamientos y Señal de Entrada



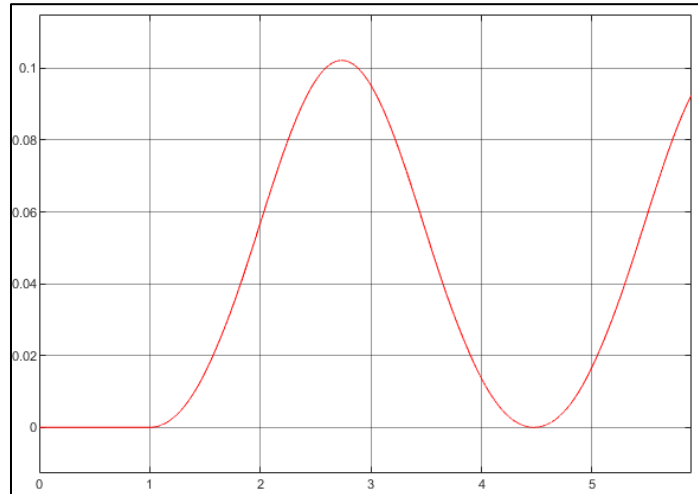
Nota: La figura muestra el resultado del modelo de SIMULINK de la figura 24, de forma que se observan los desplazamientos de: el chasis, el neumático y la señal de entrada respectivamente. Con esto se determina la necesidad de un control más sofisticado al poseer un estado permanentemente oscilante en el desplazamiento del chasis.

Las gráficas muestran la simulación de una pista en la que el vehículo va a una velocidad de 120 km/h, valor muy cercano a las capacidades máximas de un vehículo tipo Fórmula SAE, recorriendo 500 metros en los 15 segundos. El resultado es poco favorable ya que queda permanentemente oscilando, por lo que se debió cambiar la forma del diagrama, así como también el sistema de control.

Entonces, el siguiente diagrama al que se le realizaron pruebas fue al descrito en las figuras 25 y 26, un sistema ON / OFF, que tampoco resultaron favorables. Además, la forma en que el voltaje se comportaba era fija, y complicando la manera de configurar el comportamiento del sistema. En las siguientes figuras, se observa el caso de uno de los resultados obtenidos, pero cambiando la pista, siendo solamente una piedra de 5 cm de alto en su entrada, a 120 km/h

Figura 37

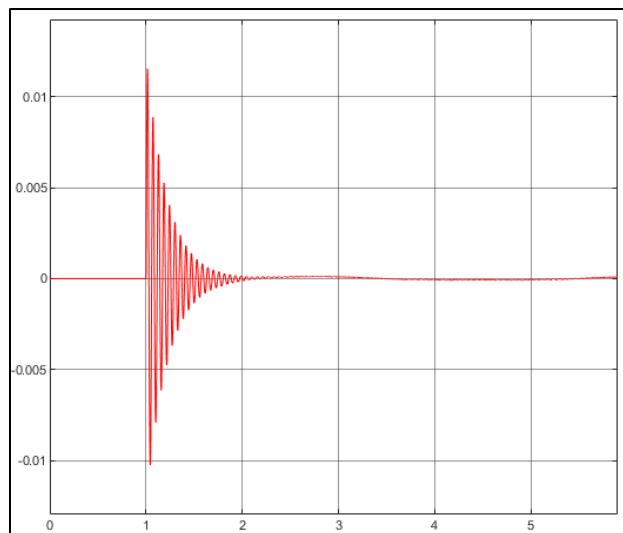
Resultado de las Pruebas para el Chasis



Nota: La figura muestra el desplazamiento del chasis, utilizando el sistema de las figuras 25 y 26, mostrando su inestabilidad.

Figura 38

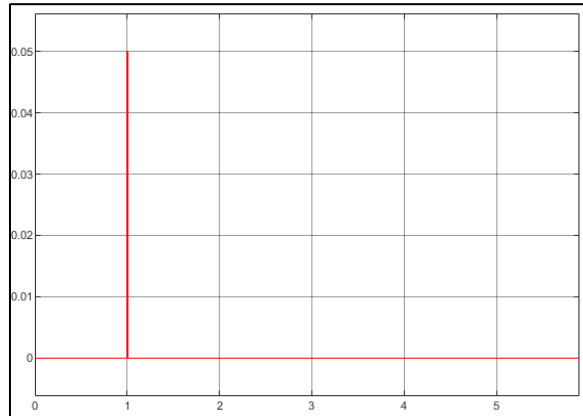
Resultado de las Pruebas para la Rueda



Nota: La figura muestra el desplazamiento de la rueda ante una entrada, mostrando que el sistema de las figuras 25 y 26 le producen desplazamientos demasiado altos.

Figura 39

Señal de Entrada para la Prueba



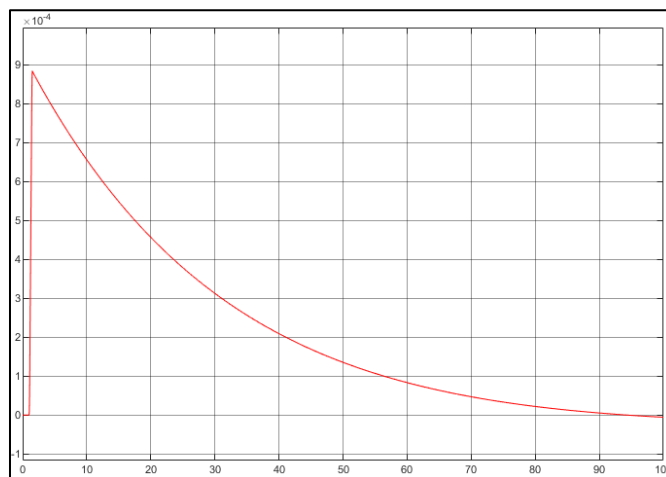
Nota: La figura muestra la señal de entrada para la prueba, siendo ingresada en el valor de Z_r como la variación de la pista.

6.3. Resultados de Primera Propuesta

Utilizando el sistema de la primera propuesta de control, del apartado 5.10., se obtiene en los desplazamientos lo mostrado en las siguientes figuras:

Figura 40

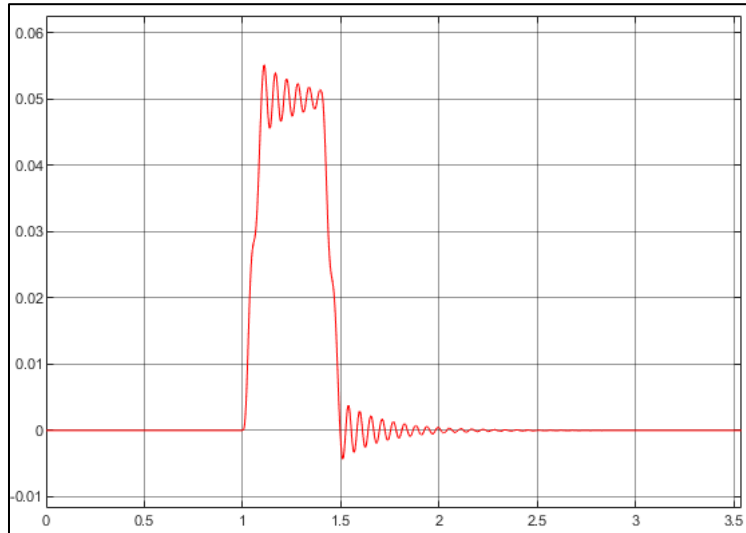
Desplazamiento del Chasis



Nota: La figura muestra como el chasis obtiene un desplazamiento inferior a 1 mm ante la entrada.

Figura 41

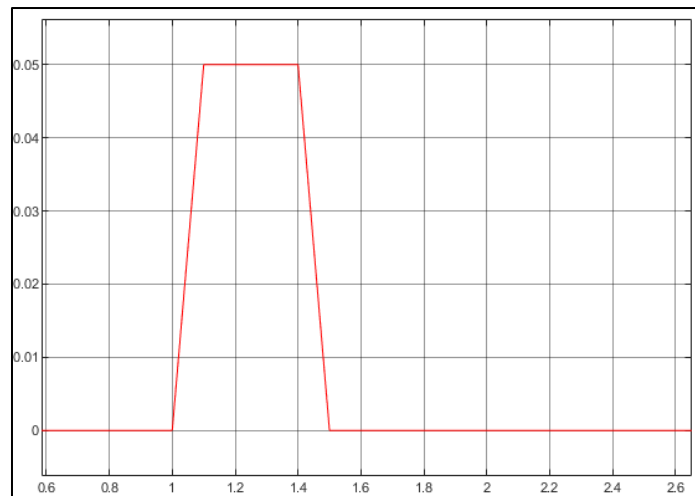
Desplazamiento de la Rueda



Nota: La figura muestra el movimiento de la rueda, siguiendo adecuadamente la pista, sin tener demasiado rebote, y entrando en su estado estable en medio segundo.

Figura 42

Señal de la Pista



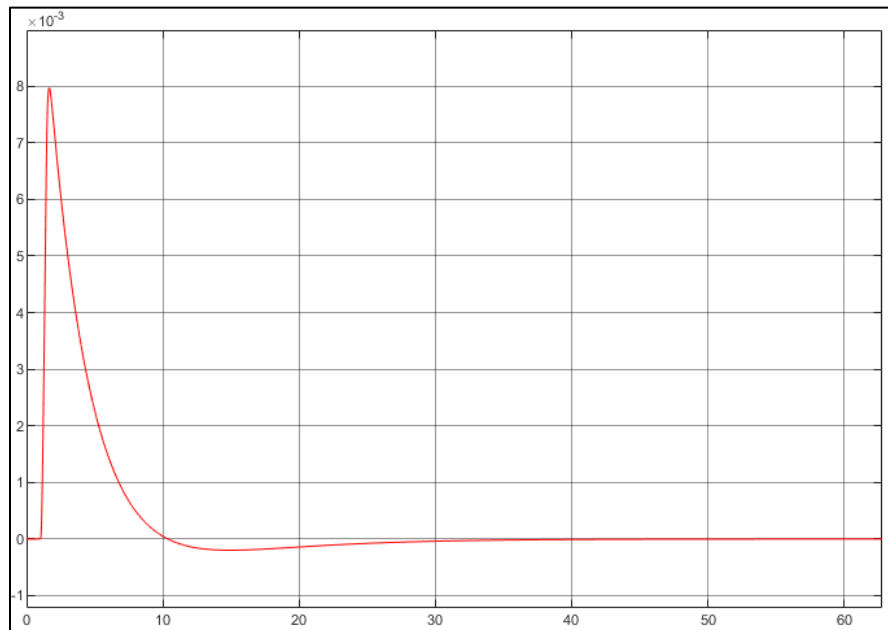
Nota: La pista mostrada está basada en las pruebas que se realizaron en los estudios del sistema de suspensión pasivo, observándose mejor más adelante en el apartado de comparaciones.

Una consideración importante de esta y de la siguiente propuesta es que el factor de tiempo de asentamiento para el sistema puede variar según lo requiera la necesidad, según cuánto confort y cuán rápido se requiere la estabilización. Dado que esta señal será dada desde un microcontrolador, el factor puede variar según la información de sensores adicionales o la comunicación con el centro de mando, e incluso manipulable por el propio piloto.

Para los resultados mostrados, se priorizó otorgar un mayor confort. Sin embargo, si se quisiera que el sistema se estabilice con mayor rapidez, sacrificando el confort, se puede utilizar un tiempo de asentamiento de 40 segundos, obteniendo desplazamientos del chasis como los indicados en la siguiente figura:

Figura 43

Desplazamiento del Chasis con otra Configuración



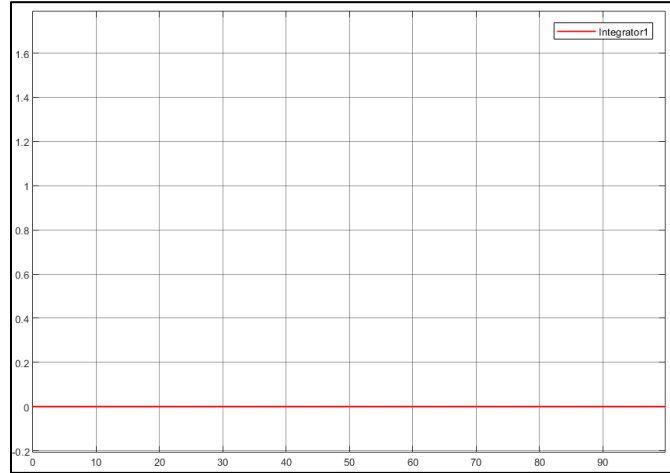
Nota: La figura muestra cómo al cambiar el factor del tiempo de asentamiento, se sacrifica confort en el vehículo, ampliando el desplazamiento a 8 milímetros.

6.4. Resultados Segunda Propuesta

Al utilizar el sistema de la segunda propuesta de control, del apartado 5.11., se obtiene en los desplazamientos lo mostrado en las siguientes figuras:

Figura 44

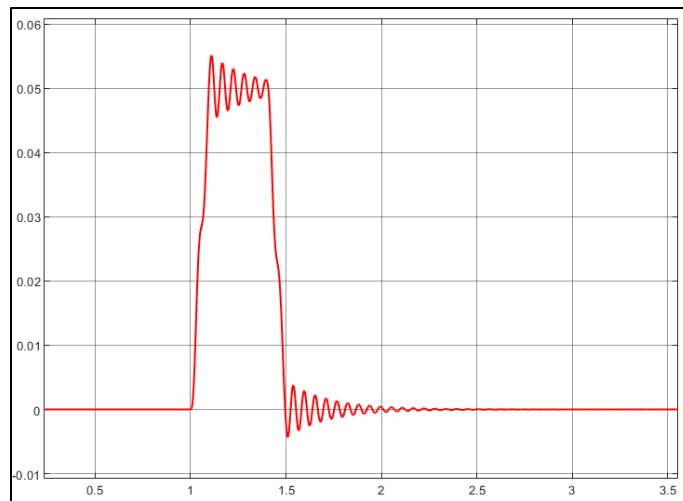
Desplazamiento del Chasis



Nota: La figura muestra como el chasis no presenta ningún movimiento, es decir; el desplazamiento del chasis con esta propuesta es nulo.

Figura 45

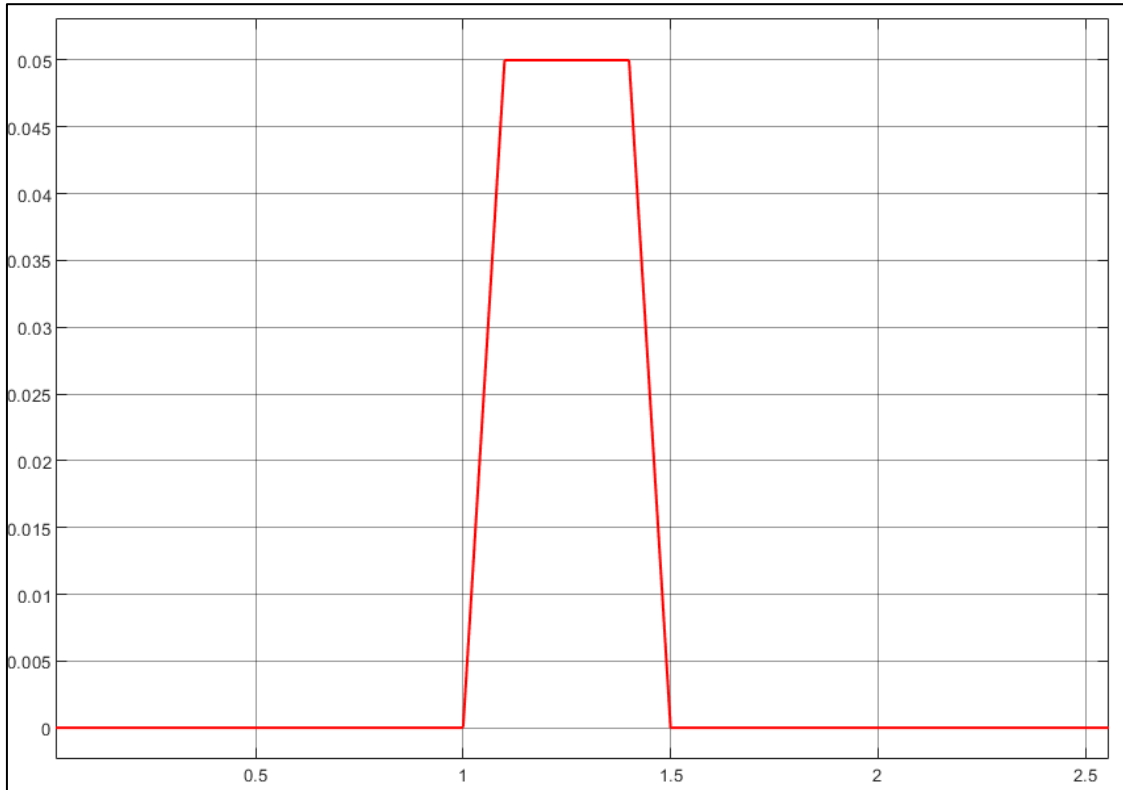
Desplazamiento de la Rueda



Nota: Al igual que el resultado de la primera propuesta, en la figura muestra que el movimiento de la rueda sigue adecuadamente la pista, sin tener demasiado rebote, y entrando en un estado estable en medio segundo.

Figura 46

Señal de la Pista



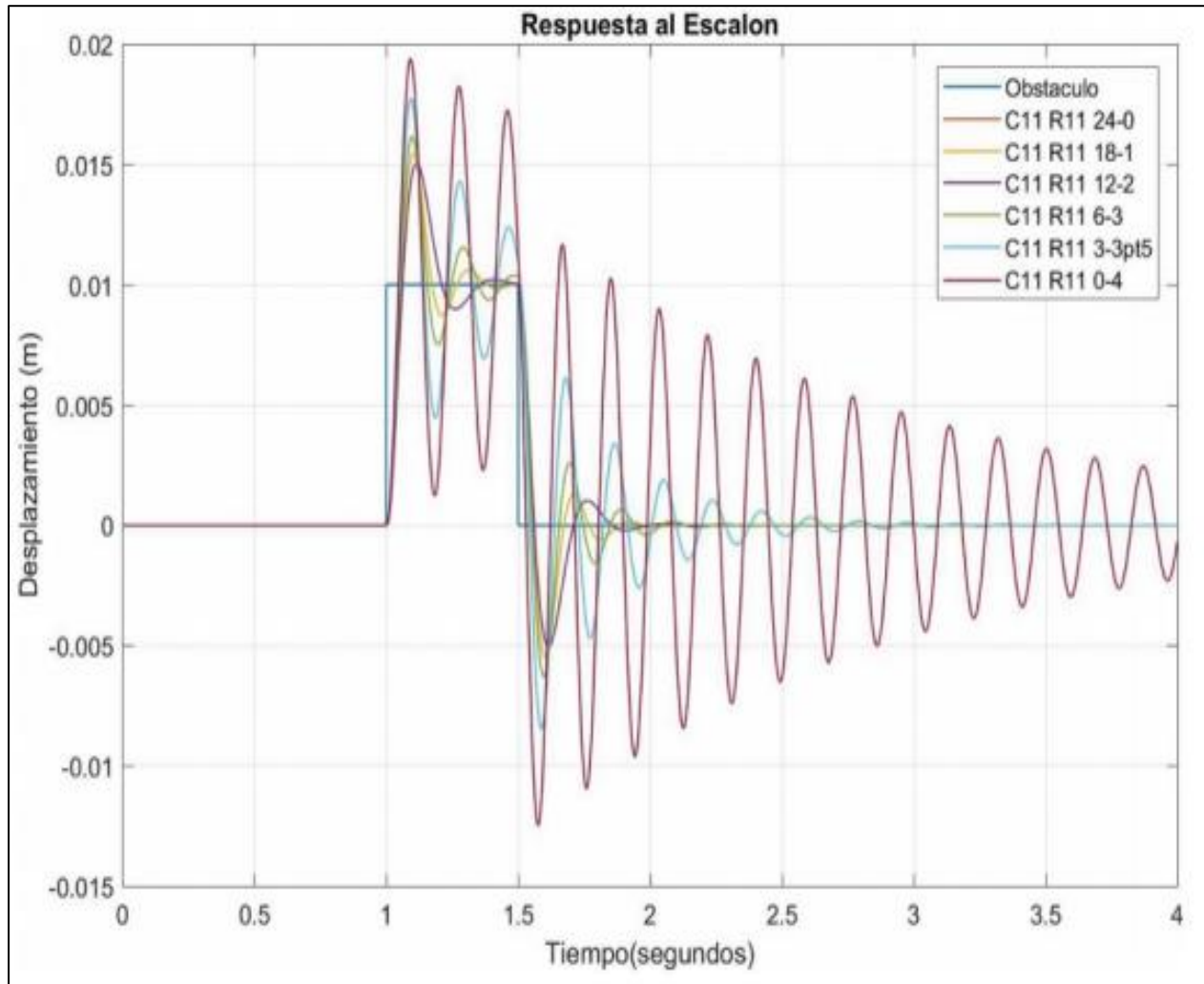
Nota: La pista mostrada es la misma que se usó en las pruebas hechas para la primera propuesta.

6.5. Comparación con el Sistema Original

Analizando la primera propuesta, se puede observar una notoria mejoría en el sistema al comparar el desplazamiento del chasis en cada caso, tal como se observa a continuación:

Figura 47

Respuesta a del Sistema de Suspensión Posterior Pasivo ante un Desplazamiento Vertical

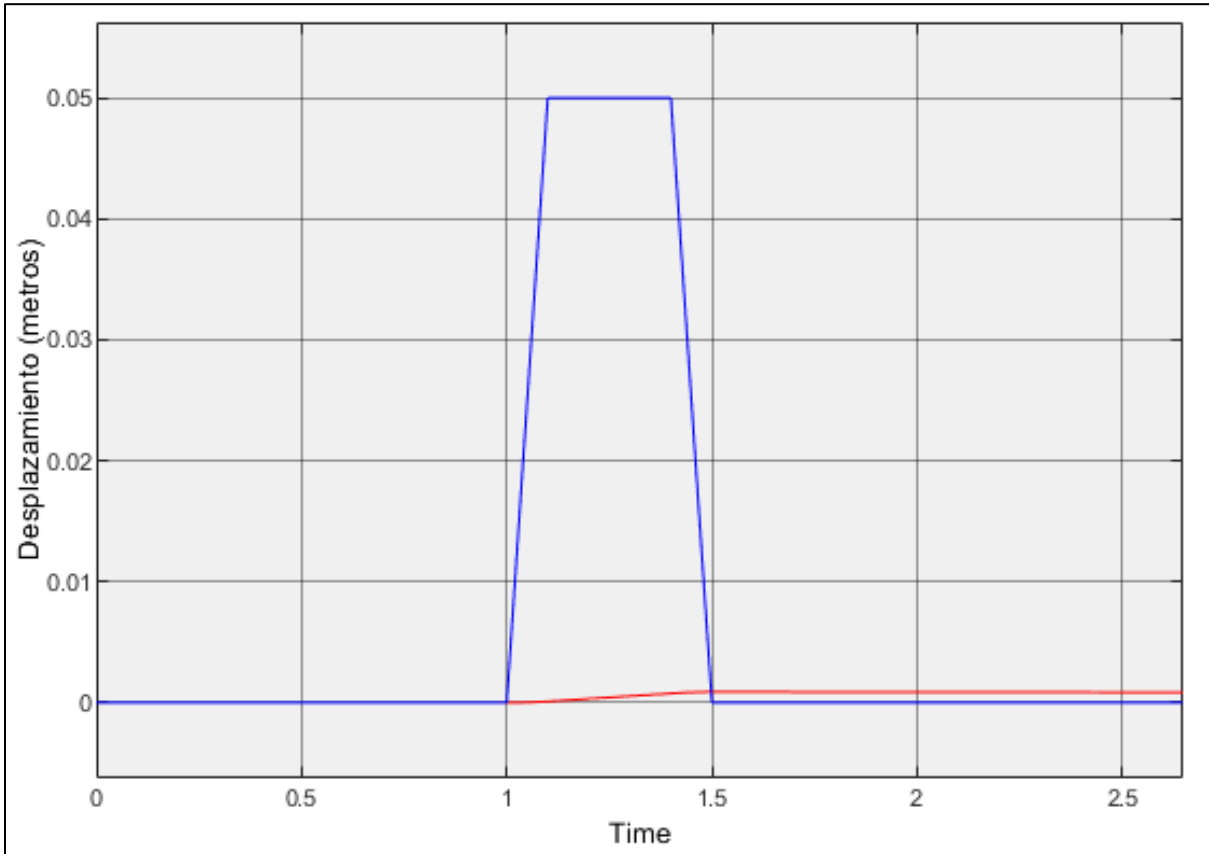


Nota: La figura muestra el comportamiento del sistema de suspensión posterior pasivo en sus distintas configuraciones (Arévalo, Medina, & Valladolid, 2018).

Si se compara con los sistemas propuestos, se obtiene lo siguiente:

Figura 48

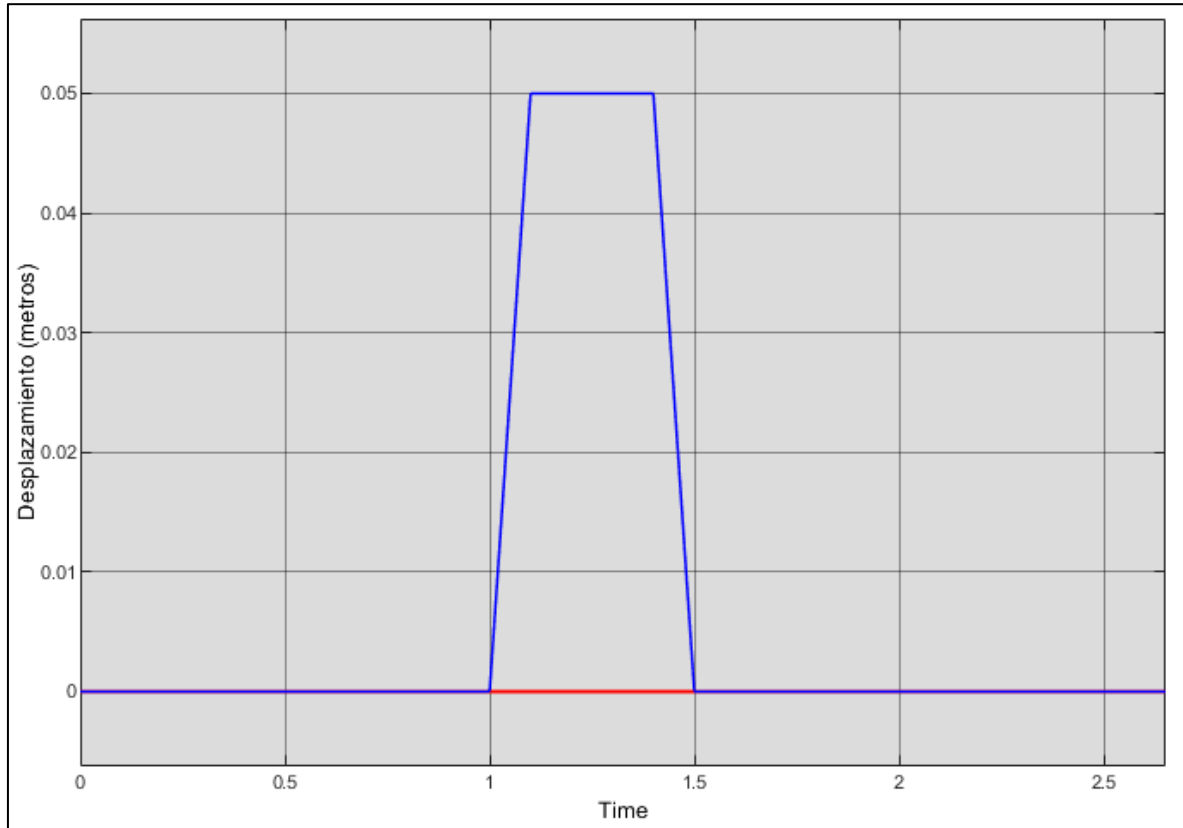
Respuesta de la Primera Propuesta ante un Desplazamiento Vertical Mayor



Nota: La figura muestra la comparación del desplazamiento del chasis (señal roja) frente a la entrada de la pista (señal azul). Esto concluye que el sistema propuesto supera con gran amplitud al sistema pasivo.

Figura 49

Respuesta de la Segunda Propuesta ante un Desplazamiento Vertical Mayor



Nota: La figura muestra la comparación del desplazamiento del chasis (señal roja) frente a la entrada de la pista (señal azul). Por lo que se concluye que esta propuesta también supera con gran amplitud al sistema pasivo.

Con relación al desplazamiento del chasis de ambas propuestas, se ha podido observar que la primera propuesta presenta un desplazamiento inferior a 1 mm, en cambio la segunda propuesta presenta un desplazamiento de cero; así que, en el ámbito de desplazamiento, la segunda propuesta sería ideal para un sistema de suspensión.

6.6. Propuesta de Diseño Electrónico

El diseño electrónico que controla a los electroimanes es sencillo, pero requiere de un cierto nivel de seguridades que garanticen que el sistema funcione. Estas seguridades son:

- Circuito de control con tierra aislada de la parte de potencia
- Protección de sobretensiones
- Manejo de elementos de calidad automotriz

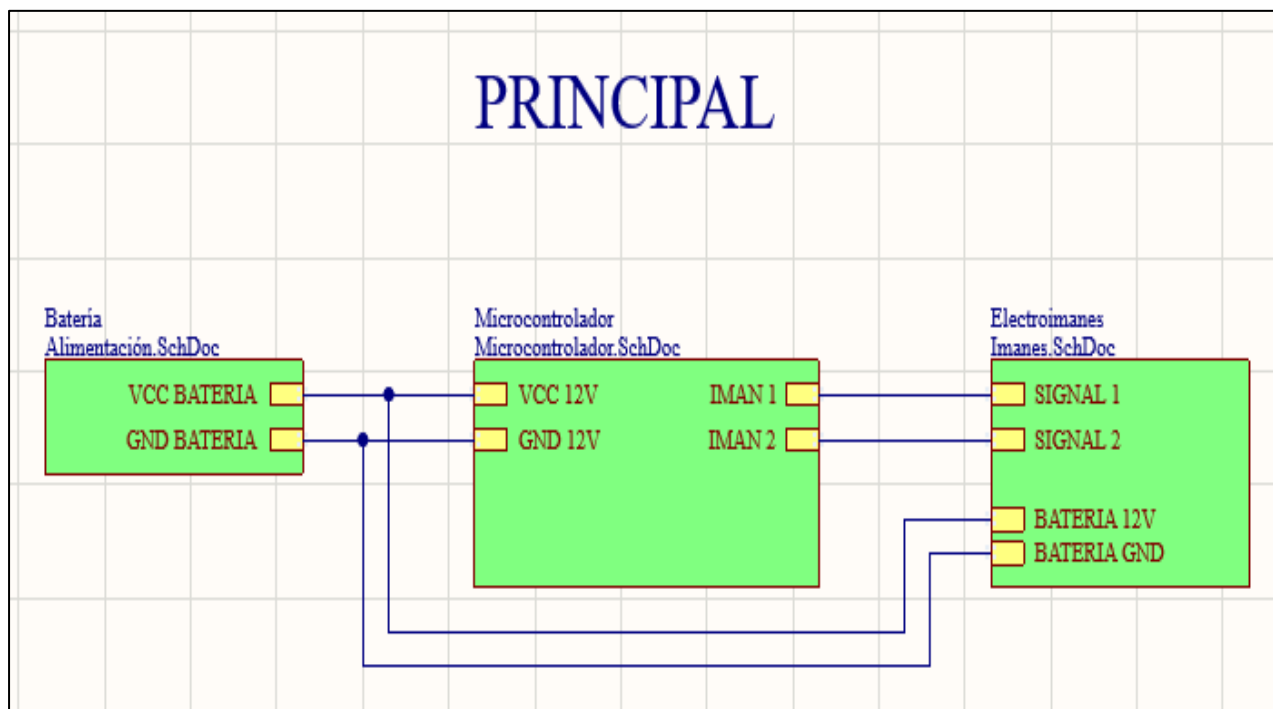
En función de estas consideraciones, se seleccionaron componentes adecuados para el nivel de seguridad requerido, y utilizando el programa ALTIUM DESIGNER, se propone un diseño electrónico MULTIBOARD descrito a continuación:

6.6.1. PCB Principal

El PCB principal parte del siguiente diagrama que divide los componentes en diferentes módulos esquemáticos, como se puede ver en la siguiente figura:

Figura 50

Esquema Principal

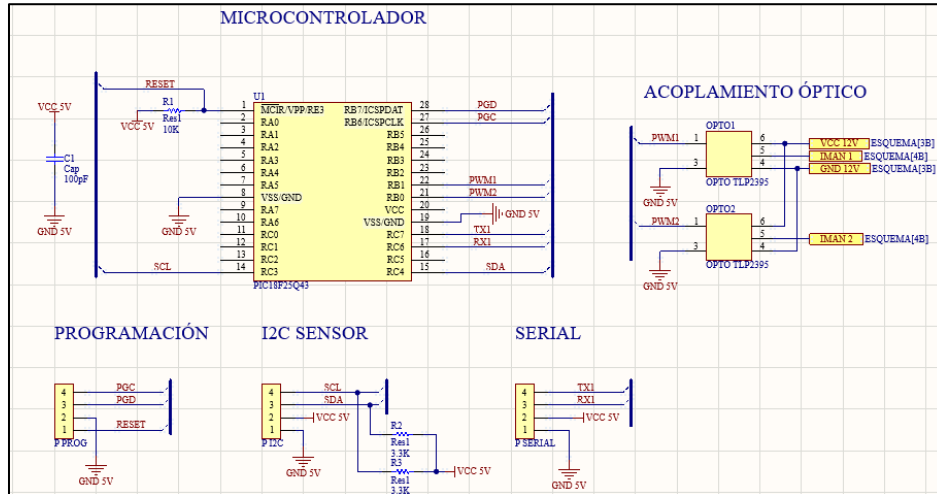


Nota: La figura muestra la interconexión de los módulos esquemáticos del PCB principal.

Cada módulo esquemático, se describe en las siguientes figuras:

Figura 51

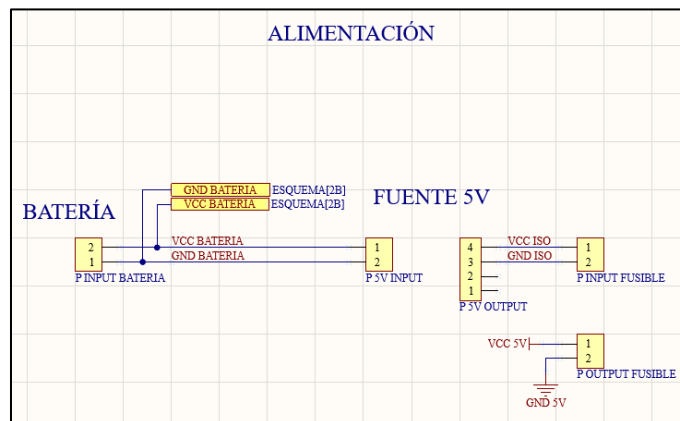
Esquema del Microcontrolador



Nota: El microcontrolador cuenta con 2 sistemas de comunicación: un serial UART, un I2C para los sensores de aceleración. Luego, posee un acoplamiento óptico para las señales de control PWM de los electroimanes. El microcontrolador es el PIC18F25Q43, aceptado en la norma automotriz ISO 26262 ASIL.

Figura 52

Etapa de Alimentación

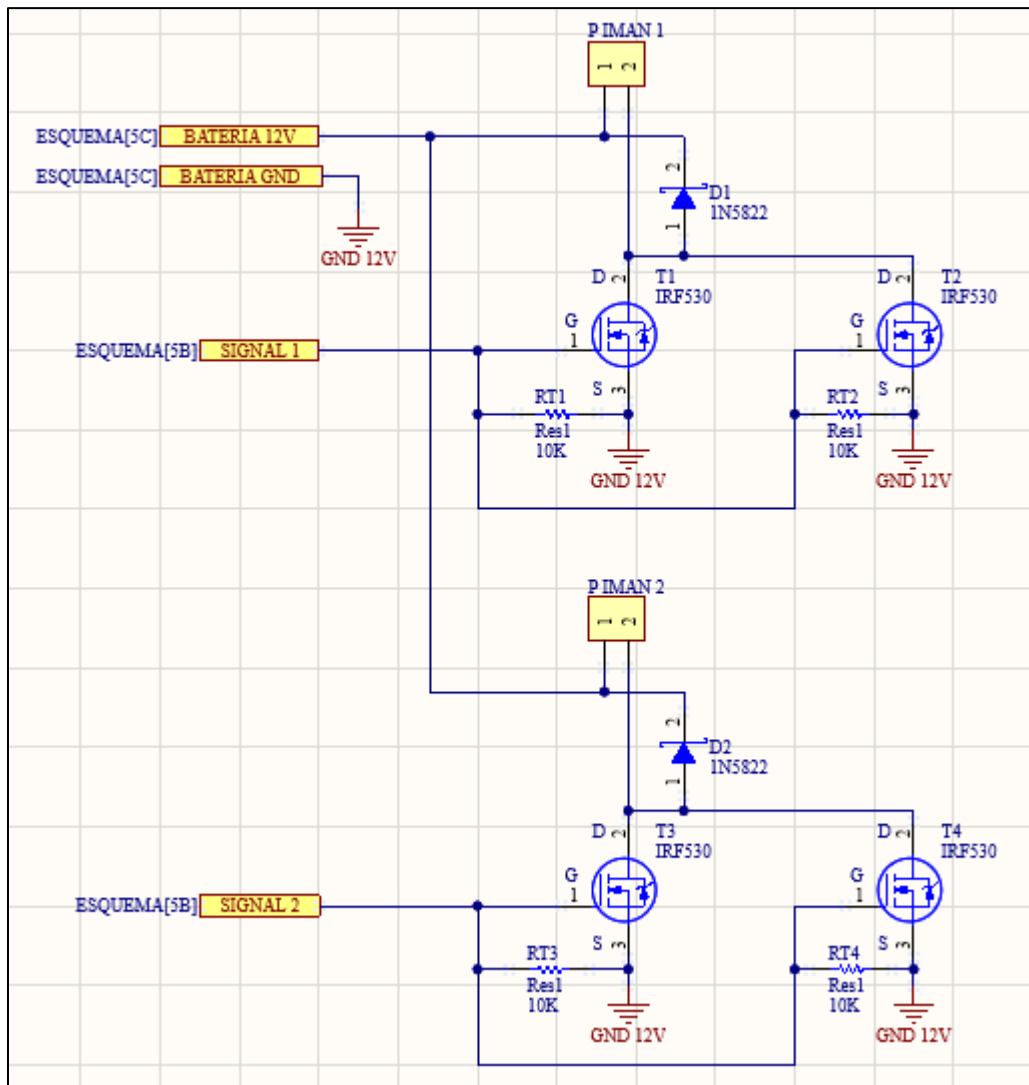


Nota: La figura muestra la etapa de borneras y alimentación, designadas para permitir el acople de los módulos de fuente y fusible. Tanto la fuente aislada como el fusible son modulares.

En las figuras anteriores se describe la etapa de control del PCB, y para continuar a la etapa de potencia, se utilizan los optoacopladores para garantizar la seguridad. Cabe recalcar que la alimentación del controlador será dada por la batería del vehículo.

Figura 53

Etapa de Potencia para Manejo de Electroimanes

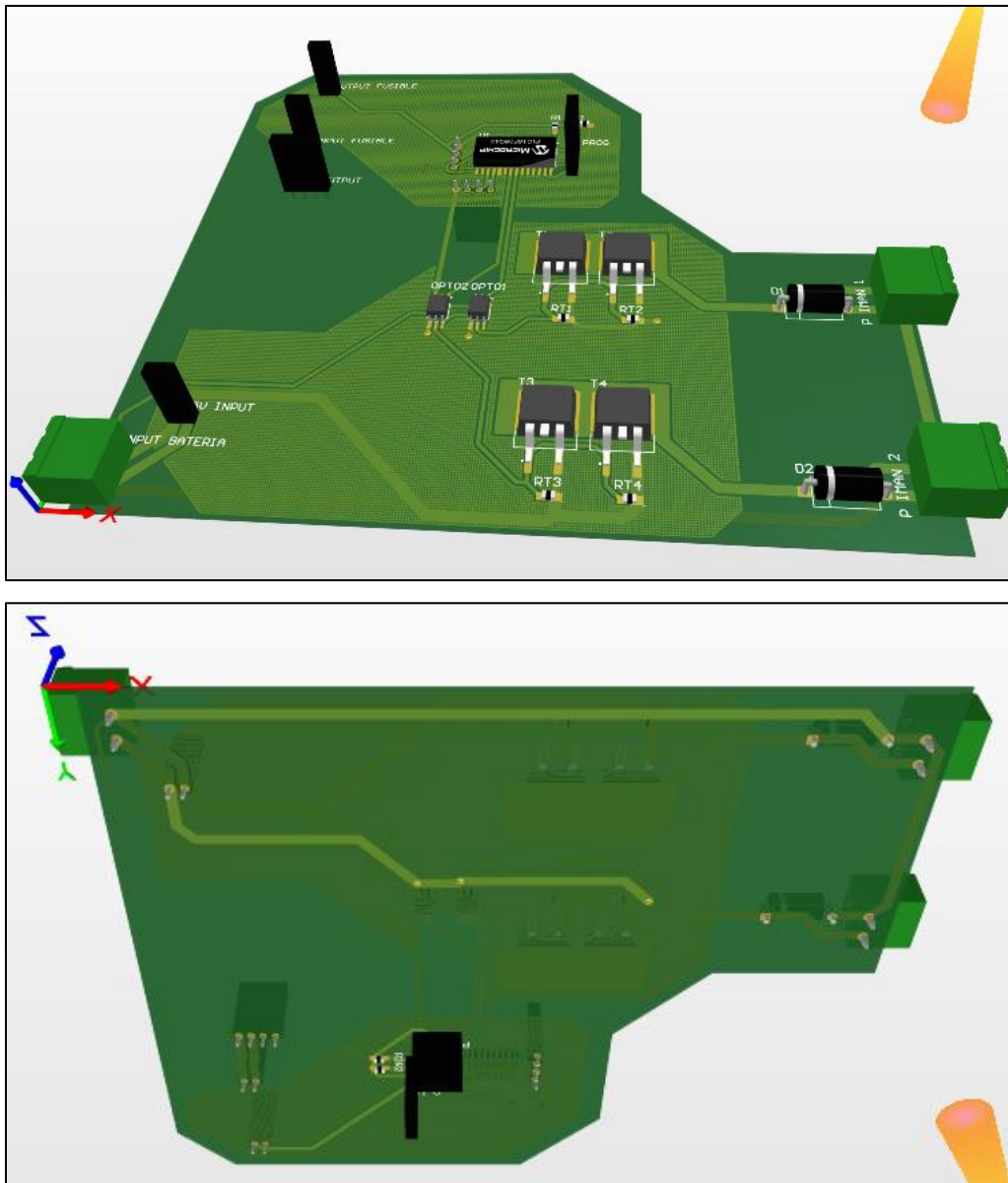


Nota: La interfaz de los electroimanes se maneja mediante la señal PWM del microcontrolador opto acoplada a esta etapa, hacia MOSFETS en paralelo para permitir el flujo de una gran cantidad de corriente, así como diodos que protejan el retorno de la descarga de las bobinas.

Con estos módulos, se diseña un PCB basado en las normas IPC de diseño electrónico. El resultado es el siguiente:

Figura 54

PCB Principal



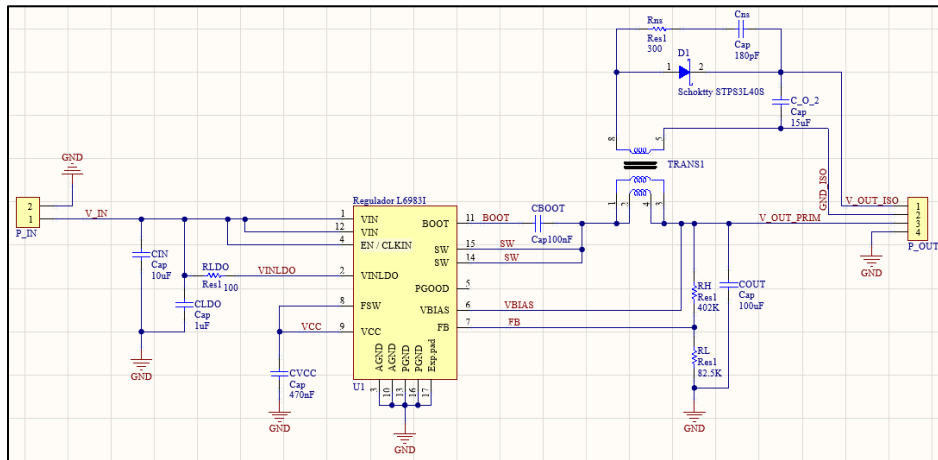
Nota: El diseño, en función de las normas IPC, separa adecuadamente a las etapas, con planos de GND separados, para evitar ruidos entre ambas etapas.

6.6.2. Fuente Aislada

Para garantizar el funcionamiento seguro de la etapa de control, se utiliza una fuente con tierra aislada para alimentar a la etapa de control, y separarla de la etapa de potencia. Esta fuente es la siguiente:

Figura 55

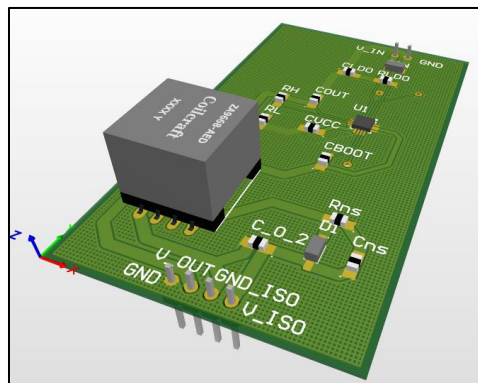
Esquema de la Fuente de Tierra Aislada



Nota: La fuente aísla mediante un transformador la salida de alimentación del circuito de control.

Figura 56

PCB Modular de la Fuente



Nota: La fuente se puede desacoplar, al ser modular, en el caso de que ocurriese un fallo en la misma.

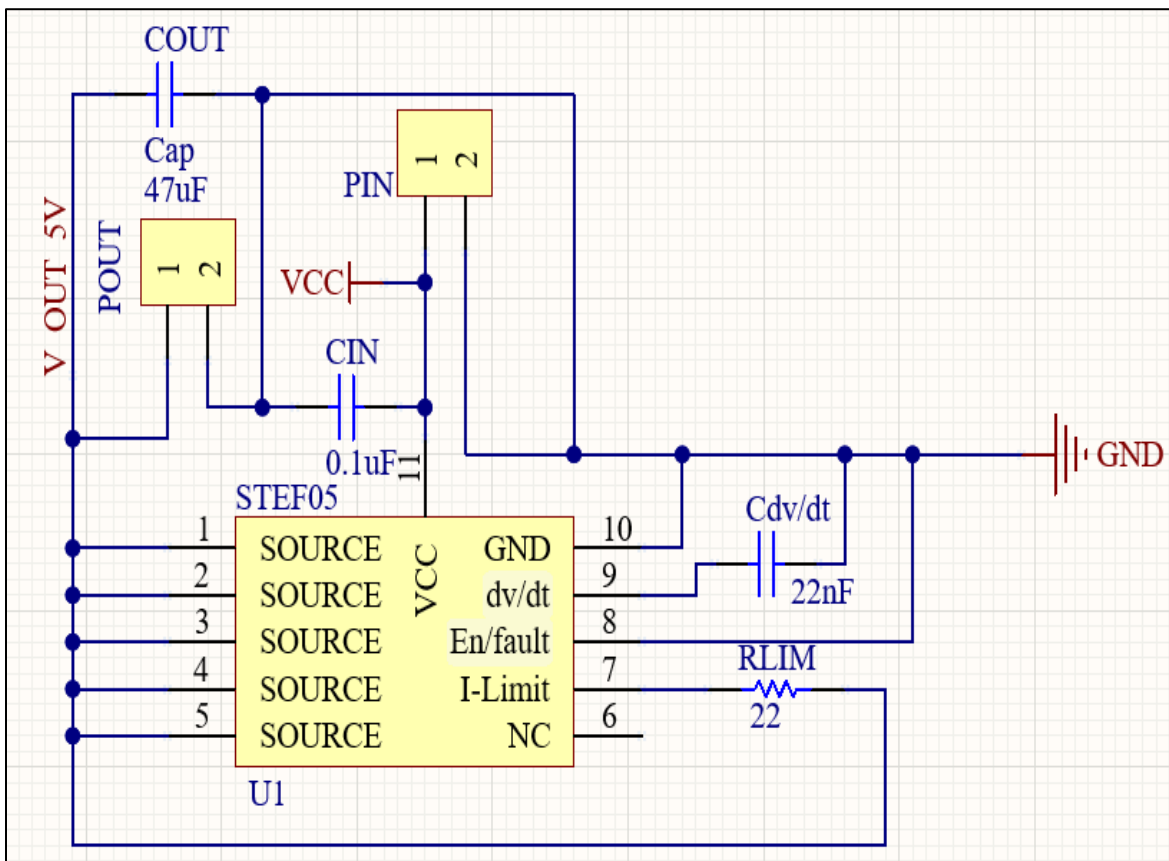
6.6.3. Fusible Electrónico

Para evitar que exista algún tipo de sobretensión o corriente en el circuito, se utiliza un fusible electrónico designado para 5V, para así mantener segura a la etapa de control. Si bien el diseño es modular, el fusible no requiere de ser cambiado en caso de sobretensión o corriente, pues éste mismo entra a reset y vuelve a su condición de funcionamiento adecuada automáticamente al ser corregida la señal.

Su diseño se aprecia en las siguientes figuras:

Figura 57

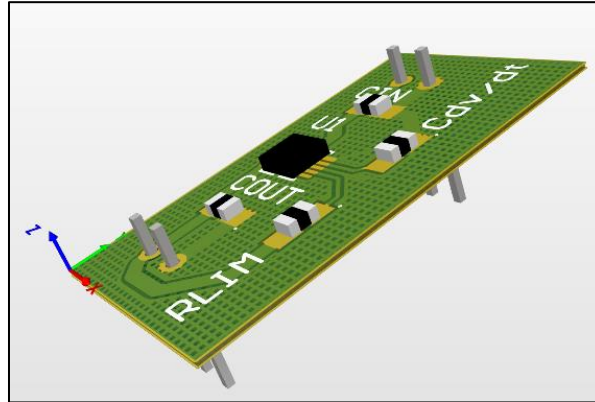
Esquema del Fusible STEF05



Nota: El fusible STEF05 utilizado, permite garantizar la salida a 5V de la etapa de control, y evitando sobretensiones en la etapa de alimentación como si se produjera en el circuito de control.

Figura 58

PCB del Fusible



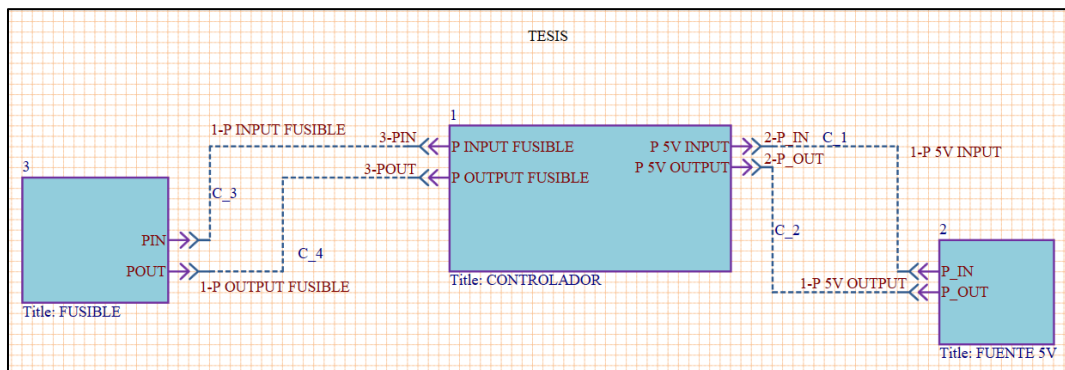
Nota: El fusible, como se indicó anteriormente, a pesar de ser modular, no requiere de cambiarse salvo un caso de un fallo grave en el circuito de control, pues este restaura automáticamente la alimentación tras corregir cualquier sobre tensión o pico de corriente.

6.6.4. Conjunto MULTIBOARD

Con los PCB descritos anteriormente, se arma un proyecto MULTIBOARD que muestre la interconexión de los módulos. En las siguientes figuras, se muestra dicha integración:

Figura 59

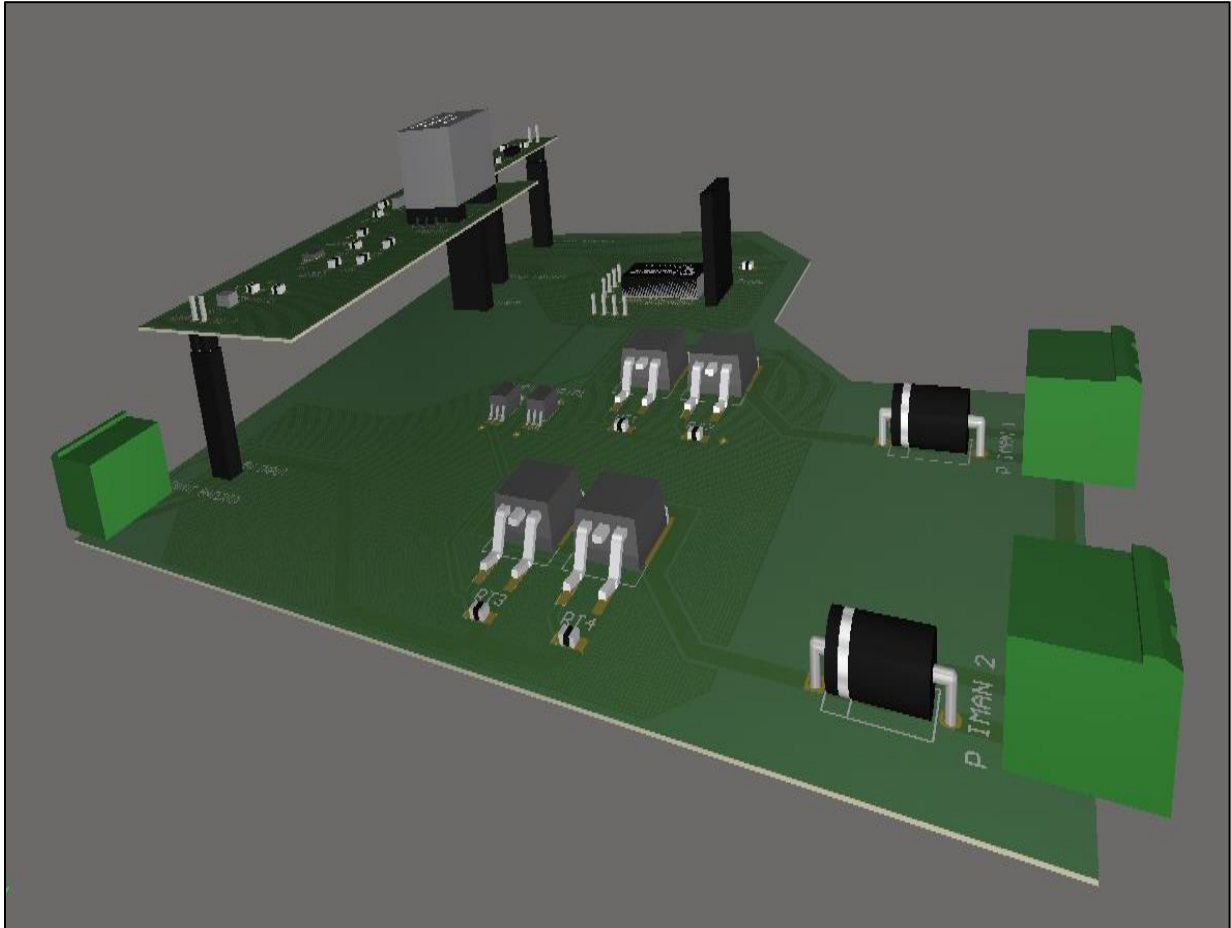
Interconexión Esquemática del Proyecto



Nota: La figura muestra los bloques esquemáticos de interconexión de los módulos, siendo estos los designados para la alimentación y seguridad del PCB principal del control.

Figura 60

PCB MULTIBOARD



Nota: La figura muestra la integración modular de los PCB descritos anteriormente, mostrando el resultado de la propuesta de diseño electrónico, adaptable a las dos propuestas de control.

6.7. Sensor

Para poder obtener el valor de la aceleración, que permite funcionar al sistema de control diseñado, se plantea utilizar un sensor acelerómetro. Este sensor es el ADXL314WBCPZ-RL, el cual puede captar la aceleración de los 3 ejes X, Y y Z, para enviarlos mediante I2C al PCB principal, pudiendo conectar varios en la red I2C. El sensor es el siguiente:

Figura 61

ADXL314WBCPZ-RL



Nota: El acelerómetro pertenece a la marca ANALOG DEVICES, y su capacidad es de hasta 200g (Analog Devices Inc., 2023).

6.8. Propuesta del Diseño 3D

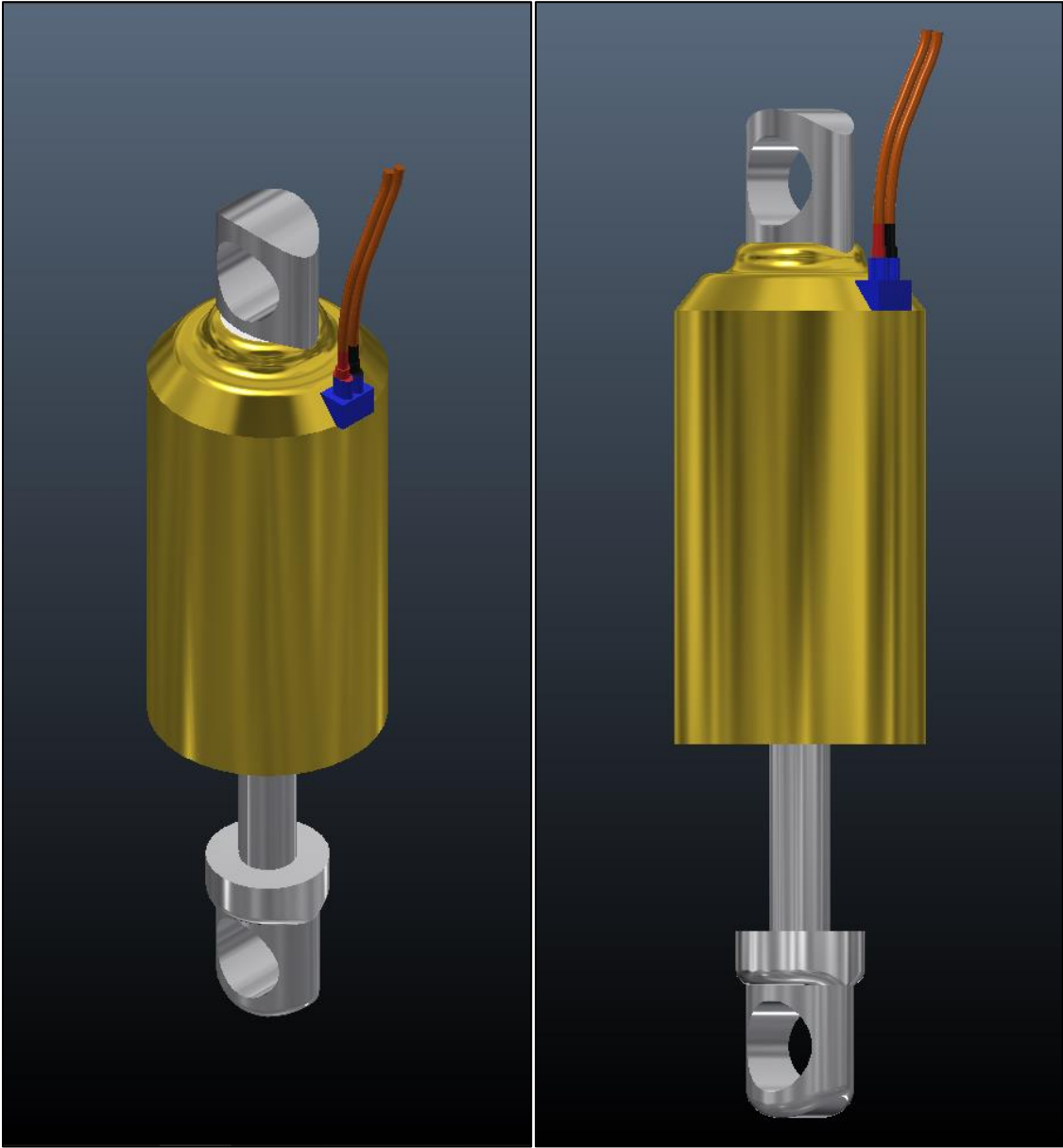
Como un plus a este proyecto de titulación, se ha decidido diseñar los modelos 3D como una propuesta para una implementación futura con un estudio más amplio y específico para el modelado y construcción de estos amortiguadores electromagnético, cabe destacar que las dimensiones de estas propuestas están dimensionadas iguales a los amortiguadores Öhlins que se encuentran instalados en el vehículo Formula SAE Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana.

6.8.1. Primera Propuesta en 3D

Esta primera propuesta está configurada con un solo electroimán, este se encuentra en la parte superior del amortiguador, a continuación, se presenta esta propuesta de diseño 3D:

Figura 62

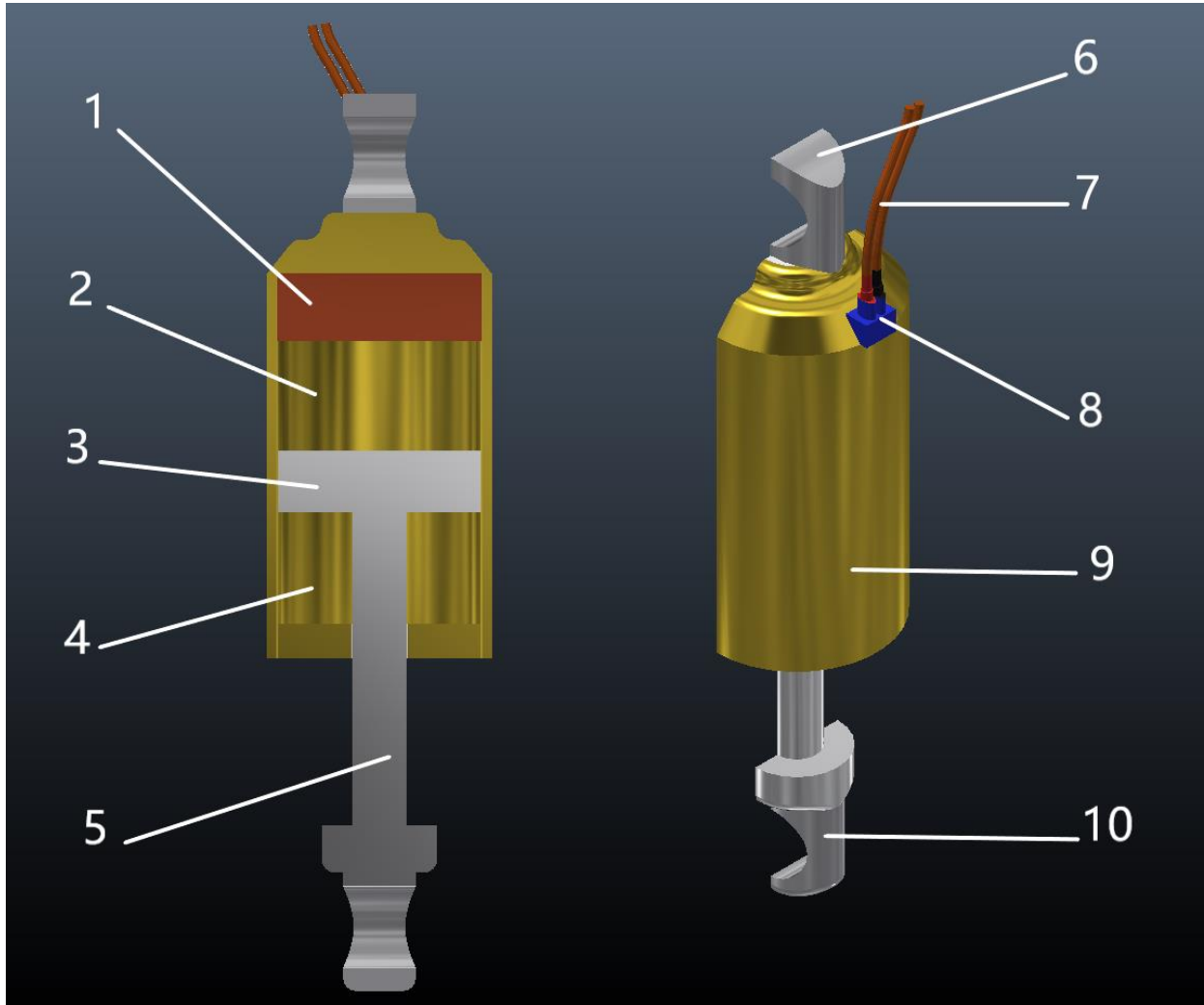
Diseño en 3D de la Primera Propuesta



Nota: La figura muestra el diseño en 3D del amortiguador de la primera propuesta, correspondiente a una vista isométrica y frontal del modelo.

Figura 63

Diseño en 3D de la Primera Propuesta



Nota: En esta figura se destaca lo siguiente: 1) Bobina o Electroimán, 2) Cámara Superior, 3) Pistón, 4) Cilindro Interior, 5) Vástago, 6) Anillo Superior, 7) Cables, 8) Entrada del Circuito (Sensor), 9) Cilindro Exterior, 10) Anillo Inferior.

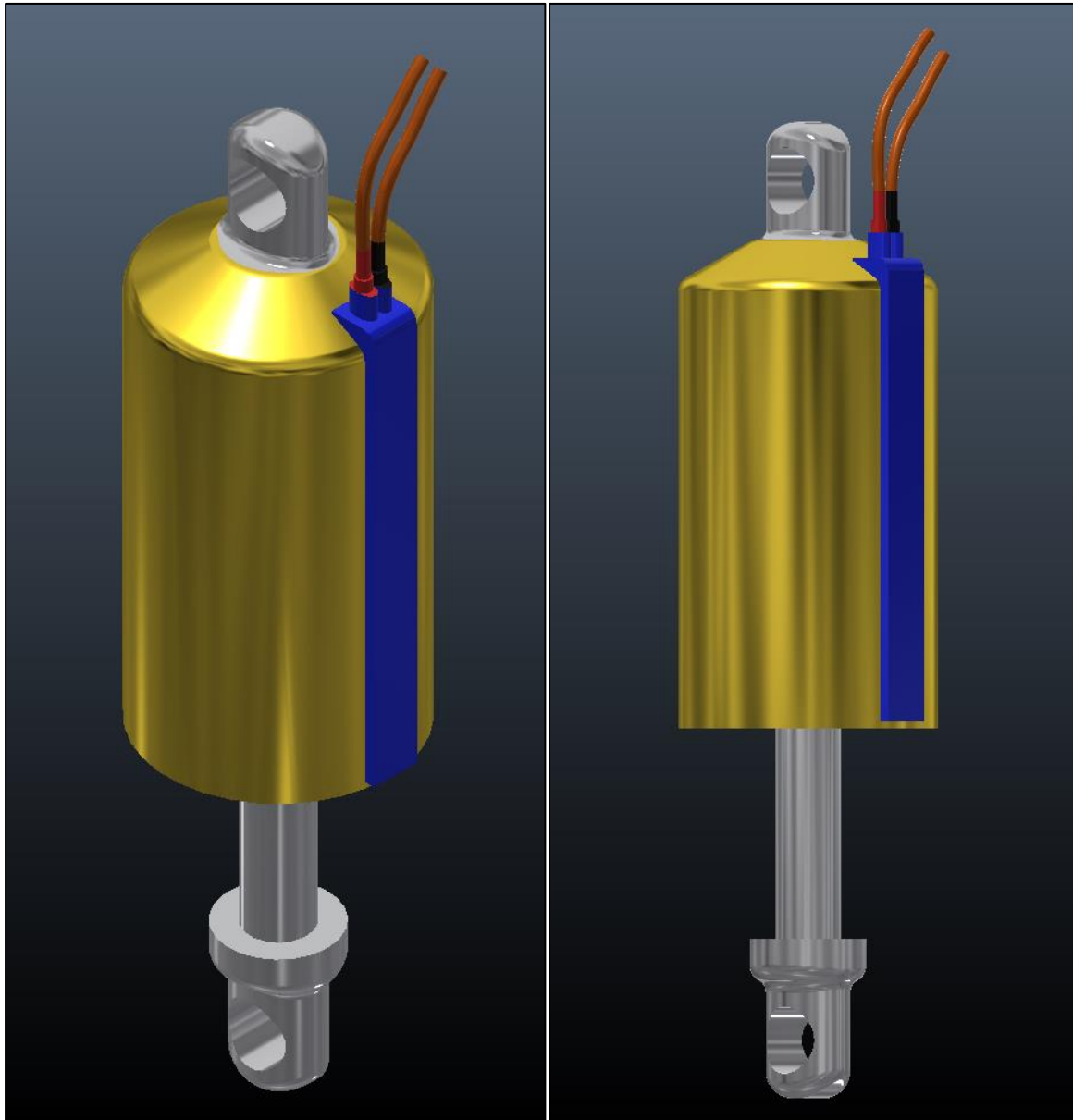
En este diseño 3D se puede destacar que el pistón va a ser un imán permanente para poder atraerse o repelerse del electroimán, también cuenta con una entrada del circuito que puede ser considerada como un sensor, que trabajaría como la entrada de corriente de la bobina a través de los cables que vienen de la placa de control del sistema.

En el apartado de Anexos se encuentran los planos con las dimensiones de esta propuesta.

6.8.2. Segunda Propuesta en 3D

Figura 64

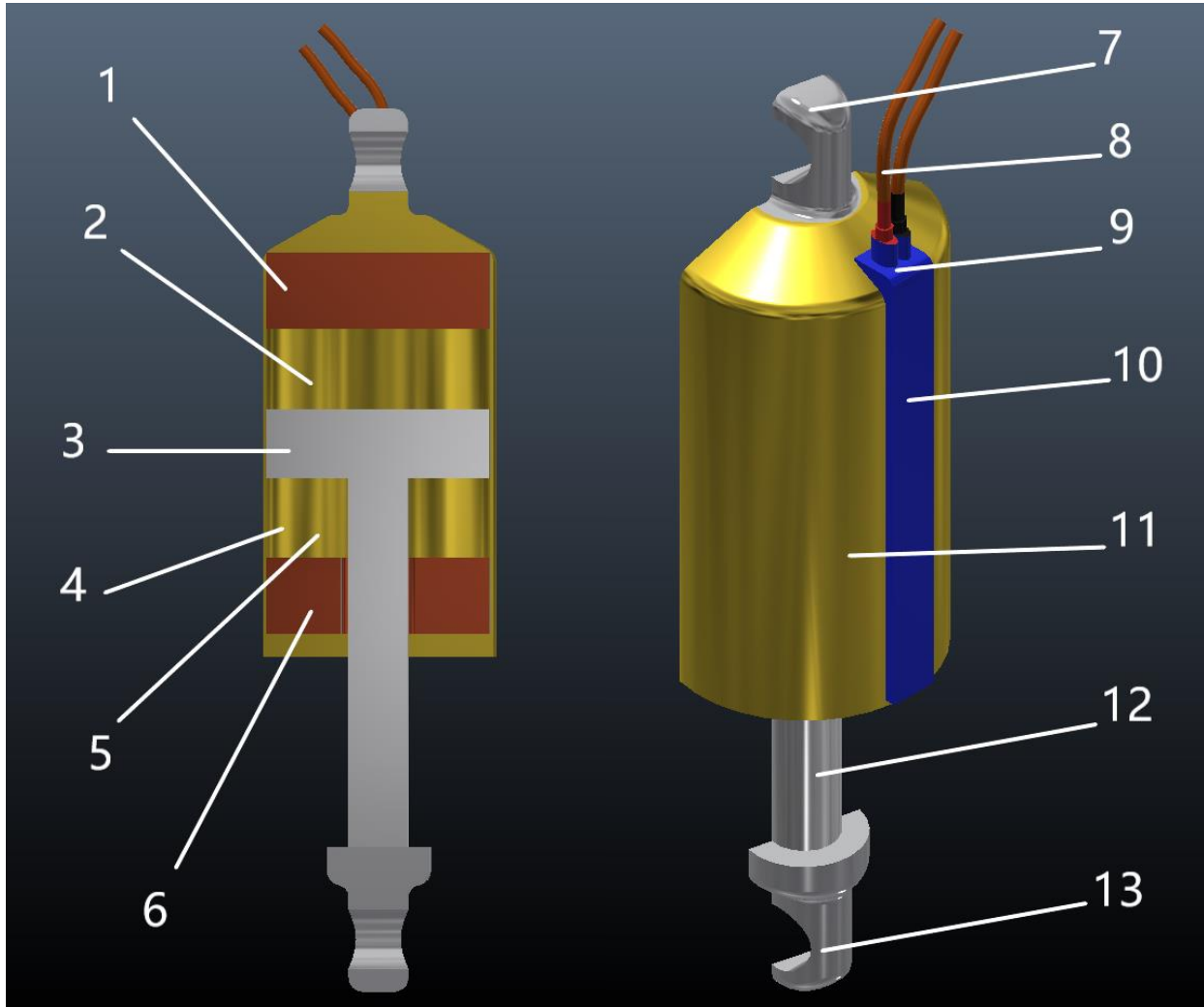
Diseño en 3D de la Segunda Propuesta



Nota: La figura muestra el diseño en 3D del amortiguador de la segunda propuesta, correspondiente a una vista isométrica y frontal del modelo.

Figura 65

Diseño en 3D de la Segunda Propuesta



Nota: En esta figura se destaca lo siguiente: 1) Bobina o Electroimán Superior, 2) Cámara Superior, 3) Pistón, 4) Cámara Inferior, 5) Cilindro Interno, 6) Bobina o Electroimán Inferior, 7) Anillo Superior, 8) Cables, 9) Entrada del Corriente (Sensor), 10) Conducto de Cables, 11) Cilindro Exterior, 12) Vástago, 13) Anillo Inferior.

En este diseño 3D se puede destacar la presencia de dos bobinas; al igual que la primera propuesta, el pistón va a ser un imán permanente para poder atraerse o repelerse de los electroimanes; también cuenta con una entrada del circuito, que puede ser considerada como un

sensor, que trabajaría como la entrada de corriente de la bobina superior y que a través de un conducto se conecta hacia la bobina inferior, todo esto a través de los cables que vienen de la placa de control del sistema.

En el apartado de Anexos se encuentran los planos con las dimensiones de esta propuesta de amortiguador electromagnético.

7. Conclusiones

El proyecto muestra el proceso de investigación bibliográfica de las soluciones existentes a la problemática junto con el desarrollo de los conceptos principales necesarios para comprender el funcionamiento del diseño propuesto. Con esta información, el proceso de diseño radica desde la selección de materiales, uso de modelos matemáticos de la suspensión del vehículo, y la simulación y pruebas de los modelos propuestos para el control. Una vez realizado el control, se determinaron los requerimientos eléctricos y electrónicos para realizar la propuesta de diseño electrónico, utilizando normativas de seguridad electrónica y elementos de calidad para aplicaciones automotrices.

Respecto a las propuestas de control, se concluye que, si bien la segunda propuesta tiene significativamente un mejor comportamiento, su concepto es más compleja de construir; mientras que la primera propuesta es más fácil de fabricar, pero su comportamiento es un ligeramente peor que la segunda; cabe mencionar que la diferencia es ínfima e incluso así siguen siendo superiores en el ámbito de comportamiento favorable versus al sistema de suspensión pasivo actualmente instalado en el vehículo Formula SAE Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana seleccionado para este proyecto.

Hay que mencionar que ambas propuestas presentan grandes resultados frente al sistema de suspensión actual, en iguales condiciones de entrada de pista, ya que la primera propuesta disminuye el desplazamiento actual en un 89.33%, y la propuesta dos disminuye el desplazamiento del chasis en un 100% dado que lo mantiene en cero, mejorando así la condición de estabilidad del sistema mermando las vibraciones y aumentando el confort del vehículo. Esto justificaría una vez más, la implementación futura de estos amortiguadores; cabe destacar que los resultados mostrados

de las pruebas realizadas en los sistemas de control, la entrada de pista fue mayor que la establecida en la prueba hecha al sistema de suspensión convencional usado en el FSAE.

Por su lado, la propuesta de la gestión electrónica realizada a este sistema de control presenta un adelanto significativo para poder construir este sistema de gestión que será el encargado de recibir la señal de comportamiento de la suspensión y así esta se auto calibre o los mecánicos y hasta el mismo piloto puedan hacerla el momento que se requiera.

En relación con los diseños en 3D de estas propuestas, se menciona que la propuesta dos presenta mayor dificultad para manufacturarse que la primera propuesta de diseño, ya que serán necesarios más componentes para el correcto funcionamiento; pero la cantidad de componentes no representa una diferencia compleja en la geometría y aspecto de estos amortiguadores, ya que se logró adaptar un dimensionamiento de las propuestas contra el amortiguador ya instalado en el vehículo FSAE, para que estas sean instaladas de manera precisa, sin ningún inconveniente en este vehículo y actúen de la manera esperada.

También se puede concluir que la bibliografía relacionada a este tema es muy limitada a aplicaciones de formula SAE, y se encuentra enfocada a prototipos pequeños como carros a escala o a control remoto, con un estudio superficial del tema, y no enfocada a vehículos de turismo o competencia, a excepción de propuestas para motocicletas, así que con este proyecto se ha logrado un estudio profundo y conciso de un sistema de control para una suspensión activa posterior electromagnética aplicada a un vehículo de competencia tipo Formula SAE, con las propuestas factibles y funcionales de un sistema de gestión electrónica y los diseños en 3D de estos amortiguadores.

8. Recomendaciones

Se recomienda que, al considerar una posible etapa de implementación para proyectos futuros, optar por la primera propuesta de control, puesto que ésta garantiza un buen comportamiento en el sistema de suspensión con una posibilidad de construcción más fácil y económica que la segunda propuesta de control.

Con respecto al consumo eléctrico, ambas propuestas de control requieren de un consumo considerable de corriente, por lo que se puede considerar un posible cambio a la batería del vehículo a una de mayor capacidad, para que pueda suplir cualquier tipo de requerimiento del sistema de suspensión, como de los sistemas electrónicos del propio vehículo.

Se recomienda un estudio más profundo del sistema de gestión electrónica propuesto para este sistema de control, así como un análisis y diseño más a detalle de los modelos en 3D que también fueron propuestas como un avance a este tema y así sean considerados para una construcción e implementación futura de ambas sugerencias de amortiguadores electromagnéticos para el vehículo Formula SAE Eléctrico o a construcciones posteriores de otros vehículos tipo FSAE de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.

9. Referencias

- Alikaşifoğlu, T. (16 de 02 de 2020). *Electromagnetic Suspension System - Bilkent University EEE 351 Term Project [Archivo de Vídeo]*. Recuperado el 22 de 10 de 2022, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=r5EUpSHBI0E>
- Alikaşifoğlu, T., Yaşar Yavuz, B., & Üçüncü, Y. B. (2019). *Bilkent University - Fall 2019 - EEE 351 Best Project*. Recuperado el 23 de 10 de 2022, de GitHub: <https://github.com/tunakasif/Electromagnetic-Suspension-System>
- Alvarado Palomino, D. (17 de 06 de 2020). El sistema de suspensión activa. *Nitro*. Recuperado el 14 de 09 de 2022, de NITRO.PE: <https://www.nitro.pe/mecanico-nitro/el-sistema-de-suspension-activa.html>
- Analog Devices Inc. (2023). *ADXL314WBCPZ-RL*. Recuperado el 17 de 07 de 2023, de Mouser Electronics.: https://www.mouser.ec/ProductDetail/Analog-Devices/ADXL314WBCPZ-RL?q_s=4ASt3YYao0VqiVnUWLABOQ%3D%3D
- Arévalo, C., Medina, A., & Valladolid, J. (19 de Junio de 2018). *Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de SciELO: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-860X2018000200096&script=sci_arttext
- Arzola de la Peña, N., & Castro Torres, C. A. (14 de Octubre de 2019). *Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de SciELO: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2422-42002019000200010
- Auquilla Ocampo, J. L., & Torres Romero, C. R. (05 de 2016). *DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO FÓRMULA SAE. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO FÓRMULA SAE*. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 23 de 04 de 2023

- Aquilla, J. L., & Torres, C. R. (2016). *Diseño del Sistema de Suspensión de un Vehículo Monoplaza Eléctrico Fórmula SAE*. Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- BRAID USA. (s.f.). *braidusa*. Obtenido de <https://braidusa.com/products/braid-sturace-fsae-wheels-centerlock?variant=39458566635675>
- canalMOTOR. (06 de Noviembre de 2019). *Control de suspensión electrónica: comodidad y seguridad de fábrica*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de MAPFRE: <https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-conduccion/control-de-suspension-electronica/>
- Caraguay, C. A., & Caraguay, S. J. (2015). *Diseño y Construcción del Sistema de Suspensión de un Vehículo Monoplaza para la Competencia Formula Student*. Tesis de Pregrado, Cuenca.
- Fischer, D., & Isermann, R. (25 de 08 de 2003). Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. *ELSEVIER*, 1353 - 1367. doi:10.1016/j.conengprac.2003.08.003
- FORMULA SAE . (s/f). *FSAE History*. Recuperado el 14 de 09 de 2022, de History of Formula SAE: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- García García, V., & García Manrique, J. A. (12 de Septiembre de 2019). *Diseño, fabricación y validación cinemática de la suspensión para un prototipo Formula Student*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de RiuNet REPOSITORIO INSTITUCIONAL UPV: <https://riunet.upv.es/handle/10251/125636>
- GUERRERO ANGULO, A. J. (09 de 2015). MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA DEL ROBOT MÓVIL ANDÁBATA. *MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA DEL ROBOT MÓVIL ANDÁBATA*. Málaga, Málaga, España: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. Recuperado el 20 de 04 de 2023
- Hamid Yaghoubi. (27 de 03 de 2013). Las aplicaciones Maglev más importantes. (Run-Cang Sun, Ed.) *Hindawi - Revista de Ingeniería*, 2013, 19. doi:<https://doi.org/10.1155/2013/537986>

- Hareesh, H., Fahad, M. F., Dhiraj , N., Govind, M., & Pradeep, P. D. (2020). EM-POWERD SUSPENSION SYSTEM FOR MONOSHOCK ABSORBER VEHICLE. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCE RESEARCH AND INNOVATE IDEAS IN EDUCATION*, 6 - 12. doi:16.0415/IJARIIE-11904
- helloauto. (s.f.). *SOLENOIDE*. Recuperado el 30 de 01 de 2023, de Glosario de automoción y mecánica: <https://helloauto.com/glosario/solenoid>
- Hoosier. (s.f.). *Hoosiertire*. Obtenido de <https://shop.hoosiertire.com/racing-tires/dirt-oval/>
- Hurel Ezeta, J., Mandow, A., & García Cerezo, A. (2013). Los Sistemas de Suspension Activa y Semiactiva: Una Revisión. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial RIAI*, 10, 121 - 132. Recuperado el 14 de 09 de 2022
- Hurel, J., Terán, E., Flores, F., Peralta, J., & Flores, B. (19 - 21 de 07 de 2017). Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo. *Global Partnerships for Development and Engineering Educatio*. 15, págs. 1-8. Boca Raton: LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology. doi:<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.295>
- Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, & Ju Lee. (26 de 06 de 2006). Revisión de las tecnologías de trenes maglev. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42, 917 - 1925. doi:10.1109 / TMAG.2006.875842
- MATBASE. (16 de 10 de 2012). *SUPERMALLOY*. Recuperado el 16 de 04 de 2023, de MATBASE: <https://web.archive.org/web/20121016053923/http://www.matbase.com/material/non-ferrous-metals/nickel/supermalloy/properties>
- Maza Rey, J. (Mayo de 2016). *DISEÑO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN PARA VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FORMULA STUDENT*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de Repositorio UNICAN: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8404/384327.pdf?sequence=1>

Medina, W. P., & Morocho, J. F. (2017). *Diseño y Construcción de Manguetas y Cubos de Rueda de un Vehículo de Competencia Fórmula SAE Eléctrico*. Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

Metglas. (27 de 01 de 2012). *Metglas*. Recuperado el 16 de 04 de 2023, de Magnetic Alloy 2714A (cobalt-based):

<https://web.archive.org/web/20120127194344/http://www.metglas.com/downloads/2714a.pdf>

Nonlinear modeling of vehicle suspension system. (28 de Junio de 2000). Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de IEEE Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/878784>

ÖHLINS. (29 de 04 de 2015). *TTX25 MkII*. Recuperado el 23 de 04 de 2023, de ÖHLINS: <https://www.ohlinsusa.com/suspension-products/ttx25-mkii>

Öhlins. (s.f.). *kaz-technologies*. Obtenido de <https://kaz-technologies.myshopify.com/products/fsae-ohlins-ttx25-mkii-650-00>

Otero, A. (16 de 05 de 2018). *La espectacular suspensión electromagnética activa de Bose se estrenará también en coches de calle*. Recuperado el 14 de 09 de 2022, de motorpasion: <https://www.motorpasion.com/tecnologia/la-espectacular-suspension-electromagnetica-de-bose-se-estrenara-tambien-en-coches-de-calle>

RAMOS OCAÑA, R. L. (2019). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE SUSPENSIÓN MAGNÉTICA APLICADO A UN VEHÍCULO A ESCALA PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ DE LA ESPOCH. (Trabajo de titulación - Propuesta Tecnológica)*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, Chimborazo, Ecuador. Recuperado el 13 de 07 de 2023

Renting Finders. (s.f.). *rentingfinders*. Obtenido de <https://rentingfinders.com/glosario/mangueta/#:~:text=La%20mangueta%20de%20direcci%C3%B3n%20es,la%20suspensi%C3%B3n%20y%20la%20direcci%C3%B3n>.

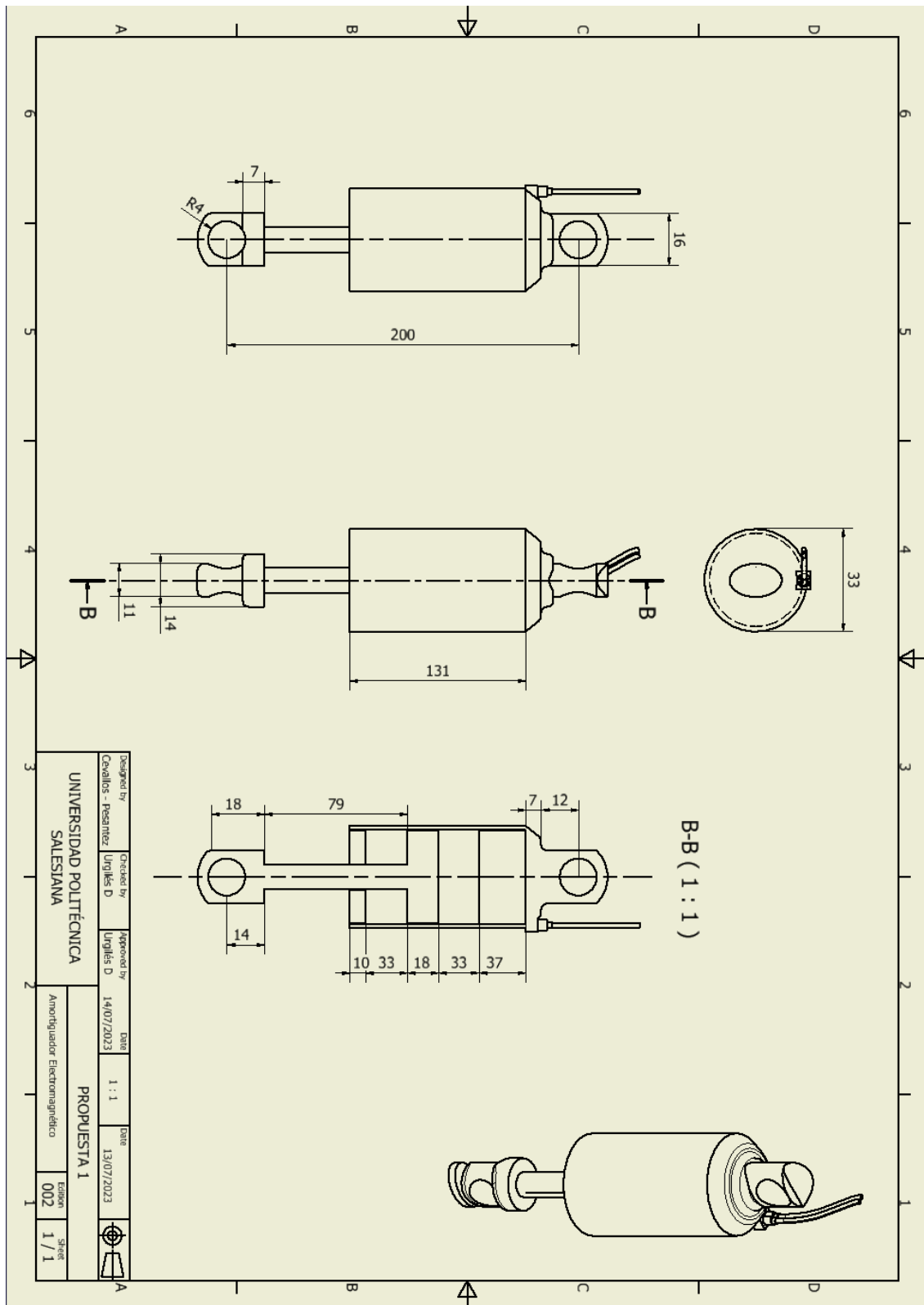
- Rodriguez-Achach, M. (17 de 10 de 2015). *Motor Magnético Reciprocante [Archivo de Vídeo]*. Recuperado el 22 de 10 de 2022, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=8GRpK7etxc0>
- SAE INTERNATIONAL. (21 de 12 de 2021). *2022 FORMULA SAE RULES*. Recuperado el 14 de 09 de 2022, de <https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- SAE International. (01 de 09 de 2022). *FORMUAL SAE Rules 2023*. Recuperado el 23 de 10 de 2022, de SAE International.
- SAE INTERNATIONAL. (s/f). *Student Events*. Recuperado el 14 de 09 de 2022, de Formula SAE®: <https://www.sae.org/attend/student-events/>
- Santos, P. (s.f.). *soymotor*. Obtenido de <https://soymotor.com/articulos/la-tecnica-f1-tu-alcance-que-ha-pasado-mclaren-este-ano-92513>
- Seijo, D. (14 de 02 de 2007). *Suspensión electromagnética de BOSE*. Recuperado el 23 de 10 de 2022, de motorpasion: <https://www.motorpasion.com/videos-de-coches/suspension-electromagnetica-de-bose>
- Staff, O. (23 de 03 de 2021). *onallcylinders*. Obtenido de <https://www.onallcylinders.com/2021/03/23/rod-end-101-what-is-a-heim-joint/>
- twenergy. (15 de 11 de 2019). *El mito del motor magnético y la energía libre*. Recuperado el 25 de 04 de 2023, de twenergy: <https://twenergy.com/energia/energias-renovables/motor-magnetico/>
- UNE. (2014). *UNE-HD 60364-5-52: 2014*. UNE.
- Vega, W., Llanes Cedeño, E., Molina, J., & Rocha Hoyos, J. (30 de Mayo de 2018). *Revisión de las Características de Modelado y Optimización para el Diseño del Sistema de Suspensión Macpherson*. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de SciELO: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000600221&script=sci_arttext
- Vidaurre Garayo, A. J. (03 de 07 de 2018). Campo magnético creado por un solenoide. València, Comunidad Valenciana, España. doi:<http://hdl.handle.net/10251/105169>

Zapata Sánchez, P. M. (09 de 06 de 2011). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ELECTROIMÁN Y ACTUADOR ELECTRÓNICO APLICADO A UN SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA*. doi:<http://hdl.handle.net/20.500.12404/511>

Zhe Li, Ling Zheng, Yue Ren, Yinong Li, & Zhoubing Xiong. (01 de Febrero de 2019). Multi-objective optimization of active suspension system in electric vehicle with In-Wheel-Motor against the negative electromechanical coupling effects. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 545-565. Recuperado el 09 de Agosto de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018304023>

ANEXOS

Anexo A: Planos de la primera propuesta



Anexo B: Planos de la segunda propuesta

