



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera en Mecatrónica /
Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: KATHLEEN XIOMARA GARCIA CUENCA
CHRISTIAN GEOVANNY PAUCAR FERNANDEZ

TUTOR: ING DIEGO RENÉ URGILÉS CONTRERAS, M.SC.

CO-TUTOR: ING. JUAN PAUL ORTIZ GONZALEZ, M.SC.

Cuenca – Ecuador

2023

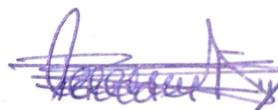
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kathleen Xiomara García Cuenca con documento de identificación N° 1105107997 y Christian Geovanny Paucar Fernández con documento de identificación N° 0106877210; 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, 31 de agosto del 2023

Atentamente,



Kathleen Xiomara García Cuenca
1105107997

Christian Geovanny Paucar Fernández
0106877210

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

Nosotros, Kathleen Xiomara García Cuenca con documento de identificación N° 1105107997 y Christian Geovanny Paucar Fernández con documento de identificación N° 0106877210, 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 delantera aplicado a un vehículo tipo fórmula SAE.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecatrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 31 de agosto del 2023

Atentamente,



Kathleen Xiomara García Cuenca
1105107997



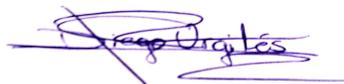
Christian Geovanny Paucar Fernández
0106877210

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego René Urgiles 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 DELANTERA APLICADO A UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA SAE, realizado por Kathleen Xiomara García Cuenca con documento de identificación N° 1105107997 y Christian Geovanny Paucar Fernández con documento de identificación N° 0106877210, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Diego René Urgiles Contreras, M.Sc.
0104431374

Dedicatoria

Kathleen Xiomara

Quiero dedicar el presente trabajo de titulación a mi familia, en especial a madre Beatriz y mi hermana Leslye quienes han sido el pilar fundamental para alcanzar este objetivo, también a mis mejores amigos quienes me han apoyado siempre.

Christian Geovanny

A Dios, quien es el centro de mi vida y el motor que me impulsa a seguir adelante en todo momento, quiero dedicar esta tesis. De igual manera a mi padre Geovanny y mi madre Teresa quienes creyeron en mi capacidad de lograr mis metas y hoy rindieron frutos.

Agradecimientos

Kathleen Xiomara

Quiero agradecer a mi familia por el gran apoyo que siempre he recibido, en especial a mi padre Juan, a mi madre Beatriz por estar siempre presente con sus consejos, valores, enseñanzas y amor incondicional, a mi hermana, quien ha sido un gran ejemplo de dedicación y esmero durante todo el proceso de mi formación universitaria.

Además, agradecer a mis mejores amigos y todas las personas que han estado acompañándome en buenos y malos momentos, han sido fundamentales para mi crecimiento personal y profesional.

También quiero agradecer al Ing Diego Urgiles e Ing Paul Ortiz, por brindar su conocimiento profesional y apoyo para la ejecución y culminación de este trabajo de titulación.

Christian Geovanny

A mis amigos, no puedo expresar en palabras lo agradecido que estoy por su constante apoyo y confianza en mí durante este largo proceso. Han sido mi refugio en momentos de estrés y angustia, siempre dispuestos a escuchar y a brindar palabras de aliento. Gracias por ser mi fuerza motivadora y por compartir conmigo tanto las alegrías como las dificultades.

A mi papá, mamá y hermanos, quienes siempre han creído en mí y me han impulsado a dar lo mejor de mí en todo momento. Gracias por su paciencia, comprensión y amor incondicional. Sus palabras de aliento, recomendaciones y consejos han sido fundamentales para mi crecimiento personal y profesional

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer al Ing Diego Urgiles e Ing Paul Ortiz por su dedicación y compromiso en nuestro trabajo de titulación. Gracias a su experiencia y orientación, pudimos superar los desafíos y alcanzar nuestros objetivos académicos. Sus comentarios constructivos y sugerencias fueron invaluable para nuestro desarrollo académico. Realmente valoramos su tiempo y esfuerzo involucrados.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del problema	3
2.3. Importancia y alcances	3
2.4. Delimitación	3
2.4.1. Espacial o geográfica	3
2.4.2. Temporal	4
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. Formula SAE	5
4.2. Sistema de suspensión	6
4.3. El efecto Ackermann	10

4.4.	Suspensión Activa	11
4.5.	Variables de comportamiento	12
4.5.1.	Ángulo de la rueda	13
4.5.2.	Puntos de Anclaje del chasis	14
4.5.3.	Longitud de los brazos	15
4.6.	Diseño de sistema de Control	16
4.6.1.	Control por realimentación de estados	16
5.	Marco metodológico	22
5.1.	Adquisición de datos	22
5.2.	Diseño de sistema de control	23
5.3.	Propuesta del diseño electrónico	35
5.3.1.	Selección de Actuador y Sensor	36
5.3.2.	Controlador Electrónico	37
5.3.3.	Diagrama de conexión electrónico	39
6.	Resultados	40
6.1.	Adquisición de datos	40
6.2.	Diseño de sistema de control	41
6.3.	Propuesta del diseño electrónico	44
7.	Conclusiones	45
8.	Recomendaciones	46
	Referencias	49
	ANEXOS	50
	Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica	51
	Anexo B: Código Matlab	52

Lista de Tablas

1. Matriz de consistencia 51

Lista de Figuras

1.	Mapa barrio el vecino	4
2.	Resortes para amortiguador	7
3.	Barra de torsión	7
4.	Amortiguador delantero	8
5.	Rotula	8
6.	Neumático de formula1	9
7.	Mangueta de vehículo	9
8.	Ensamble del sistema de suspensión.	10
9.	Efecto ackerman en los vehículos tipo formula1	11
10.	Suspensión activa de vehículo	12
11.	Variable ángulo de la rueda	13
12.	Puntos de sujeción de la suspensión	14
13.	Suspensión push-rod de 4 puntos de anclaje	15
14.	Brazos de suspensión, de longitud corta y larga	16
15.	Representación de diseño de control por realimentación de estados	18
16.	Esquema de realimentación de estados	21
17.	Parámetros del modelo de un cuarto de vehículo	23
18.	Modelo un cuarto de vehículo	24
19.	Respuesta de matrices de estados ante un step	30
20.	Diagrama de bloques.	34
21.	Sistema controlado y no controlado.	35
22.	Actuador Seleccionado	36
23.	Características técnicas del actuador Seleccionado.	37
24.	Unidad de control electrónico	39
25.	Diagrama de conexión electrónico	40
26.	Parámetros del modelado	41
27.	Gráfica del sistema controlado y no controlado con un $s_0 = -8+5.45i$ y $OS = 1\%$	42
28.	Gráfica del sistema controlado y no controlado con un $s_0 = -0.9756 + 0.6655i$ y $OS = 1\%$	43
29.	Gráfica del sistema controlado y no controlado con un $s_0 = -2 + 1.3644i$. y $OS = 1\%$	44
30.	Portada de presentación de Cojali PARTS	45

Resumen

Los objetivos del presente trabajo de titulación es identificar las variables de comportamiento de la suspensión delantera del vehículo tipo formula SAE basados en la literatura existente respecto a los diseños de sistemas de suspensión; diseñar un sistema de control capaz de interpretar los datos adquiridos del comportamiento de la suspensión delantera y elaborar una propuesta del diseño electrónico para el control del sistema de suspensión.

La investigación literaria que se desarrollo esta directamente relacionada con los vehículos monoplaza de tipo formula SAE haciendo que el diseño de control sea más preciso y confiable. Para el diseño de control se utilizó el método de retroalimentación de estados el cual permite especificar todos los polos a lazo cerrado del sistema, lo cual no es posible con los diferentes métodos clásicos.

Ante el diseño de control por el método de retroalimentación de estados se obtuvieron cambios significativos en el comportamiento del sistema de suspensión, puesto que con el nuevo diseño el tiempo de estabilización del sistema se redujo de 6.26s a 3.31s y el sobredisparo del 80% al 2%, entendiéndose este como el sobrepaso en amplitud de la curva al impulso de entrada.

En el momento que el vehículo monoplaza se encienda el controlador empieza a monitorear el comportamiento del sistema de suspensión en tiempo real, de tal manera que detectara si el vehículo se encuentra atravesando obstáculos o tomando curvas y realizara un ajuste en su suspensión para garantizar que el vehículo se mantenga estable sin importar la velocidad a la que circule dando así la oportunidad de realizar adelantamientos al piloto.

Lo que lleva a concluir que se ha logrado cumplir con los objetivos, tomando en cuenta además que estos podran ser validados en su totalidad para garantizar la confiabilidad del diseño propuesto luego de que el sistema se implementado y sometido a pruebas estáticas y dinámicas con condiciones reales.

Palabras clave: Suspensión, Diseño de control, Diseño electrónico, Fórmula SAE.

Abstract

This dissertation aims to achieve the following objectives: firstly, to identify the variables influencing the front suspension behavior of Formula SAE vehicles by conducting a comprehensive review of the existing literature on suspension system designs.

Secondly, to design a control system capable of interpreting the acquired data regarding the front suspension behavior.

Lastly, to develop an electronic design proposal for the suspension system control.

In addition to the literature research conducted in this study focuses specifically on single-seater Formula SAE vehicles, resulting in a more precise and reliable control design. The control design employed the state feedback method, enabling the specification of all the poles in a closed-loop system, a feat unattainable with classical methods.

Through the implementation of the state feedback control method, significant improvements in the suspension system behavior were achieved. These improvements included reducing the system stabilization time from 6.26 seconds to 3.3 seconds and decreasing overshoot from 80% to 2%, understood as the exceeding in amplitude of the curve over the input impulse.

On the other hand, upon activating the single-seater vehicle, the controller continuously monitors the real-time behavior of the suspension system. It detects obstacles and adjusts the suspension accordingly, ensuring vehicle stability regardless of the speed, thus enabling the driver to perform overtaking maneuvers.

To sum up, the objectives of this project have been successfully accomplished. However, validating the proposed design by implementing the system and subjecting it to static and dynamic tests under real conditions is essential to ensure its reliability.

Keywords: Suspension, Control design, Electronic design, Formula SAE.

1. Introducción

La necesidad de la implementación de sistemas de ingeniería más complejos involucra el desarrollo de sistemas que integren componentes que respondan a las necesidades y garanticen confiabilidad y seguridad; es entonces que los sistemas mecatrónicos son una de las respuestas más confiables y robustas para el desarrollo de componentes y subsistemas aplicados en los vehículos, ya sean autónomos eléctricos o aquellos que se desempeñan en el campo de la competición. (Noroña y Gómez, 2019)

Por otra parte, la participación en la Fórmula SAE, los estudiantes de ingeniería genera la oportunidad de diseñar y fabricar un vehículo de carreras utilizando tecnologías Mecatrónicas avanzadas. Esto les permite adquirir experiencia práctica y desarrollar habilidades en diversas áreas, como la programación de sistemas electrónicos, el diseño y control de sistemas mecánicos, la integración de sensores y actuadores, entre otros. (Martínez Roig, 2021)

Esta interacción entre la Fórmula SAE y la Mecatrónica en la industria automotriz es crucial ya que impulsa la innovación y el avance tecnológico en el sector. La aplicación de la Mecatrónica en la industria automotriz tiene numerosos beneficios, uno de ellos es la mejora en la eficiencia y rendimiento de los vehículos. (Martínez Roig, 2021)

La integración de sistemas Mecatrónicos en los vehículos permite optimizar el funcionamiento de diferentes componentes, como la suspensión, el sistema de dirección, los frenos y la transmisión. Esto resulta en un mejor rendimiento, mayor seguridad y una experiencia de conducción más cómoda para los usuarios. (Colomer Romero, 2013)

Finalmente, el presente proyecto tiene como objetivo elaborar una propuesta de diseño de un sistema de control para una suspensión delantera aplicado a un vehículo monoplace tipo Fórmula SAE, enfocado en la mejora de la estabilidad y rendimiento del vehículo en pista.

2. Problema

2.1. Antecedentes

La industria automotriz se encuentra en una constante evolución y busca la perfección con sus investigaciones y avances, los cuales se acercan cada día más a formar parte de sistemas mecatrónicos, a partir de esto surgen necesidades, en cuanto a la sinergia de las áreas que conforman el diseño, fabricación y ensamblaje, de nuevas tecnologías y metodologías que las satisfagan, como ejemplo el correcto proceso para diseños confiables de componentes de alta complejidad como es el sistema de suspensión.

Para el diseño de una suspensión de vehículo de competición se debe evaluar en primera instancia las características y especificaciones del vehículo en la que se instalará la suspensión, la misma deberá cumplir con 2 propósitos muy importantes que son mejorar el rendimiento y la estabilidad del vehículo durante la conducción garantizando la elasticidad del sistema con el fin de evitar que la irregularidad del suelo provoque golpes secos que se transmitan al chasis y a su vez al conductor.

La Universidad Politécnica Salesiana posee dos vehículos tipo Formula SAE, un monoplaza a combustión interna y un eléctrico, este último presenta mejoras por sus características de diseño. El presente proyecto se enfoca en el vehículo monoplaza eléctrico, el mismo cuenta con una suspensión netamente mecánica lo cual se convierte en una limitante en la interacción y la regulación, debido a que es totalmente mecánica y durante la puesta a punto del vehículo cualquier cambio que requiera el mismo, hará necesario detenerlo dando como resultado pérdidas de tiempo lo que minimizan el rendimiento en pista del monoplaza durante la carrera.

Cuanto más rápido vaya un vehículo monoplaza tipo Formula SAE, la fuerza aerodinámica generada es alta. Cuando viaja a altas velocidades, puede generar una grandes cargas descendentes conocidas como fuerzas G.

Por lo tanto, la suspensión tiene que lidiar con carga adicional que ponen en riesgo la estabilidad cuando el automóvil avanza a alta velocidad. Siendo esto un desafío en relación a la carga que debe soportar la suspensión, sino que también para la aerodinámica.

Para que el concepto aerodinámico funcione, la posición del automóvil en relación con

la pista es altamente importante: al subir o bajar unos milímetros, el flujo de aire varia drásticamente, haciendo que los componentes aerodinámicos importantes como el suelo y el difusor sean menos efectivas.(Plaza, 2019a)

2.2. Descripción del problema

El vehículo monoplaza eléctrico en su diseño actual posee un sistema de suspensión netamente mecánica, la cual requiere de un ajuste antes de cada carrera y este se lo lleva de forma manual a prueba y error basándose en el background del piloto, representando una pérdida de tiempo para el piloto y para el equipo de mecánicos; por ello ha surgido la necesidad de mejorar el sistema de suspensión para hacer que los vehículos sean más eficientes.

En relación con esto, surge el trabajo de titulación en el diseño del sistema de control para una suspensión activa delantera aplicado a un vehículo tipo Formula SAE, el cual se ajustará a las necesidades, mejorando la estabilidad y rendimiento del monoplaza.

2.3. Importancia y alcances

- El presente proyecto presenta una propuesta para el diseño de un sistema de control para una suspensión activa delantera para un vehículo tipo Formula SAE, el cual evaluará la masa suspendida con respecto a las irregularidades del camino para realizar una calibración de la suspensión adecuada a la pista.
- El diseño del sistema de control va dirigido a mejorar la respuesta, estabilidad y rendimiento del vehículo monoplaza tipo formula SAE perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana, el cual se encuentra en fase de rediseño e innovación.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El proyecto propuesto se encontrará dentro del barrio El Vecino en la Ciudad de Cuenca provincia del Azuay, Ecuador (Figura 1).

Figura 1

Delimitación espacial.



Nota: Se observa el barrio El Vecino ubicado en la ciudad de Cuenca, Azuay, Ecuador.

2.4.2. Temporal

El proyecto se desarrollará a lo largo de Trabajo de titulación 1 y Trabajo de titulación 2, con un total de 400 horas.

2.4.3. Sectorial o institucional

El proyecto se desarrollará en la Universidad Politécnica Salesiana.

2.5. Problema General

¿Cuál es el diseño idóneo de un sistema de control para una suspensión activa delantera aplicada a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Cómo se podría identificar las variables de comportamiento de la suspensión delantera del vehículo tipo formula SAE basados en la literatura existente respecto a los diseños de sistemas de suspensión?

- ¿Cuál es el diseño idóneo de un sistema de control capaz de interpretar los datos adquiridos del comportamiento de la suspensión delantera aplicada a un vehículo formula SAE?
- ¿Cómo se podría elaborar una propuesta adecuada del diseño electrónico para el control de la suspensión delantera de un vehículo tipo formula SAE?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de control para una suspensión activa delantera aplicada a un vehículo monoplaaza tipo fórmula SAE.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las variables de comportamiento de la suspensión delantera del vehículo tipo formula SAE basados en la literatura existente respecto a los diseños de sistemas de suspensión.
- Diseñar un sistema de control capaz de interpretar los datos adquiridos del comportamiento de la suspensión delantera aplicada a un vehículo formula SAE.
- Elaborar una propuesta del diseño electrónico para el control de la suspensión delantera de un vehículo tipo formula SAE.

4. Marco Teórico

4.1. Formula SAE

La Formula SAE (Society of Automotive Engineering) inicia en 1982 en Estados Unidos bajo el patrocinio de la Sociedad de Ingenieros de Automoción, donde su objetivo principal es involucrar a estudiantes universitarios de todo el mundo en el diseño, construcción y puesta a punto de un vehículo tipo Formula 1.

- **Clase 3** Clase de entrada para los equipos nuevos, en la cual participan únicamente vehículos en fase de diseño y validación del modelo. Como norma general y para fomentar el progreso, un equipo no se puede presentar a esta categoría dos años consecutivos, teniendo que hacerlo en las superiores. Se permiten excepciones para aquellos equipos que se presenten a las clases 2 o 1. Únicamente puntuando las pruebas de diseño, presentación y coste.

- **Clase 2** Esta categoría está pensada para equipos que hayan pasado los conceptos básicos del diseño inicial y hayan logrado fabricar un vehículo completo. El mínimo requisito de entrada en esta categoría es disponer de un chasis completo. Al igual que en la categoría 3, los equipos que hayan participado un año en esta categoría han de avanzar a la siguiente el próximo año.

- **Clase 1** En esta categoría participan monoplazas totalmente construidos y que son capaces de moverse. Es la categoría más importante de todas, y un mismo auto solamente puede participar en ella durante los 12 meses siguientes a la primera competición en la que participa. Esta regla fomenta a los equipos a progresar y fabricar cada vez nuevos vehículos. Se permite aprovechar los componentes de monoplazas antiguos, salvo el chasis. Dentro de la categoría existen las llamadas «series 200», en la que pueden participar vehículos de hasta 2 años de antigüedad.(Nebrija, 2022)

4.2. Sistema de suspensión

Elementos de un sistema de suspensión

- **Resortes:** Son un elemento elástico que permiten un movimiento relativo vertical entre el chasis y las ruedas, se visualiza en la Figura 2.

Figura 2

Resortes para amortiguador



Nota: Se visualiza un par de resortes para amortiguador

- **Barras de torsión:** Las barras de torsión cuentan con uno de sus extremos fijo y el otro móvil, es decir, uno de sus extremos permite el movimiento giratorio sobre uno de los ejes, favoreciendo la estabilidad del automóvil, mientras que el otro permanece inmóvil, se observa en la Figura 3.

Figura 3

Barra de torsión



Nota: Se visualiza una barra de torsión

- **Amortiguadores:** Se ubican entre el chasis y las ruedas, protege de impactos y vibraciones, reduce las oscilaciones del sistema de suspensión. Se lo puede apreciar en la Figura 4.

Figura 4

Amortiguador delantero



Nota: Se visualiza el amortiguador delantero

- **Rotulas:** Las rotulas se usan en las uniones móviles del sistema de suspensión y permiten el movimiento controlado en toda dirección, hacia arriba, abajo y giro de las ruedas del vehículo cuando la suspensión está en movimiento. Se lo puede observar en la Figura 5.

Figura 5

Rotula



Nota: Se visualiza la rótula

- **Neumáticos:** Expresa que los neumáticos se encargan de absorber las vibraciones producidas por las irregularidades del terreno y garantizar una adherencia hacia la misma. Se lo puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6

Neumático de formula1



Nota: Se visualiza el neumático de formula1

- **Manguetas:** Dice que es el elemento que contiene el vástago sobre el que gira la rueda y la conecta con el resto de elementos de la suspensión. Se lo puede apreciar en la Figura 7.

Figura 7

Mangueta de vehículo



Nota: Se visualiza la mangueta de vehículo

En la Figura 8 se presenta un ensamble de las partes de sistema de suspensión.

Figura 8

Ensamble del sistema de suspensión.



Nota: Se visualiza el ensamble del sistema de suspensión. obtenido de (Plaza, 2019b)

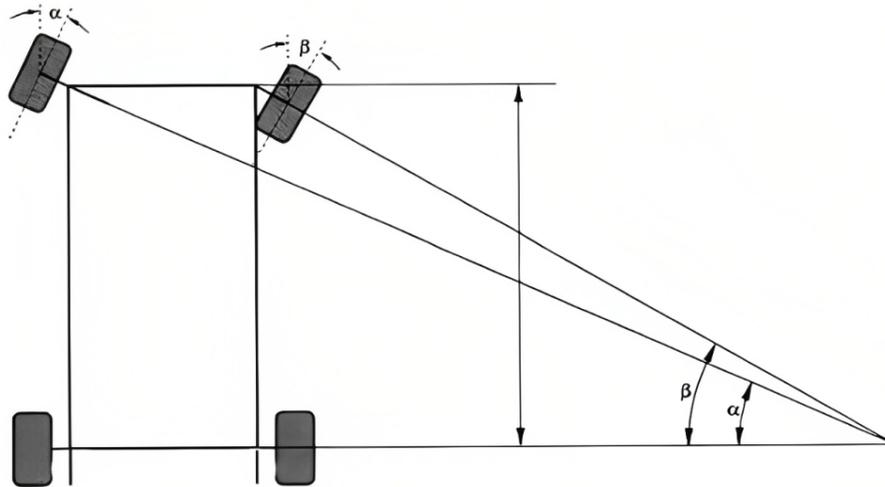
4.3. El efecto Ackermann

Como se puede observar en la Figura 9, El efecto Ackermann es la geometría de los sistemas mecánicos de dirección de los automóviles diseñados para compensar el movimiento de las ruedas exteriores e interiores en círculos de diferentes radios al tomar una curva.

Este principio establece que cuando un vehículo gira en una curva, los ejes de todas las ruedas deben converger en un punto, el centro de giro del vehículo. Para lograr esto, se diseña la geometría de la dirección de tal manera que las ruedas delanteras giren en ángulos diferentes para lograr el efecto deseado. Además, se ajusta para cada prueba de la competición para lograr el Ackerman puro para la curva más cerrada del circuito (Isaac, 2020).

Figura 9

Efecto ackerman en los vehículos tipo Formula 1



Nota: Se visualiza el efecto ackerman en los vehículos tipo Formula 1

4.4. Suspensión Activa

La suspensión activa es aquella que cuenta con los sistemas y sensores necesarios para controlar de forma independiente la amortiguación de cada rueda mediante una unidad de control electrónico. Para que los automóviles sean eficientes y seguros, es importante optimizar el agarre de los neumáticos sobre el asfalto. Esto se logra mediante una serie de pasos que afectan los neumáticos y la suspensión del vehículo.

En primer lugar, los neumáticos deben estar en buen estado, ya que son el único elemento que conecta el vehículo con la carretera, sin embargo, la suspensión tiene que funcionar de manera eficiente, de lo contrario, el neumático perderá contacto con el asfalto cuando ruede sobre un bache (Plaza, 2019b).

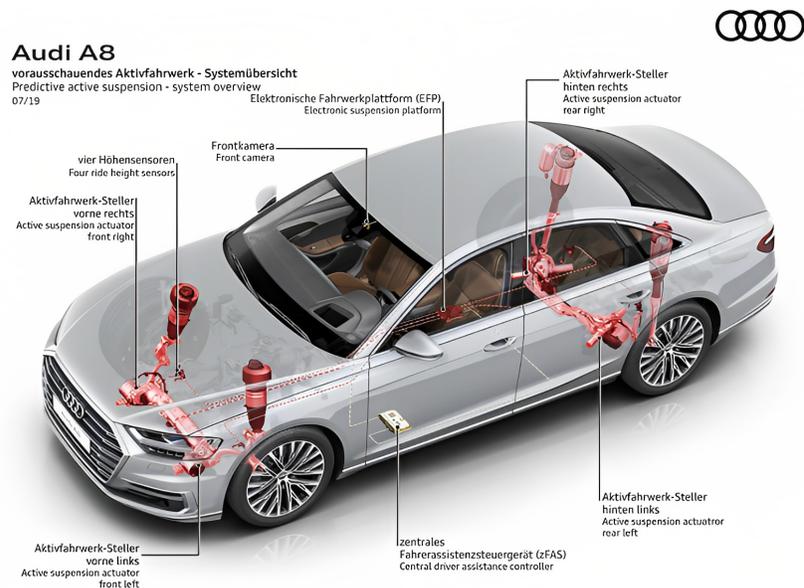
La suspensión cumple un papel importante en la dinámica del automóvil, que está relacionado con la seguridad y el confort de los ocupantes, pero también afecta la estabilidad dinámica del automóvil, la vibración mecánica y la capacidad de control del conductor, debido a esto, los movimientos verticales de cada neumático se transmiten a través de la suspensión

(¿Qué Es La Suspensión Inteligente?, 2020).

Por otro lado, la suspensión activa (Figura 10) se diferencia de un sistema tradicional en que tiene un mejor control de todos los elementos de la misma, como resortes, ballestas, barras de torsión y elementos que permiten amortiguar el automóvil. Los sistemas de suspensión pasiva no pueden adaptarse a las diferentes condiciones de la carretera.

Figura 10

Suspensión activa de vehículo



Nota: Se visualiza Audio A8, obtenido de (*Suspensión Activa Predictiva*, 2020)

4.5. Variables de comportamiento

Las variables de comportamiento son aquellas pertenecientes al sistema de suspensión, la cuales son medidas con instrumentos con el fin de registrar su comportamiento de manera digital.

4.5.1. Ángulo de la rueda

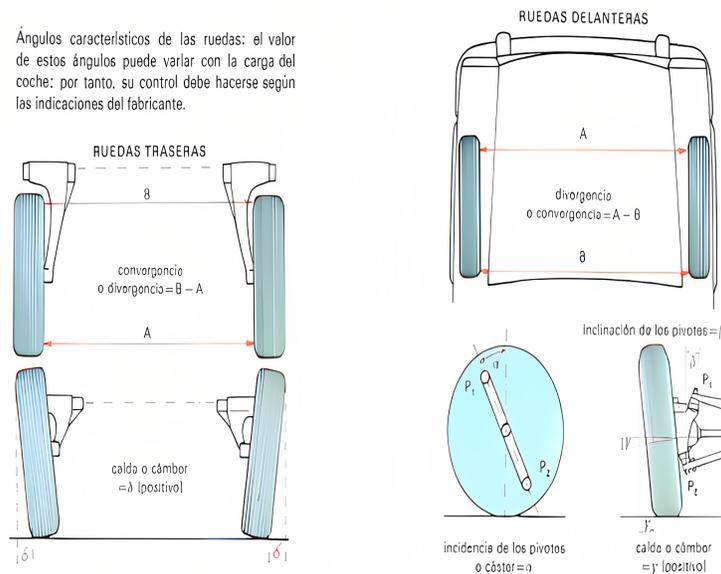
Las ruedas del automóvil no están completamente verticales o paralelas al eje longitudinal del automóvil. Los volantes no giran alrededor de un eje vertical, sino alrededor de un eje inclinado.

Los ángulos que forman las ruedas y los ejes de las rótulas con los planos horizontal y vertical ayudan a conseguir las mejores condiciones de conducción, esto evita el arrastre y desgaste de los neumáticos, mejora la estabilidad, hace que el esfuerzo sea suave y progresivo en la dirección, y facilitar el mismo retorno después de la curva.

Como se observa en la Figura 11, el ángulo de convergencia de las ruedas se da entre los planos centrales de las ruedas y el eje longitudinal del vehículo. Cuando dos rectas se acercan a la parte delantera del vehículo, se produce el ángulo de convergencia; cuando se separan, se produce la separación (MotorGiga, 2018).

Figura 11

Variable ángulo de rueda



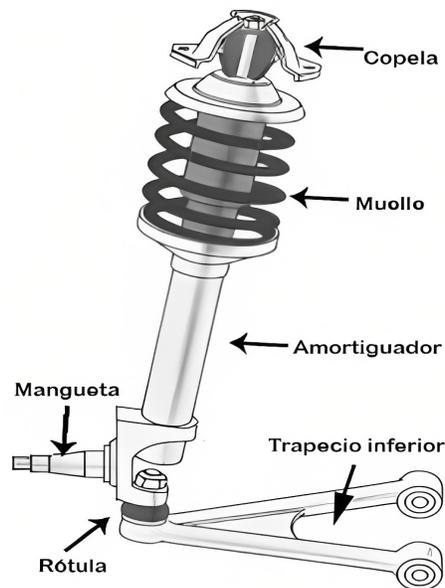
Nota: Se observa el tipo de ángulos en las ruedas. (MotorGiga, 2018).

4.5.2. Puntos de Anclaje del chasis

Los puntos de anclaje observados en la Figura 12, son aquellos que mantienen al sistema de suspensión unido al chasis del automóvil. Este tipo de sujeciones no son estáticas, ni fijas, esto debido a que el sistema de suspensión requiere de ciertos grados de libertad para desempeñar un óptimo funcionamiento, de tal manera que se usan rotulas y/o juntas móviles (Plaza, 2019b).

Figura 12

Puntos de anclaje del chasis



Nota: Se visualiza las partes y puntos de sujeción que posee una suspensión convencional. (MB402022 Sistema de Suspensión, 2019).

En el caso de un vehículo monoplaza los puntos de anclaje al chasis son diferente, el sistema de suspensión que posee es mas complejo y sus componentes son diferentes. Esto debido a que un vehículo de competencia como es el monoplaza requiere el mínimo peso y máximo desempeño.

Push-rod es un tipo de suspensión empleado en la formula SAE, el cual trabaja bajo el principio de compresión de un amortiguador, existen diferentes diseños de suspensión Push-rod, pero todos trabajan bajo el mismo principio, por lo que, este tipo de suspensión

posee 4 puntos de anclaje al chasis, 2 del trapecio inferior y 2 del trapecio superior como se observa en la Figura 13 (Alvarado, 2017).

Figura 13

Suspensión push-rod de 4 puntos de anclaje



Nota: Se observa la suspensión push-rod de 4 puntos de anclaje. (González, 2009).

4.5.3. Longitud de los brazos

Los brazos de suspensión (también conocidos como brazos de control de oruga o brazos oscilantes) son dispositivos de suspensión articulados que conectan el chasis a la suspensión que soporta las ruedas (Figura 14).

Un brazo de suspensión conectado a un solo brazo de pivote permite ajustar la posición del extremo exterior mientras se mantiene la holgura radial desde el soporte interior.

La longitud de los brazos de suspensión es uno de los criterios mas fuertes en un diseño, ya que si la longitud de los brazos es corta el confort se vera afectado al momento que el vehículo pase por baches, además, el recorrido del amortiguador también sera reducido, mientras que si la longitud de los brazos es larga, el vehículo poseerá una mejor estabilidad al pasar baches o irregularidades puesto que el recorrido del amortiguador sera mayor y mas suave. En la

Figura 14, se puede observar la diferencia de tamaños.

Figura 14

Brazos de suspensión, de longitud corta y larga



Nota: Se aprecia la diferencia de longitud, entre los brazos cortos y largos. (Barrientos, Cruz, Peñín, y Balaguer, 2007).

4.6. Diseño de sistema de Control

4.6.1. Control por realimentación de estados

La realimentación de estados es una técnica de control de sistemas dinámicos que se basa en el modelado del sistema en términos de variables de estado, que son variables que describen completamente el estado interno del sistema en cualquier momento dado.

En este tipo de control, se utiliza la información de las variables de estado del sistema para calcular la señal de control necesaria para lograr un comportamiento deseado. La realimentación se utiliza para comparar la salida real del sistema con la salida deseada, y ajustar la señal de control en consecuencia.

El control por realimentación de estados es una técnica avanzada de control que permite el diseño de controladores robustos y adaptativos capaces de controlar sistemas complejos no lineales. Esta técnica se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, incluido el control de procesos industriales, el control de vehículos autónomos y el control de sistemas electrónicos de potencia.

Pasos para realizar un diseño de control por realimentación de estados

■ **Representación en variables de estado:**

La representación del sistema en variables de estado esta dado por:

$$\dot{x} = A(x) + B(u) \quad (1)$$

$$y = C(x) + D(u) \quad (2)$$

Donde:

En la Ecuación 1:

- A= Matriz de estado.
- B= Matriz de entrada

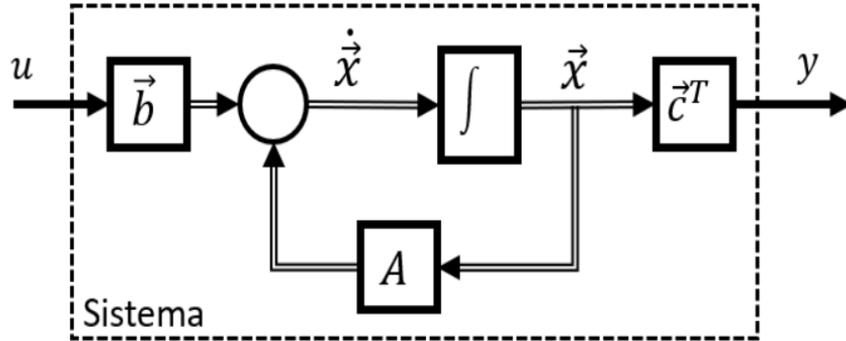
En la Ecuación 2

- C= Matriz de salida
- D= Matriz de Transmisión directa

En la Figura 15, se observa el diagrama de bloques del sistema de control por realimentación de estados.

Figura 15

Esquema de diagrama SISO en variables de estado



Nota: Se observa el esquema de diseño de control por realimentación de estados (Castaño, 2020).

Según Rudolf Kalman (1960) "Las entradas del sistema deben ser computadas usando el vector de estados.", el cual inicia desde la idea de que para la ley de control se parte de una función de estado (Páramo Carranza, 2021):

$$u(t) = k \vec{x}'(t, t) \quad (3)$$

Luego procedió a hacer algunas suposiciones donde la función sería independiente del tiempo y que podría ser una función lineal con un signo menos colocado antes de k para indicar una retroalimentación negativa:

$$u(t) = -k \vec{x}'(t), \vec{x}' \in R^n, k \in R^{1*n} \quad (4)$$

El producto entre una fila y una columna da como resultado una escalar, también conocida como **Ley de control** para un sistema **SISO** (Simple Input Simple Output).

$$\vec{x}(t) = A \vec{x}(t) - \vec{b}(k) \vec{x}(t) \quad (5)$$

De la ecuación 5 se obtiene:

$$\vec{x}(t) = \tilde{A} \vec{x}(t) \quad (6)$$

Donde:

$$\tilde{A} = A - \vec{b}(k) \quad (7)$$

Por ende los autovalores correspondiente de \tilde{A} empiezan a dominar la dinámica de un nuevo sistema en el cual las ganancias \mathbf{k} es dependiente.

Como la ganancia \mathbf{k} afecta al sistema

En lugar de la salida del sistema de retroalimentación, se devolverá un estado, por lo que en lugar de una sola ganancia k , ahora se tendrá un vector de ganancias \mathbf{k} .

$$G(s) = \frac{b_0 s}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (8)$$

El sistema representado en la forma canónica controlable:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \vec{x} \\ y &= [b_0 \ 0] \vec{x}\end{aligned}\tag{9}$$

Tras la aplicación de la realimentación de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A - \vec{b} k) \vec{x}(t) \\ \dot{\vec{x}}(t) &= \begin{bmatrix} -a_1 - k_1 & -a_2 - k_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \vec{x}(t)\end{aligned}\tag{10}$$

De esta forma, es posible modificar las n raíces de la ecuación característica de la función de transferencia. Para cambiar el comportamiento dinámico del sistema, el par A y B deben ser totalmente controlables.

Seguimiento de Referencia

Para seguir una referencia, es necesario agregar la referencia a la ecuación de la ley de control.

$$u(t) = -k \vec{x}(t) + r(t)\tag{11}$$

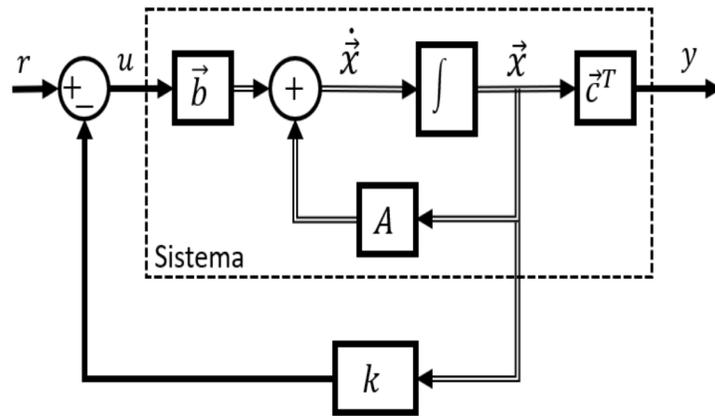
En la representación de estados se tiene:

$$\dot{x}(t) = (A - b \vec{k}) \vec{x}(t) + \vec{b} r(t)\tag{12}$$

Con las ecuaciones anteriormente mencionadas se crea un esquema de retroalimentación de estados (Figura 16), el cual las representa.

Figura 16

Esquema de Realimentación de estados.



Nota: Se observa el esquema de realimentación de estados con referencia (Castaño, 2020).

En la regulación de un sistema, el interés está en la eliminación de perturbaciones o estabilización de la planta.

$$\dot{x}(t) = (A - \vec{b}(k)) \vec{x}(t) + \vec{b} r(t) \quad (13)$$

Controlabilidad

Un sistema es 100% controlable si existe un control sin poseer restricción de $u(t)$ que tiene la posibilidad de llevar cualquier estado inicial $x(t_0)$ a cualquier otro estado deseado $x(t)$ en un tiempo determinado $t_0 \leq t \leq T$.

Matriz de controlabilidad:

$$C_M = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (14)$$

El determinante de la matriz de controlabilidad permiten conocer si el sistema de controlable, y el rango indica que tan controlable es el sistema.

Formulación por el método de ACKERMAN

Cuando se trata de un sistema SISO, la matriz de ganancias puede ser determinada con el método de Ackerman. El método permite calcular la matriz de ganancias de realimentación de estados a partir de la ecuación.

$$\mathbf{k} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1] C^{-1} / \phi(\mathbf{A}) \quad (15)$$

donde C es la matriz de controlabilidad del sistema y $\phi(A)$ viene dado por:

$$\phi(\mathbf{A}) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \alpha_2 \lambda^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (16)$$

donde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ son los coeficientes de la ecuación característica deseada.

5. Marco metodológico

5.1. Adquisición de datos

Se realizará una investigación de la literatura existente acerca del vehículo tipo Formula SAE perteneciente a la universidad, con lo cual se establecerá el tipo de elementos que se encuentran en el vehículo y las variables de comportamiento como se aprecia en la Figura 17.

Figura 17

Variables del sistema de suspensión.

Parámetro	Suspensión frontal	Suspensión posterior
m_2 : masa suspendida (kg)	61,1	74,75
K_s : rigidez de la suspensión (N/m)	26 220,47	34 960,62
R_s : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión (Ns/m)
K_n : rigidez del neumático (N/m)	102 917,699	132 322,756
m_1 : masa no suspendida (kg)	10,9	13,25
M_R : motion ratio	1,3	1,4
K_w : rigidez de la rueda (N/m)	15515,071	17837,051
f_{m2} : frecuencia natural de la masa suspendida (Hz).	2,36	2,3
f_{m1} : frecuencia natural de la masa no suspendida (Hz)	16,62	16,81
C_{cr} : coeficiente de amortiguación crítico (Ns/m)	2487,28	3233,274

Nota: Se observa las variables del modelo de un cuarto de vehículo (Arévalo Melgar, Medina, y Valladolid, 2018).

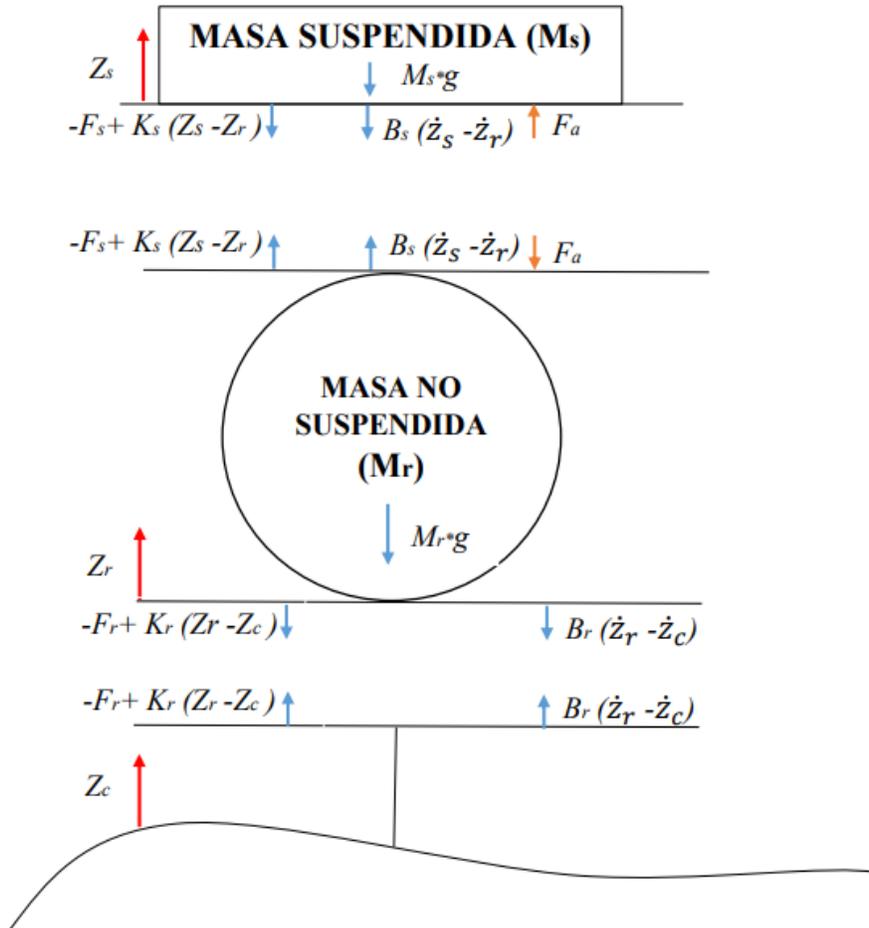
5.2. Diseño de sistema de control

Se especificará el modelo matemático, para obtener una función de transferencia del sistema y así diseñar el control.

En este caso se propone un sistema de suspensión activa con un modelo matemático de un cuarto de vehículo como se muestra el la Figura 18.

Figura 18

Esquema del modelo matemático.



Nota: Se observa el esquema de un cuarto de vehículo.

Donde:

- Z_c : Irregularidades en el camino.
- Z_r : Desplazamiento vertical del neumático.
- Z_s : Desplazamiento vertical del chasis.
- Z_a : Fuerza del actuador.

- F_r y F_s : Fuerzas iniciales de los resortes.
- g : Aceleración de la gravedad.
- B_r : Amortiguación del neumático.
- B_s : Amortiguación de la suspensión.
- K_r : Rigidez del neumático.
- K_s : Rigidez de la suspensión.
- M_r : Masa no suspendida.
- M_s : Masa suspendida.

Para obtener el modelo matemático se utiliza la Segunda Ley de Newton ($F = m * a$) a las masas suspendida y no suspendida, para trabajar con las ecuaciones de equilibrio del sistema.

Masa suspendida:

$$F = m * a;$$

$$F a - B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) - (-F_s + K_s(Z_s - Z_r)) - M_s * g = M_s \ddot{Z}_s \quad (17)$$

Masa no suspendida:

$$F = m * a;$$

$$-F a + B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) + (-F_s + K_s(Z_s - Z_r)) - M_r * g - B_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_c) - (-F_r + K_r(Z_r - Z_c)) = M_r \ddot{Z}_r \quad (18)$$

Cuando el sistema se encuentra en posición de equilibrio las fuerzas iniciales de los resortes están dadas por:

$$F_r = (M_s + M_r) * g = 0; \quad (19)$$

$$F_s = M_s * g = 0; \quad (20)$$

Por lo que, considerando la posición de equilibrio se eliminan las fuerzas gravitacionales:

Masa suspendida:

$$\begin{aligned} Fa - B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) - (0 + K_s(Z_s - Z_r)) - 0 &= M_s \ddot{Z}_s \\ Fa - B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) - K_s(Z_s - Z_r) &= M_s \ddot{Z}_s \end{aligned} \quad (21)$$

Masa no suspendida:

$$\begin{aligned} -Fa + B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) + (0 + K_s(Z_s - Z_r)) - 0 - B_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_c) - (0 + K_r(Z_r - Z_c)) &= M_r \ddot{Z}_r \\ -Fa + B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) + K_s(Z_s - Z_r) - B_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_c) - K_r(Z_r - Z_c) &= M_r \ddot{Z}_r \end{aligned} \quad (22)$$

Función de transferencia.

Para determinar la función de transferencia de las ecuaciones encontradas se aplica la transformada de Laplace en las ecuaciones 21 y 22, considerando la fuerza del actuador nula ($F_a=0$):

Masa suspendida:

$$\begin{aligned} Fa - B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) - K_s(Z_s - Z_r) &= M_s \ddot{Z}_s \\ 0 - B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) - K_s(Z_s - Z_r) &= M_s \ddot{Z}_s \\ -B_s \dot{Z}_s + B_s \dot{Z}_r - K_s Z_s + K_s Z_r &= M_s \ddot{Z}_s \\ 0 = M_s \ddot{Z}_s + B_s \dot{Z}_s - B_s \dot{Z}_r + K_s Z_s - K_s Z_r & \\ \mathcal{L}\{M_s \ddot{Z}_s + B_s \dot{Z}_s - B_s \dot{Z}_r + K_s Z_s - K_s Z_r = 0\} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{M_s\ddot{Z}_s + B_s\dot{Z}_s + K_s Z_s\} + \mathcal{L}\{-B_s\dot{Z}_r - K_s Z_r\} &= 0 \\ (M_s s^2 + B_s s + K_s)Z_s(s) - (B_s s + K_s)Z_r(s) &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Masa no suspendida:

$$\begin{aligned} -Fa + B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) + K_s(Z_s - Z_r) - B_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_c) - K_r(Z_r - Z_c) &= M_1\ddot{Z}_r \\ 0 + B_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_r) + K_s(Z_s - Z_r) - B_r(\dot{Z}_r - \dot{Z}_c) - K_r(Z_r - Z_c) &= M_r\ddot{Z}_r \\ B_s\dot{Z}_s - B_s\dot{Z}_r + K_s Z_s - K_s Z_r) - B_r\dot{Z}_r + B_r\dot{Z}_c - K_r Z_r + K_r Z_c &= M_r\ddot{Z}_r \\ 0 = M_r\ddot{Z}_r - B_s\dot{Z}_s + B_s\dot{Z}_r - K_s Z_s + K_s Z_r + B_r\dot{Z}_r - B_r\dot{Z}_c + K_r Z_r - K_r Z_c \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}\{M_r\ddot{Z}_r - B_s\dot{Z}_s + B_s\dot{Z}_r - K_s Z_s + K_s Z_r + B_r\dot{Z}_r - B_r\dot{Z}_c + K_r Z_r - K_r Z_c = 0\}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{M_r\ddot{Z}_r + B_s\dot{Z}_r + K_s Z_r + B_r\dot{Z}_r + K_r Z_r\} + \mathcal{L}\{-B_s\dot{Z}_s - K_s Z_s\} + \mathcal{L}\{-B_r\dot{Z}_c - K_r Z_c\} &= 0 \\ (M_r s^2 + B_r s + K_r)Z_r(s) - (B_s s + K_s)Z_s(s) - (B_r s + K_r s)Z_c(s) &= 0 \\ (M_r s^2 + B_r s + K_r)Z_r(s) - (B_s s + K_s)Z_s(s) &= (B_r s + K_r)Z_c(s) \end{aligned} \quad (24)$$

Las ecuaciones 23 y 24 se expresan de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} (M_r s^2 + B_r s + K_r) & -(B_s s + K_s) \\ -(B_s s + K_s) & (M_s s^2 + B_s s + K_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_r \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (B_r s + K_r)Z_c(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Se aplica la regla de Cramer a la Ecuación 25 para obtener las funciones de transferencia de la masa suspendida y la masa no suspendida con respecto al camino:

Masa no suspendida:

$$Z_r(s) = \frac{\begin{bmatrix} M_r s^2 + B_r s + K_r & (B_r s + K_r) Z_c(s) \\ -(B_s s + K_s) & 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} M_r s^2 + B_r s + K_r & -(B_s s + K_s) \\ -(B_s s + K_s) & M_s s^2 + B_s s + K_s \end{bmatrix}}$$

$$Z_r(s) = \frac{[(M_r s^2 + B_r s + K_r) * 0] - [(B_r s + K_r) Z_c(s) * (-(B_s s + K_s))]}{[(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s)] - [-(B_s s + K_s) * (-(B_s s + K_s))]}$$

$$Z_r(s) = \frac{[(B_r s + K_r) * (B_s s + K_s)] Z_c(s)}{[(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s)] - (B_s s + K_s)^2}$$

$$\frac{Z_s(s)}{Z_c(s)} = \frac{B_r B_s s^2 + K_r B_s s + B_r K_s s + K_r K_s}{[(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s)] - (B_s s + K_s)^2} \quad (26)$$

Masa suspendida:

$$Z_s(s) = \frac{\begin{bmatrix} (B_r s + K_r) Z_c(s) & -(B_s s + K_s) \\ 0 & M_s s^2 + B_s s + K_s \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} M_r s^2 + B_r s + K_r & -(B_s s + K_s) \\ -(B_s s + K_s) & M_s s^2 + B_s s + K_s \end{bmatrix}}$$

$$Z_s(s) = \frac{(B_r s + K_r) * Z_c(s) * (M_s s^2 + B_s s + K_s) - (-(B_s s + K_s) * 0)}{(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s) - (-(B_s s + K_s) * (-(B_s s + K_s)))}$$

$$Z_s(s) = \frac{(B_r s + K_r) * Z_c(s) * (M_s s^2 + B_s s + K_s)}{(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s) - (-(B_s s + K_s) * (-(B_s s + K_s)))}$$

$$\frac{Z_s(s)}{Z_c(s)} = \frac{(B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s)}{(M_r s^2 + B_r s + K_r) * (M_s s^2 + B_s s + K_s) - (-(B_s s + K_s) * (-(B_s s + K_s)))}$$

$$\frac{Z_s(s)}{Z_c(s)} = \frac{B_r M_s s^3 + (B_r B_s + K_r M_s) s^2 + (B_r K_s + K_r B_s) s + K_r K_s}{(M_r M_s) s^4 + (M_r B_s + B_r M_s) s^3 + (M_r K_s + B_r B_s) s^2 + (K_r K_s - K_s^2)} \quad (27)$$

Variables del sistema de suspensión

A continuación se presentan los coeficientes obtenidos del sistema de suspensión, y sobre los cuales se diseñara el control.

$$M_r = 10.9$$

$$M_s = 61.1$$

$$K_r = 15515.071$$

$$K_s = 26220.47$$

$$B_r = 100$$

$$B_s = 21487.2$$

Función de Transferencia del sistema

La función de transferencia esta dado por la ecuación 27 reemplazando las variables del sistema de suspensión.

$$\frac{6110s^3 + 3.097e06s^2 + 3.36e08s + 4.068e08}{666s^4 + 1.553e06s^3 + 4.985e06s^2 + 3.36e08s + 4.068e08}$$

Representación en espacios de estados:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.0233 & -0.0748 & -5.0451 & -6.1084 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

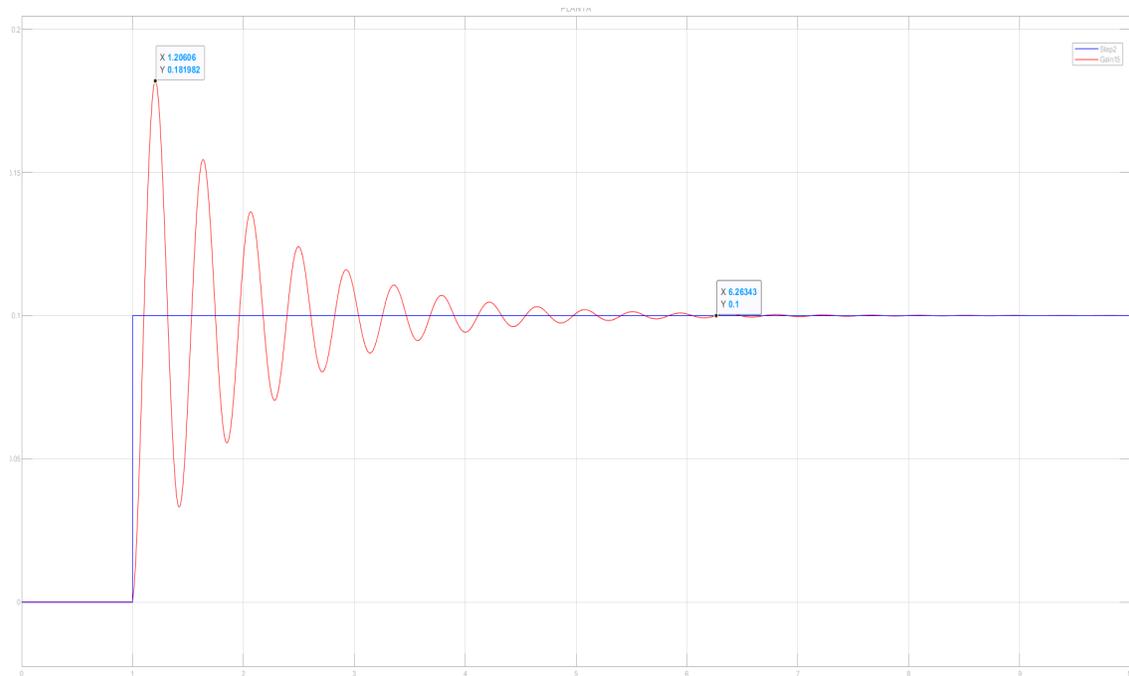
$$\mathbf{C} = [0.0001 \quad 0.0465 \quad 5.0451 \quad 6.1084]$$

$$\mathbf{D} = [0]$$

Luego de obtener las matrices de espacios de estados se procede a simular su comportamiento ante la entrada de un escalón unitario. Haciendo uso de la herramienta MATLAB, se obtiene la gráfica con el siguiente comportamiento.

Figura 19

Respuesta del sistema de matrices ante la entrada de un impulso unitario.



Nota: Se visualiza el comportamiento del sistema ante la entrada de un impulso unitario.

En la Figura 19 se muestra el comportamiento del sistema sin la aplicación de control, por lo que se puede apreciar que posee un sobrepaso del 80%, con un tiempo de asentamiento de 6.26 segundos. Para que el sistema de suspensión trabaje de manera eficiente es necesario ajustar los parámetros antes mencionados.

El presente proyecto trabaja con un sensor de desplazamiento, el cual es el encargado de monitorear el desplazamiento del bastago de amortiguador, este sensor viene incorporado dentro del actuador.

Haciendo uso de la herramienta de MATLAB, se determina si el sistema es controlable, con el uso de la ecuación 14 se obtiene la matriz de controlabilidad.

Matriz de controlabilidad:

$$C_M = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

$$C_M = \begin{bmatrix} 1 & -2332 & 5430740 & -12647536992 \\ 0 & 1 & -2332 & 5430740 \\ 0 & 0 & 1 & -2332 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Determinante} = 1$$

$$\text{Rango} = 3$$

Al analizar los valores del rango y determinante de la matriz de controlabilidad, se identifica que el sistema es controlable.

Polos del sistema:

Para iniciar el control se observa los polos del sistema con la ayuda de MATLAB:

$$pd = \text{pole}(GK)$$

$$pd = [-2336.315 \quad -1.892 + 20.577i \quad -1.892 - 20.577i \quad -1.224]$$

Polo deseado:

Para obtener un polo deseado se selecciona un nuevo sobredisparo y tiempo de asentamiento con el objetivo de disminuirlo.

$$T_s = 0.5s$$

$$OS = 1$$

Con estos valores establecidos se procede a calcular el polo deseado:

$$zita = \frac{(-\log(OS/100))}{\sqrt{(\pi^2 + (\log(OS/100))^2)}}$$

$$zita = 0.82$$

$$wn = \frac{4 * Ts}{zita}$$

$$wn = 9.68$$

$$theta = \text{acosd}(zita)$$

$$theta = 34.30$$

$$im = wn * \sqrt{1 - zita^2}$$

$$im = 5.45$$

$$real = im / \text{tand}(theta)$$

$$real = 8.00$$

$$s0 = \text{complex}(-real, im)$$

$$s0 = -8 + 5.45i$$

Método de Ackerman:

Para el método de Ackerman se usará una K de retroalimentación con una parte integral, para eliminar el error en los estados para ellos se necesita la matriz aumentada de A y B.

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$$
$$Aa = \begin{bmatrix} -2332 & -7484 & -504000 & -610800 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -9.174 & -4650 & -504000 & -610800 & 0 \end{bmatrix}$$
$$Ba = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$Ba = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Con la ayuda de MATLAB se realiza el cálculo del modelo de Ackerman

$$K = \text{acker}(A, B, P)$$

Donde:

A=Matriz aumentada de A

B=Matriz aumentada de B

P=Polos deseados

Se agrega en los polos deseados, el polo calculado conjunto a los que se tenía anteriormente y al final para la parte integral se agrega una constante que reduzca el error.

$$K_t = \text{acker}(Aa, Ba, [s0 \quad pd(2) \quad pd(3) \quad pd(4) \quad -10])$$

$$K_t = \begin{bmatrix} -2308.99 & -6882.806 & -495624.965 & -601372.940 & -0.068 \end{bmatrix}$$

Los cuatro primeros valores serán la k de retroalimentación y el quinto valor sera el ki para la parte integral

$$K = \begin{bmatrix} -2308.99 & -6882.806 & -495624.965 & -601372.940 \end{bmatrix}$$

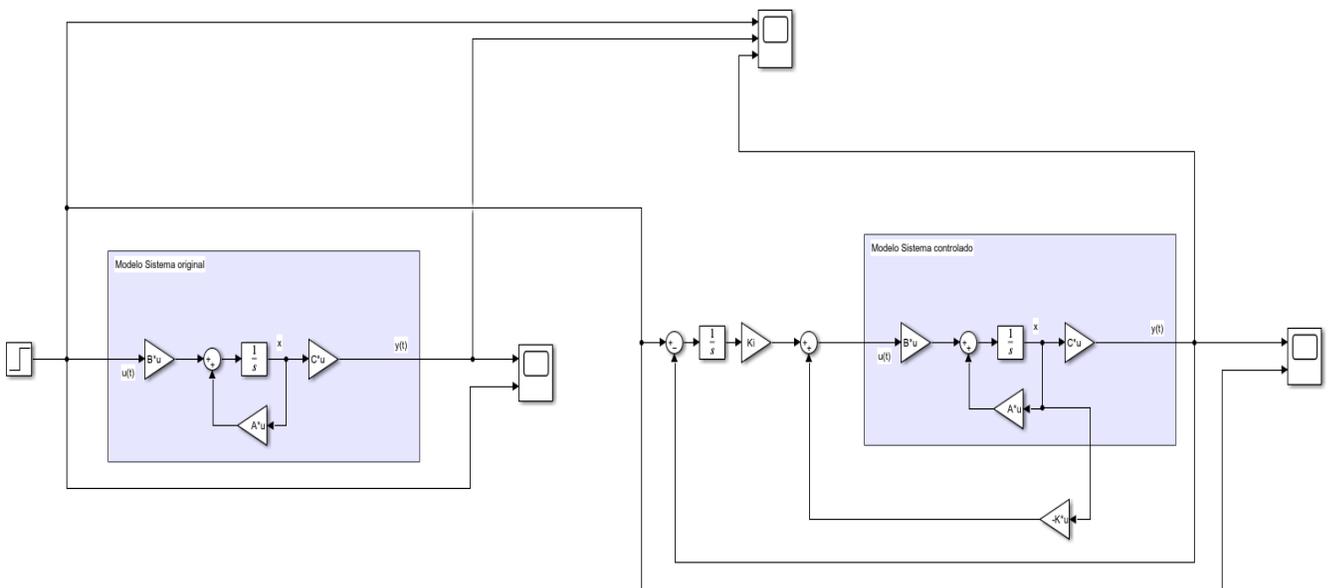
$$K_i = \begin{bmatrix} -0.068 \end{bmatrix}$$

Diagrama de bloques:

Para la observación de gráficas se usa diagramas de bloques en la herramienta SIMULINK, ubicando un escope comparativo del sistema controlado, sin controlar y la respuesta a un obstaculo de 0.1 metros, como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Diagrama de bloques sistema controlado y sin controlar.

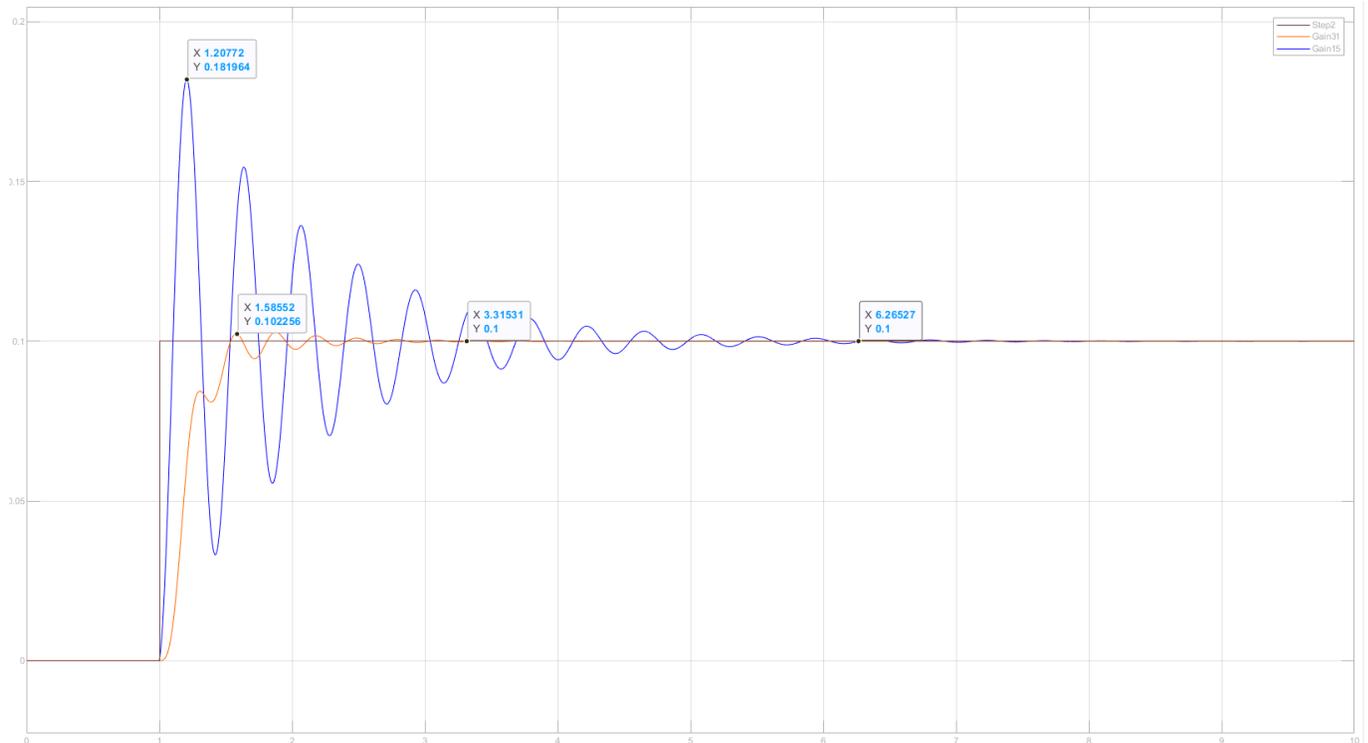


Nota: Se observa el diagrama de bloques del sistema controlado y sin controlar.

En la Figura 21 se observa la comparación de la gráfica del sistema controlado frente al sistema no controlado, denotando sus diferencias.

Figura 21

Gráficas del sistema controlado y no controlado.



Nota: Se observa las gráficas del sistema controlado y sin controlar.

Se ha reducido el sobredisparo a 2% y el tiempo de asentamiento a 3.31s evidenciando una mejora con respecto al sistema original.

5.3. Propuesta del diseño electrónico

Al analizar las especificaciones del comportamiento y respuesta ante el diseño de control se procede a identificar un controlador que posea las características necesarias para que el sistema trabaje de manera óptima, para ello se empieza identificando al actuador y sensor.

5.3.1. Selección de Actuador y Sensor

Es necesario que el actuador hidráulico posea un ajuste electrónico y cuente con un sensor que registre el desplazamiento del cilindro, de tal manera que se regulará el paso del fluido en los amortiguadores logrando así tener un control sobre el rebote.

Para ello se ha seleccionado un amortiguador KA-040 (Figura 22), el cual se encuentra disponible en el mercado para la implementación tanto en motocicletas y vehículo de competencia, esto debido a un excelente funcionamiento y desempeño en eventos de competencia.

Al permitir ser ajustado de manera electrónica mediante un panel o sistema de control, hace que sobresalga ante otros modelos disponibles en el mercado, las especificaciones técnicas, que posee el actuador es un tiempo de respuesta de 1 segundo y posee un ajuste de precarga.

Su construcción esta realizada en aluminio, y posee un motor paso a paso encargado de realizar el ajuste de amortiguamiento según este sea calibrado.

Figura 22

Actuador Seleccionado.



Nota: Se observa el amortiguador seleccionado (ÖHLINS, 2022).

Para que el sistema funcione de manera eficiente es necesario contar con un sensor, el cual registrara el desplazamiento del vástago del amortiguador. El sensor sera conectado al

modulo controlador, según los datos registrados se realizará un control el cual será aplicado al amortiguador.

En la Figura 23, se puede apreciar las características técnicas del actuador, el cual posee un sensor de desplazamiento internamente. Para ello posee dos conectores, los cuales pertenecen al motor paso a paso encargado del ajuste del amortiguador, y el otro pertenece al sensor integrado.

Figura 23

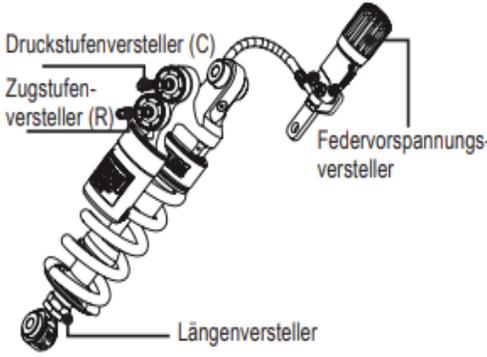
Características técnicas del actuador Seleccionado.

EINSTELLARBEITEN

⚠️ Warnung!
 Stellen Sie vor der ersten Fahrt sicher, dass die vorhandenen Stoßdämpfereinstellungen mit den von Öhlins empfohlenen Einstellwerten übereinstimmen. Lesen Sie zuerst das Handbuch bevor Sie Anpassungen und Einstellarbeiten am Stoßdämpfer ausführen. Kontaktieren Sie einen Öhlins Händler wenn Sie Fragen in Bezug auf die Abstimmung des Stoßdämpfers haben.

EINSTELLWERTE

Empfohlenes Set-Up	
Federvorspannung	12 mm
Feder	
Art. Nr.	21040-39
Federrate	(110N/mm)
Federlänge unbelastet.....	160 0/-3 mm



Stoßdämpfer Daten	
Länge.....	309+6/0 mm
Federweg.....	59 mm
Empfohlener Federweg unbelastet / belastet:	
Unbelastet (R1-R2).....	20 mm
Belastet (R1-R3).....	32 mm
Unbelastet (F1-F2)	30 mm
Belastet (F1-F3).....	40 mm

Nota: Se observa las características técnicas del actuador (ÖHLINS, 2022).

5.3.2. Controlador Electrónico

El controlador esta encargado de procesar los datos captados por el sensor, para posteriormente realizar un ajuste del amortiguador; el controlador debe poseer ciertas características

como: resistencia a vibraciones, ruido eléctrico, y humedad causada por la lluvia.

Al tratarse del sistema de suspensión frontal no puede sufrir averías o fallas ya que pondría en riesgo la integridad del piloto y la posición en la carrera. Por tal motivo el controlador debe ser fabricado por una entidad que cuente con experiencia en el área y ofrezca garantía y eficiencia en los módulos controladores.

Luego de realizar una búsqueda de empresas que se dediquen a la fabricación de módulos. Se identificaron varias empresas, de las cuales Cojali PARTS sobresale ante todas por ofrecer módulos bajo pedido y que cuenten con las características que requiera el cliente.

Cojali PARTS es una empresa que se dedica al diseño y desarrollo de módulos y controladores en la rama automotriz. El registro incluye más de 15, 000 referencias de productos con componentes electrónicos y eléctricos. Se encuentra en España multinacional con ubicación en el Campo de Criptana, desarrolla sofisticadas soluciones electrónicas, conectividad de larga distancia y diagnóstico para vehículos de turismo y competencia, y soluciones a suspensiones hidráulicas y neumáticas.

Cojali PARTS ha participado en el Evento General de Partes y Servicios de 2022, orgánico por Granit Parts y Agrartechnik, en Kassel Alemania, donde han presentado sus soluciones tecnológicas.

Características para el diseño del módulo controlador

En la documentación de proforma de diseño hacia Cojali PARTS, se le solicita el diseño de un modulo controlador para un vehículo monoplaza de tipo formula SAE, que cuente con una alimentación de 12VDC, protección contra humedad IP67, resistencia ha vibraciones con un espectro de (0-25 Hz) y ruido (25-25000 Hz). Además, se requiere un par de entradas analógicas para los sensores de desplazamientos integrados en los amortiguadores, un par de salidas digitales para controlar las mariposas de los actuadores y una entrada para el accionamiento del sistema.

En la Figura 24, se observa el modulo controlador diseñado y producido por la empresa Cojali PARTS. El cual a sido seleccionado para el presente sistema de suspensión.

El módulo posee características que se ajustan a las necesidades del diseño de suspensión. Tales como, voltaje de trabajo a 12VDC, conexión independiente, para dos actuadores y dos sensores. Las salidas de los actuados son digitales mientras que las entradas son analógicas.

En cuanto a sus protecciones, esta construido en un armazón metálico evitando distorsión por ruido eléctrico, con una junta en aislante la cual impide el paso de humedad a la placa del modulo. Su diseño esta enfocado a vehículos de competencia por lo que las vibraciones no interfieren con su funcionamiento. Además, su tamaño es reducido haciéndolo ideal para la implementación en un vehículo monoplaza tipo formula SAE.

Figura 24

Unidad de control electrónico



Nota: Se observa la unidad de control electrónico, obtenido de *UNIDAD CONTROL ELECTRONICO SUSPENSION REMAN (2023)*

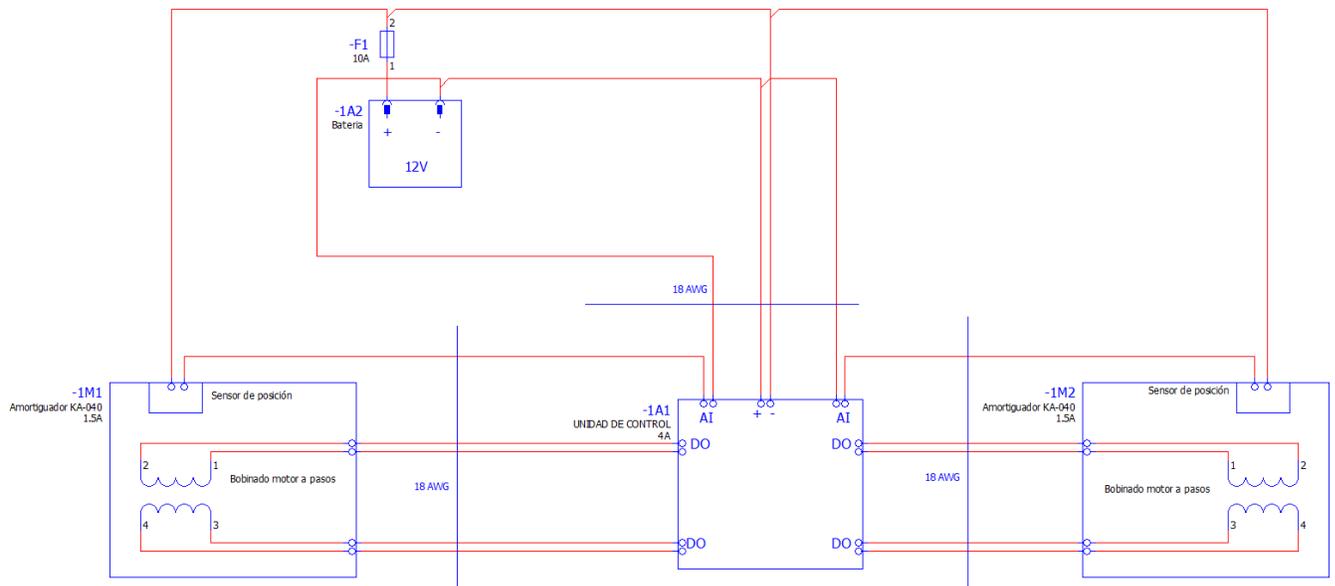
5.3.3. Diagrama de conexión electrónico

En la figura 25, se puede apreciar el diagrama de conexión electrónico en el cual consta de dos actuadores y dos sensores, los cuales van conectados de manera independiente. El módulo posee una alimentación de 12VDC protegida por un fusible de 10A, con una entrada de accionamiento la misma que permitirá que el sistema de suspensión entre en funcionamiento

solo cuando el vehículo este encendido evitando así tener que desconectar el módulo luego de cada carrera.

Figura 25

Diagrama de conexión electrónico



Nota: Se observa el diagrama de conexión de los actuadores y el módulo controlador.

6. Resultados

6.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utilizó bibliografía del monoplaza eléctrico perteneciente a la Universidad, sin embargo, el valor de la amortiguación del neumático (B_r) se representa de forma idealizada, haciendo que el vehículo se comporte de manera diferente en relación al comportamiento real durante las pruebas en pista, por lo cual se optó por tomar el valor de $B_1 = 100N * s/m$ basado en un modelo matemático (Figura 26) perteneciente a un cuarto de vehículo aplicado a una suspensión activa y semiactiva, consiguiendo un comportamiento más real y apropiado del monoplaza.

Figura 26

Parámetros del modelado.

PARÁMETROS DEL MODELO			
Denominación	Símbolo	Cantidad	Unidad
Masa suspendida	M_2	250	kg
Masa no suspendida	M_1	40	kg
Rigidez suspensión	K_2	28000	N/m
Rigidez neumático	K_1	125000	N/m
Amortig. suspensión	B_2	2000	N*s/m
Amortig. neumático	B_1	100	N*s/m

Nota: Se observa los parámetros de modelado de un vehículo monoplaza tipo formula SAE (Hurel, Terán, Flores, Peralta, y Flores, 2017).

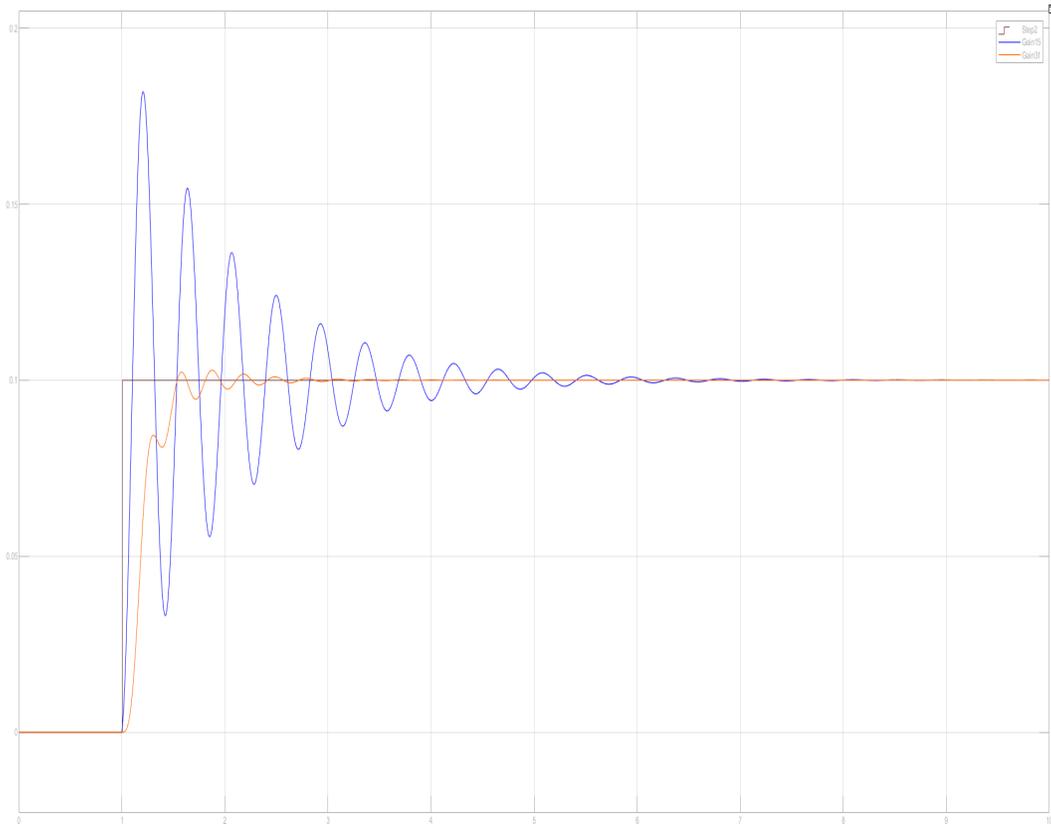
6.2. Diseño de sistema de control

En el diseño de control se consideró distintos valores en el t_s con el fin de escoger el mejor polo para el sistema y con el mismo calcular la k de retroalimentación, la cual controlaría el sistema, obteniendo así 3 resultados:

En la Figura 27, con un $t_s = 0.5$ se obtiene un polo $s_0 = -8 + 5.45i$, con el mismo se observa que la amplitud de la oscilaciones se ha reducido en relación a la original, teniendo un tiempo de asentamiento mejorado y reducido de 6.26s a 3.61s.

Figura 27

Gráfica del sistema controlado (naranja) y no controlado (azul) con un $s_0 = -8 + 5.45i$ y $OS = 1\%$.

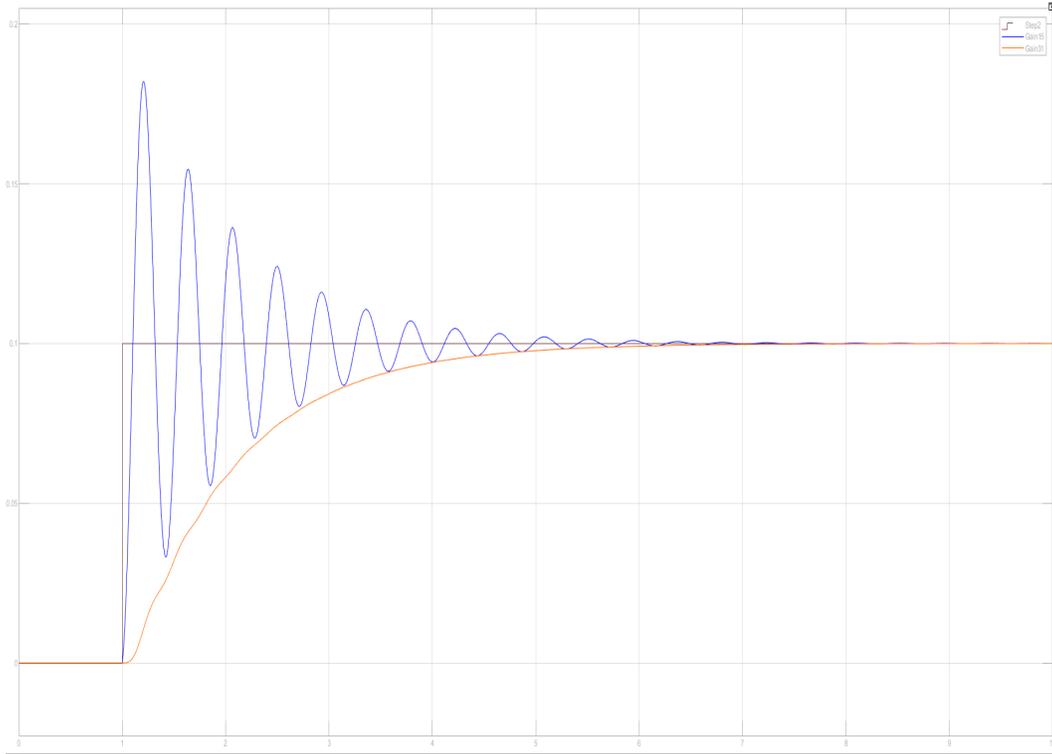


Nota: Se observa la gráfica del sistema controlado y no controlado ante la entrada de un impulso de 0.10m.

En la Figura 28, con un $t_s = 4.1s$ y $OS = 1\%$ se obtiene un polo $s_0 = -0.9756 + 0.6655i$, se observa que la gráfica (naranja) no presenta oscilaciones, obteniendo una estabilización completa del sistema en 7s y comportándose de manera adecuada, sin embargo el tiempo de estabilización es lento, con respecto al original de 6.26s y el objetivo al momento de tener un obstáculo es superarlo en el menor tiempo posible.

Figura 28

Gráfica del sistema controlado (naranja) y no controlado (azul) con un $s_0 = -0.9756 + 0.6655i$ y $OS = 1\%$.

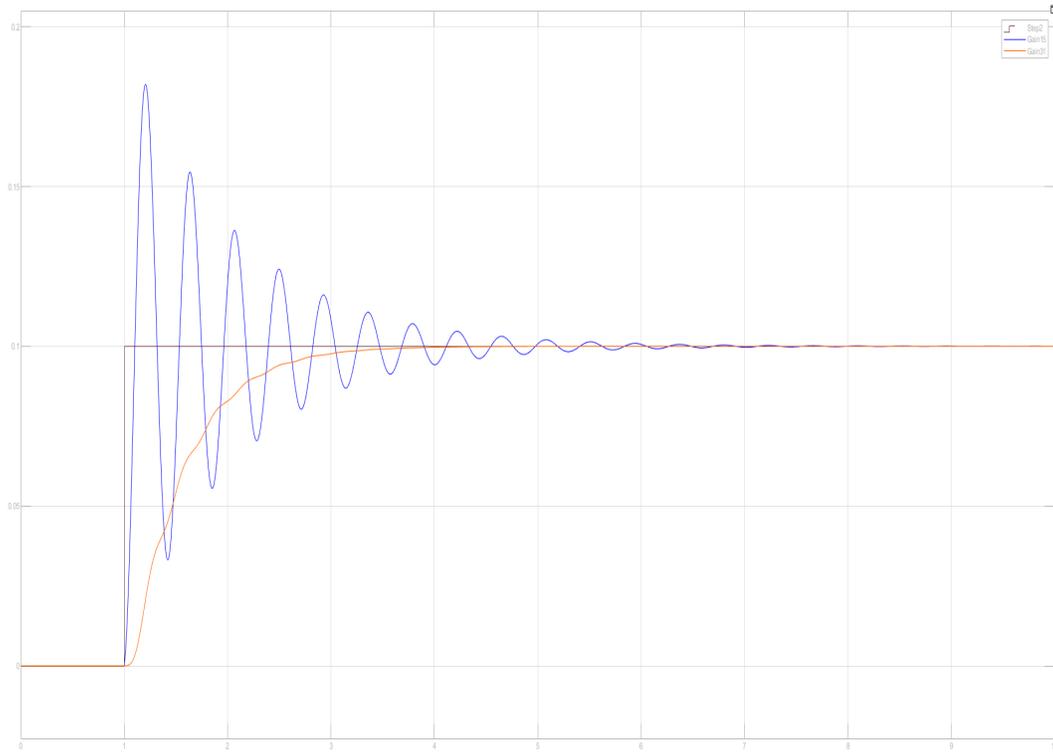


Nota: Se observa las gráficas del sistema controlado y no controlado ante la entrada de un impulso de 0.10m.

En la Figura 29, con un $t_s = 2s$ y $OS = 1\%$, se obtiene $s_0 = -2 + 1.3644i$, se observa que la gráfica presenta oscilaciones y un tiempo de estabilización mejorado de 6.26s a 4s, sin embargo no es el mejor posible.

Figura 29

Gráfica del sistema controlado (naranja) y no controlado (azul) con un $s_0 = -2 + 1.3644i$ y $OS = 1\%$.



Nota: Se observa la gráfica del sistema controlado y no controlado ante la entrada de un impulso de 0.10m.

En las competencias de Formula Student, el tiempo es esencial, si se reduce se logra una mejor posición y se aumentan las posibilidades de ganar durante la prueba endurance, escogiéndose el primer sistema que se estabiliza mas rápido, sin embargo, es el menos confortable, por la cantidad de oscilaciones que se generan antes de la estabilización, aunque, lo haga en un tiempo mas reducido, de 6.26 s a 3.6s.

6.3. Propuesta del diseño electrónico

En el diseño de control para una suspensión electrónica se determinaron las cualidades de software y hardware que debe poseer la unidad de control electrónico, la misma que no esta

sujeta a experimentaciones con prototipos ya que estaría en riesgo la vida del piloto. Por ende se ha seleccionado a la empresa Cojali PARTS (Figura 30) para que realice la construcción de la unidad de control; siendo esta una empresa de procedencia Española que cuenta con más de 30 años en el mercado.

Figura 30

Portada de presentación de Cojali PARTS



Nota: Se observa la portada de presentación de Cojali PARTS, obtenido de *UNIDAD CONTROL ELECTRONICO SUSPENSIÓN REMAN* (2023)

7. Conclusiones

- La revisión bibliográfica permitió identificar las variables de comportamiento del sistema de suspensión como son la masa suspendida, masa no suspendida, rigidez de la suspensión, rigidez del neumático y amortiguación de la suspensión, que posee el vehículo monoplaza tipo formula SAE perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana, obtenidas del artículo "Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de

competencia eléctrico Formula Student.”, además para el correcto modelado se obtuvo la amortiguación del neumático del artículo “Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo” las cuales permitieron realizar un preciso diseño de control, siendo las mismas fuentes con información y datos confiables.

- El estudio del sistema de control mediante el método de la retroalimentación de estados, el cual en relación con otros sistemas de control no necesita sintonización y es mas flexible que otros controles como son el PID, control adaptativo y control óptimo, con el mismo se realizó simulaciones las cuales constataron que se puede lograr un control eficiente en relación a su comportamiento frente a perturbaciones en el sistema de suspensión, garantizando estabilidad del vehículo y confort para el conductor, teniendo mejor comportamiento durante las pruebas en pista en las competencias de la Formula Student.
- A través de la programación en MATLAB se logró optimizar tiempos en la resolución de modelos matemáticos y junto a su extensión SIMULINK se verificó los resultados del sistema de control a través de las gráficas de comportamiento del sistema de suspensión, evidenciando la diferencia entre el sistema original y la propuesta de diseño del sistema de control para una suspensión activa delantera aplicado a un vehículo tipo formula SAE, con una mejora del 42,33%.
- En cuanto a la propuesta de diseño electrónico fue necesario analizar la frecuencia de vibraciones y condiciones climáticas a las que estará expuesto el módulo de control electrónico, donde la protección IP67 garantizará que el módulo este libre de humedad con el fin de tener un óptimo funcionamiento durante la carrera. Siendo Cojali PARTS la empresa que se recomienda para la construcción de la unidad de control electrónico, que cuenta con certificación AENOR de acuerdo con las normas ISO 9001 , UNE 166002, ISO/IEC 27001 e ISO 14001.

8. Recomendaciones

- Revisar la normativa vigente de la Formula SAE, para asegurarse que el vehículo cumpla con la misma y evitar descalificaciones.
- Escoger actuadores y sensores adecuados para el diseño electrónico, ya que al tratarse de la industria automotriz no se pueden usar elementos en fase de prototipo o sin certificaciones.

- Actualmente esta diseñado para vehículos monoplace tipo Formula SAE, sin embargo, en una futura etapa de investigación e implementación se podría lograr adaptar a vehículos de turismo.
- Tomar en cuenta la velocidad máxima que alcanzara el vehículo antes de la selección de componentes, así se evitara el sobredimensionamiento o por el contrario poner en riesgo la vida del piloto.
- El sistema de control propuesto para una suspensión delantera cuenta con actuadores, sensores y unidad de control pero aún se encuentra en fase de prototipo por lo que se recomienda realizar pruebas pertinentes antes de ponerlo en uso para competencias, con el fin de garantizar un óptimo funcionamiento.

Referencias

- Alvarado, D. (2017, julio). *Revista Nitro - El sistema de suspensión activa*. Descargado 2022-12-16, de <https://www.nitro.pe/mecanico-nitro/el-sistema-de-suspension-activa.html>
- Arévalo Melgar, C. G., Medina, A., y Valladolid, J. (2018, junio). Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student. *Ingenius*(20), 96–107. Descargado 2023-04-26, de <http://localhost/ojs/index.php/ingenius/article/view/20.2018.09> doi: 10.17163/ings.n20.2018.09
- Barrientos, A., Cruz, A., Peñín, L., y Balaguer, C. (2007). *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill. Descargado de <https://books.google.com.ec/books?id=ArEMPAAACAAJ>
- Castaño, S. (2020, mayo). *Control por Realimentación de Estados - [abril, 2023]*. Descargado 2023-04-30, de <https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-dinamicos-lineales/control-por-realimentacion-de-estados/>
- Colomer Romero, V. (2013). *Propuesta metodologica en el ambito de la mecatronica: vehículos de competicion de alta eficiencia* (Tesis Doctoral no publicada). Editorial Universitat Politècnica de València.
- González, D. (2009). *Tutorial de qt4 designer* (Tesis de Master no publicada). Universidad Politecnica de Catalunya.
- Hurel, J., Terán, E., Flores, F., Peralta, J., y Flores, B. (2017). Modelado físico y matemático del sistema de suspensión de un cuarto de vehículo. En (Vol. 2017-July). Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. doi: 10.18687/LACCEI2017.1.1.295
- Isaac. (2020, marzo). *F1 2020: ¿qué es el misterioso sistema Ackermann?* Descargado 2022-12-01, de <https://www.actualidadmotor.com/f1-2020-que-es-el-misterioso-sistema-ackermann/>
- Martínez Roig, E. (2021). Desarrollo de aspectos mecatrónicos para el control y monitoreo de pmsm de flujo axial emrax 188 para el proyecto fsae eléctrico.
- MB402022 Sistema de Suspensión*. (2019, febrero). Descargado 2023-03-19, de <https://sindicatoquevedo.escuelasconduccion.com/cursos/mecanica-basica-40-horas-2022/lecciones/mb402022-sistema-de-suspension/>
- MotorGiga. (2018, junio). *ÁNGULOS DE LAS RUEDAS - Definición - Significado*. Descargado 2023-03-12, de <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/angulos-de-las-ruedas-definicion-significado/gmx-niv15-con202.htm>
- Nebrija. (2022). *Formula SAE*. Descargado 2023-07-08, de <https://www.nebrija.com/>

medios/clubdelautomovil/formula-sae/

- Noroña, M. V., y Gómez, M. F. (2019). Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil: una revisión. *Enfoque UTE*, 10(1), 117–127.
- Páramo Carranza, L. A. (2021, mayo). Análisis y diseño del filtro de kalman para sistemas no lineales descritos por modelos difusos tipo takagi-sugeno.
- Plaza, D. (2019a). *La suspensión de un formula 1*. Descargado de <https://www.motor.es/formula-1/suspension-f1-201958028.html>
- Plaza, D. (2019b). *Suspensión activa*. Descargado 2023-03-07, de <https://www.motor.es/que-es/suspension-activa>
- Suspensión Activa Predictiva*. (2020, marzo). Descargado 2023-07-03, de <https://www.autofacil.es/tecnologia/suspension-activa-predictiva/183927.html> (Section: Tecnología)
- UNIDAD CONTROL ELECTRONICO SUSPENSIÓN REMAN*. (2023). Descargado 2023-06-25, de <https://www.cojaliparts.com/es/referencia/4461712030/unidad-control-electronico-suspension-reman/352487/>
- ¿Qué Es La Suspensión Inteligente?* (2020, octubre). Descargado 2023-03-12, de <https://rentingfinders.com/glosario/suspension-inteligente/>
- ÖHLINS. (2022). *TTX 36 EC*. Descargado 2023-05-31, de <http://www.rg3suspension.es/ttx-36-ec>

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 1

Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA		
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	MARCO TEÓRICO
¿Cuál es el diseño idóneo para un sistema de control para una suspensión activa delantera aplicada a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE?	Diseñar un sistema de control para una suspensión activa delantera aplicada a un vehículo monoplaza tipo fórmula SAE.	Suspensión activa.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	MARCO TEÓRICO
¿Cómo se podría identificar las variables de comportamiento de la suspensión delantera del vehículo tipo formula SAE basados en la literatura existente respecto a los diseños de sistemas de suspensión?	Identificar las variables de comportamiento de la suspensión delantera del vehículo tipo formula SAE basados en la literatura existente respecto a los diseños de sistemas de suspensión.	Variables de comportamiento.
¿Cuál es el diseño idóneo de un sistema de control capaz de interpretar los datos adquiridos del comportamiento de la suspensión delantera aplicada a un vehículo formula SAE?	Diseñar un sistema de control capaz de interpretar los datos adquiridos del comportamiento de la suspensión delantera aplicada a un vehículo formula SAE.	Diseño de control.
¿Cómo se podría elaborar una propuesta adecuada del diseño electrónico para el control de la suspensión delantera de un vehículo tipo formula SAE?	Elaborar una propuesta adecuada del diseño electrónico para el control de la suspensión delantera de un vehículo tipo formula SAE.	Diseño electrónico.

Anexo B: Código Matlab

```
1 M2=61.1;
2 M1=10.9;
3 K2=26220.47;
4 K1=15515.071;
5 B2=21487.2;
6 B1=100
7
8 G1=tf([B1*M2 (B1*B2+K1*M2) (K1*B2+B1*K2) K1*K2],[M1*M2 ((M2*B1)+ ...
9 (M2*B2)+(M1*B2)) ((K1*M2)+(K2*M2)+(B1*B2)+(M1*K2)) ...
10 ((B1*K2)+(B2*K1)) K1*K2])
11
12 [num, den]=tfdata(G1)
13 [A,B,C,D]=tf2ss(num{1},den{1})
14 EspEst=ss(A,B,C,D)
15
16 Cm= ctrb(A,B)
17 disp 'Valor del determinate de controlabilidad'
18 det(Cm)
19 disp 'Valor del rango matriz de controlabilidad'
20 rank(Cm)
21 % Osact=81.4;
22 % Tsact=4.1
23 ts=2
24 SD=1; %requerido
25 zita=(-log(SD/100))/(sqrt(pi^2+(log(SD/100))^2));
26 wn=4/zita/ts
27 theta=acosd(zita);
28 im=wn*sqrt(1-zita^2)
29 real=im/tand(theta);
30 s0=complex(-real,im)
31
32 GK=feedback(G1,1)
33 pd=pole(GK)
34
35 Aa=[A zeros(4,1); -C 0]
36 Ba=[B;0]
37 Ca=[C 0]
38 Kt=acker(Aa,Ba, [s0 pd(2) pd(3) pd(4) -10])
39 K=[Kt(1:4)]
40 Ki=-Kt(5)
```