



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR,**  
**MODALIDAD PRESENCIAL**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS AUXILIARES  
(DIRECCIÓN, SUSPENSIÓN Y FRENOS) PARA EL VEHÍCULO TIPO  
FORMULA SAE”**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Línea de Investigación: Tecnología Automotriz.**

**AUTORES:**

Anrrango Anrango Leonardo Jesús  
Meneses Narváez Maycol Armando

**DIRECTOR:**

Ing. Hernández Rueda Erik Paul, MSc.

**Ibarra, Septiembre 2024**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	DE	100409826-3	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Anrrango Anrango Leonardo Jesús	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Ibarra - Imbabura	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:ljanrrangoa@utn.edu.ec">ljanrrangoa@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		(06) 2939 395	<b>TELF. MOVIL</b> 0939013098

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	DE	040189796-2	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Meneses Narváez Maycol Armando	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Ibarra - Imbabura	
<b>EMAIL:</b>		<a href="mailto:mamenesesn@utn.edu.ec">mamenesesn@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		-	<b>TELF. MOVIL</b> 0982007688

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	Diseño y construcción de los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para el vehículo tipo formula SAE.
<b>AUTOR (ES):</b>	Anrrango Anrango Leonardo Jesús Meneses Narváez Maycol Armando
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	18/09/2024
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Automotriz
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Hernández Rueda Erik Paul, MSc.

## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Anrrango Anrrango Leonardo Jesús, con cédula de identidad Nro. 100409826-3, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 18 días del mes de septiembre de 2024

**EL AUTOR:**



Anrrango Leonardo

## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Meneses Narváz Maycol Armando, con cédula de identidad Nro. 040189796-2, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 18 días del mes de septiembre de 2024

**EL AUTOR:**

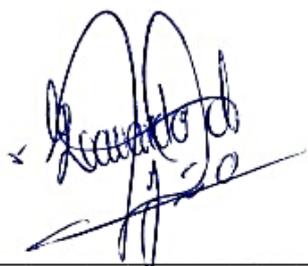
  
\_\_\_\_\_  
Meneses Maycol

## CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días, del mes de septiembre de 2024

### LOS AUTORES:



Anrrango Leonardo



Meneses Maycol

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 18 de septiembre de 2024

Ing. Hernández Rueda Erik Paul, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

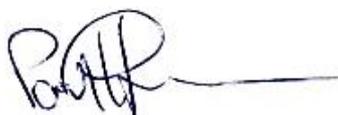


*ING. HERNÁNDEZ RUEDA ERIK PAUL, MSC.  
C.C.: 1002978060*

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

Ibarra, 18 de septiembre del 2024

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diseño y construcción de los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para el vehículo tipo formula SAE” elaborado por Leonardo Jesús Anrrango Anrrango, Maycol Armando Meneses Narváez, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



*ING. HERNÁNDEZ RUEDA ERIK PAUL, MSC.  
C.C.: 1002978060*



*ING. MEJO OBANDO JORGE LUIS  
C.C. 1718346529*

## **DEDICATORIA**

A mis padres, que, con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante me han guiado siempre por el buen camino. A ustedes, que, con su ejemplo de integridad, trabajo duro y perseverancia, me han enseñado que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación. Este logro es un reflejo de sus valores, que me han acompañado y sustentado en cada etapa de mi vida.

A mi familia, por ser un pilar en todo momento, por todos sus consejos y su constante ánimo.

A mis hermanas, por su constante respaldo y su cariño. A mis abuelitos, que durante toda mi vida han sido un refugio de paz y motivación.

A mis amigos, por su amistad sincera y apoyo incondicional, por todos los momentos compartidos y por las palabras de ánimo cuando las necesitaba.

**Anrrango Leonardo**

Hoy cuando concluyo mis estudios le dedico a mi madre María este logro por brindarme el apoyo incondicional y sus consejos que permitieron haberme hecho llegar hasta este punto de mi vida, de igual manera a mi padre Hugo que con su manera de enseñar y ejemplo de trabajo constante se obtiene todo lo que uno siempre se propone, ahora que es una meta más culminada se las dedico a mis dos seres queridos más importantes de mi vida.

A mis hermanos que también me brindaron motivación, consejos para seguir adelante y cumplir todas las metas que siempre planteo, de igual manera a mi hermana Carolina de estar siempre en los momentos más difíciles y estar pendiente de mi con su apoyo incondicional y motivacional. Finalmente, a mis amigos que también han aportado un granito de arena con sus consejos para cumplir los sueños propuestos.

**Meneses Maycol**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres quienes me brindaron la oportunidad para alcanzar este logro. Gracias por su apoyo inquebrantable en cada momento de mi vida y por ser mi mayor motivación. Este logro no habría sido posible sin ustedes.

A mi tutor de tesis, Ing. Paul Hernández quien nos orientó durante todo este proceso, su experiencia ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

A Maycol, mi compañero de tesis y amigo, gracias por tu compromiso y colaboración durante todo este proceso. A Maycol y Daniel, gracias por su amistad sincera, por su apoyo constante y por ser quienes son. Agradezco cada momento compartido, cada risa y cada enseñanza que me han brindado.

**Anrrango Leonardo**

A mis padres que ellos han sido las personas fundamentales que me han dado la oportunidad de cumplir este sueño y siempre han sido guías de vida, a mi familia y amigos que me han brindado su apoyo y fuerza para seguir adelante haciendo siempre lo bueno.

A Leonardo y Daniel compañeros durante toda la carrera que han demostrado su gran amistad y consejos para seguir siempre por el camino correcto, una amistad sincera.

Agradezco a la Universidad por abrirme las puertas y permitirme convertir en un profesional en lo que tanto me apasiona, gracias a cada docente por brindar ese apoyo y enseñanza que constituyen como la base de mi vida profesional.

Finalmente, mi agradecimiento sincero al tutor de mi tesis Ing. Paul Hernández, quien nos ha guiado y aportado con ideas para finalizar con éxito este proyecto.

**Meneses Maycol**

## RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto titulado diseño y construcción de los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para el vehículo Fórmula SAE, tiene como objetivo mejorar los sistemas auxiliares para obtener mayor rendimiento del prototipo Fórmula Student que cuenta la Universidad Técnica del Norte, permitiendo su participación en la competencia de Fórmula SAE. El prototipo existente no cumplía con los requisitos técnicos necesarios, lo que le impedía su aprobación en la revisión técnica de la competencia.

Se planteó como objetivo el diseñar e implementar sistemas auxiliares dirección, suspensión y frenos que permitirán al Fórmula Student cumplir con los requisitos técnicos mencionados por la normativa de la Fórmula SAE, empleando un software de diseño para las simulaciones CAD para optimizar su rendimiento. El enfoque metodológico consistió en analizar las características actuales del vehículo, implementar nuevos sistemas y realizar pruebas comparativas entre los sistemas anteriores y los nuevos, obteniendo mejoras significativas en la maniobrabilidad, estabilidad, seguridad y eficiencia del Fórmula Student.

Los resultados obtenidos validaron la adecuación del diseño propuesto, las pruebas de distancia de frenado reflejaron una mejora superando en un 30,02% a la distancia de frenado real con la teórica con los sistemas nuevos en estado normal, de igual manera en las pruebas de dirección mejorando la maniobrabilidad y estabilidad del vehículo conjunto a los nuevos amortiguadores mejorando el tiempo en las pruebas de SkidPad, logrando que el vehículo cumpla con los requisitos técnicos para la competencia, garantizando su participación segura y efectiva en los eventos de la Fórmula SAE.

**Palabras Clave:** Sistemas Auxiliares, dirección, suspensión, frenos, Fórmula Student, maniobrabilidad, estabilidad.

## ABSTRACT

The project titled "Design and Construction of Auxiliary Systems (steering, suspension, and brakes) for the Formula SAE Vehicle" aims to improve those systems to enhance the performance of the Universidad Técnica del Norte's Formula Student prototype, enabling its participation in the Formula SAE competition. The existing prototype did not meet the necessary technical requirements, thus inhibiting it from participating in the technical review of the competition.

The main objective was to design and implement steering, suspension and brake auxiliary systems using Computer Assisted Design (CAD) that would allow the Formula Student vehicle to meet the technical requirements outlined in the Formula SAE regulations, optimizing its overall performance. The methodological approach consisted of analyzing the current characteristics of the vehicle, implementing new systems, and conducting comparative tests between the previous and new systems, achieving significant improvements in the maneuverability, stability, safety, and efficiency of the Formula Student vehicle.

The results validated the appropriateness of the proposed design. The braking distance tests showed a 30,02% improvement, surpassing the real braking distance compared to the theoretical one with the new systems in normal conditions. Similarly, the steering tests improved the vehicle's maneuverability and stability, along with the new shock absorbers, which improved the lap time made at the SkidPad tests. This allowed the vehicle to meet the technical requirements for the competition, ensuring its safe and effective participation at the Formula SAE events.

**Keywords:** Auxiliary Systems, steering, suspension, brakes, Formula Student, maneuverability, stability.

## **LISTA DE SIGLAS**

**SAE.** Sociedad de Ingenieros de Automoción

**MMA.** Manual Metal Arc

**MIG.** Metal Inert Gas

**URES.** User Resultant Environment Simulation

**FDS.** Factor de Seguridad

## ÍNDICE DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	2
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD .....	3
CONSTANCIAS .....	5
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR .....	6
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR .....	7
DEDICATORIA.....	8
AGRADECIMIENTO.....	10
RESUMEN EJECUTIVO .....	12
ABSTRACT .....	13
LISTA DE SIGLAS .....	14
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	15
ÍNDICE DE TABLAS .....	18
ÍNDICE DE FIGURAS .....	19
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	21
INTRODUCCIÓN .....	22
Problema de Investigación .....	22
Justificación.....	22
Objetivos .....	23
Objetivo General .....	23
Objetivos Específicos.....	24
Alcance.....	24
CAPÍTULO I.....	26
1. MARCO TEÓRICO .....	26
1.1 Generalidades de las Competencias de la Formula SAE. ....	26
1.2 Dirección.....	27
1.2.1 Sistema de Dirección.....	27
1.2.2 Componentes Principales del Sistema de Dirección .....	27
1.3 Suspensión.....	28
1.3.1 Sistemas de Suspensión.....	28
1.3.2 Tipos de Suspensión.....	30
1.4 Frenos .....	31
1.4.1 Principios Básicos del Sistema de Frenos .....	31
1.4.2 Sistemas de Frenos .....	32
1.4.3 Componentes del Sistema de Frenos.....	32
1.5 Diseño de la Geometría de Dirección.....	33

1.5.1	Ángulo de Convergencia o Divergencia (Toe).....	34
1.5.2	Ángulo de Caída (Camber).....	35
1.5.3	Ángulo de Avance (Caster).....	36
1.5.4	Angulo de Inclinación (Kingpin Angle).....	37
1.6	Geometría de Ackerman.....	38
1.7	Masas Suspendidas y no Suspendidas.....	39
1.8	Parámetros de Cinemática y Dinámica .....	40
1.8.1	Centro de Gravedad.....	40
1.8.2	Centro Instantáneo de Rotación (CRI).....	40
1.8.3	Centro de Balanceo (Roll Center) .....	41
CAPÍTULO II .....		42
2.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
2.1	Materiales.....	42
2.1.1	Vehículo de Estudio .....	42
2.1.2	Frenómetro Maha 2120 .....	43
2.1.3	Soldadora Elite MP 130 .....	43
2.1.4	Kit de cinturón de seguridad .....	45
2.1.5	Kit de volante desmontable .....	45
2.1.6	Bomba de Frenos y Cañerías.....	46
2.2	Metodología .....	46
2.2.1	Pruebas para Verificar el Sistema de Dirección.....	48
2.2.2	Pruebas para Verificar el Sistema de Suspensión .....	51
2.2.3	Pruebas para Verificar el Sistema de Frenos.....	55
2.2.4	Mejoramiento del Sistema de Dirección .....	64
2.2.5	Mejoramiento del Sistema de Suspensión.....	82
2.2.6	Mejoramiento del Sistema de Frenos .....	84
CAPÍTULO III .....		86
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
3.1	Análisis de la Simulación.....	86
3.1.1	Análisis de Resultados de la Simulación Engranaje de Entrada .....	89
3.1.2	Análisis de Resultados de la Simulación Engranaje de Salida.....	92
3.2	Análisis del Sistema de Dirección.....	94
3.2.1	Pruebas de Manejo en Línea Recta .....	95
3.2.2	Pruebas de Radio de Giro.....	96
3.3	Análisis del Sistema de Suspensión .....	97
3.3.1	Pruebas de SkidPad .....	97
3.3.2	Pruebas de Rebote Prolongado.....	98

3.4	Análisis del Sistema de Frenos.....	98
3.4.1	Prueba de Capacidad de Bloqueo de las Cuatro Ruedas.....	99
3.4.2	Prueba Distancia de Frenado.....	104
CAPÍTULO IV.....		108
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
4.1	Conclusiones.....	108
4.2	Recomendaciones.....	111
REFERENCIAS.....		112
ANEXOS.....		116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Dimensiones del Fórmula Student</i> .....	42
Tabla 2. <i>Especificaciones de la Soldadora Elite MP130</i> .....	44
Tabla 3. <i>Resultados – Dirección en línea recta</i> .....	49
Tabla 4. <i>Resultados – Dirección en línea recta con sistema reductor de giro</i> .....	49
Tabla 5. <i>Resultados-Radio de giro</i> .....	50
Tabla 6. <i>Resultados - Radio de giro con el sistema reductor de giro</i> .....	50
Tabla 7. <i>Resultados – Skidpad</i> .....	52
Tabla 8. <i>Resultados – Skidpad con amortiguadores en estado normal</i> .....	53
Tabla 9. <i>Resultados – Skidpad con amortiguadores en estado rígidos</i> .....	53
Tabla 10. <i>Resultados-Rebote prolongado</i> .....	54
Tabla 11. <i>Resultados-Rebote prolongado con amortiguadores en estado normal</i> .....	54
Tabla 12. <i>Resultados-Rebote prolongado con amortiguadores en estado rígido</i> .....	55
Tabla 13. <i>Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas delanteras</i> .....	56
Tabla 14. <i>Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas delanteras</i> .....	57
Tabla 15. <i>Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas traseras</i> .....	57
Tabla 16. <i>Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas traseras</i> .....	58
Tabla 17. <i>Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas delanteras</i> .....	59
Tabla 18. <i>Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas delanteras</i> .....	59
Tabla 19. <i>Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas traseras</i> .....	60
Tabla 20. <i>Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas traseras</i> .....	60
Tabla 21. <i>Resultados Distancia de Frenado</i> .....	62
Tabla 22. <i>Resultados Distancia de Frenado Amortiguadores Estado Normal</i> .....	63
Tabla 23. <i>Resultados Distancia de Frenado Amortiguadores Rígidos</i> .....	64
Tabla 24. <i>Módulos y pasos de engranes estandarizados UNE3121</i> .....	70
Tabla 25. <i>Propiedades del Acero SAE 4140</i> .....	76
Tabla 26. <i>Propuestas de selección de amortiguadores</i> .....	83
Tabla 27. <i>Matriz de decisión para la selección del amortiguador</i> .....	84
Tabla 28. <i>Resultados obtenidos del Mallado</i> .....	87
Tabla 29. <i>Resultados de la Prueba de Radio de Giro</i> .....	96
Tabla 30. <i>Prueba de Capacidad de Bloqueo de las Cuatro Ruedas</i> .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Sistema de suspensión pasiva</i> .....	29
Figura 2 <i>Sistema de suspensión activa</i> .....	30
Figura 3. <i>Esquema del eje rígido</i> .....	31
Figura 4. <i>Vista Superior del Vehículo, ángulo de convergencia y divergencia</i> .....	34
Figura 5. <i>Ángulo Camber</i> .....	36
Figura 6. <i>Ángulo Caster</i> .....	37
Figura 7. <i>Ángulo de inclinación</i> .....	37
Figura 8. <i>Geometría de Ackerman</i> .....	38
Figura 9. <i>Esquema de la composición de la suspensión</i> .....	39
Figura 10. <i>Centro de gravedad de un Formula SAE</i> .....	40
Figura 11. <i>Centro Instantáneo de Rotación</i> .....	41
Figura 12. <i>Centro de balanceo</i> .....	41
Figura 13. <i>Formula Student</i> .....	42
Figura 14. <i>Frenómetro Maha MBT-2120</i> .....	43
Figura 15. <i>Soldadora Elite MP 130</i> .....	44
Figura 16. <i>Cinturón de seguridad</i> .....	45
Figura 17. <i>Acople para volante desmontable</i> .....	45
Figura 18. <i>Bomba de Frenos</i> .....	46
Figura 19. <i>Diagrama de Flujo</i> .....	47
Figura 20. <i>Circuito de Skidpad</i> .....	51
Figura 21. <i>Prueba - Bloqueo cuatro ruedas</i> .....	56
Figura 22. <i>Ángulo de viraje de las ruedas</i> .....	65
Figura 23. <i>Diagrama para el ángulo de giro externo</i> .....	66
Figura 24. <i>Diagrama del ángulo de giro de las ruedas internas</i> .....	67
Figura 25. <i>Diagrama del ángulo de giro de las ruedas externas</i> .....	68
Figura 26. <i>Diseño Piñón conducido</i> .....	73
Figura 27. <i>Diseño del Piñón Conductor</i> .....	74
Figura 28. <i>Ensamble de engranajes reductores</i> .....	75
Figura 29. <i>Vista explosionada del ensamble del prototipo reductor de giro</i> .....	75
Figura 30. <i>Diagrama de cuerpo libre del Neumático</i> .....	77
Figura 31. <i>Coefficientes de fricción</i> .....	78
Figura 32. <i>Relación de esfuerzos el sistema de dirección</i> .....	79
Figura 33. <i>Mallado de los engranajes</i> .....	86
Figura 34. <i>Determinación de los puntos de fijación de los engranajes</i> .....	88
Figura 35. <i>Determinación de las fuerzas sobre la cara de los dientes de los engranajes</i> .....	88
Figura 36. <i>Análisis de tensiones del engranaje de entrada</i> .....	89
Figura 37. <i>Análisis de desplazamientos del engranaje de entrada</i> .....	90
Figura 38. <i>Análisis del Factor de Seguridad del engranaje de entrada</i> .....	91
Figura 39. <i>Análisis de tensiones del engranaje de salida</i> .....	92
Figura 40. <i>Análisis de desplazamientos del engranaje de salida</i> .....	93
Figura 41. <i>Análisis de factor de seguridad del engranaje de salida</i> .....	94
Figura 42. <i>Resultados de la Prueba de Línea Recta</i> .....	95
Figura 43. <i>Resultados de las Pruebas de SkidPad</i> .....	97
Figura 44. <i>Fuerza de frenado en las llantas delanteras Sistemas Antiguos</i> .....	100
Figura 45. <i>Fuerza de frenado en las llantas delanteras Sistemas Nuevos</i> .....	101
Figura 46. <i>Fuerza de frenado en las llantas traseras Sistemas Antiguos</i> .....	102
Figura 47. <i>Fuerza de frenado en las llantas traseras Sistemas Nuevos</i> .....	103
Figura 48. <i>Distancia de Frenado con Sistemas Antiguos</i> .....	104

Figura 49. <i>Distancia de Frenado con Sistemas Nuevos Estado Normal</i> .....	105
Figura 50. <i>Distancia de Frenado con Sistemas Nuevos con Configuraciones</i> .....	106
Figura 51. <i>Resultados Completos de la Distancia de Frenado Real</i> .....	107

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>Condición de Ackerman</i> .....	38
Ecuación 2. <i>Ángulo de desviación</i> .....	48
Ecuación 3. <i>Distancia de frenado</i> .....	61
Ecuación 4. <i>Radio de giro del Vehículo</i> .....	66
Ecuación 5. <i>Radio de giro de la rueda interna</i> .....	67
Ecuación 6. <i>Radio de giro de la rueda externa</i> .....	67
Ecuación 7. <i>Desmultiplicación de la dirección</i> .....	69
Ecuación 8. <i>Relación de transmisión de los Engranés</i> .....	69
Ecuación 9. <i>Diámetro Exterior</i> .....	71
Ecuación 10. <i>Diámetro Primitivo</i> .....	71
Ecuación 11. <i>Paso Circular</i> .....	71
Ecuación 12. <i>Diámetro Interno</i> .....	72
Ecuación 13. <i>Grosor del diente</i> .....	72
Ecuación 14. <i>Sumatoria de fuerzas en el eje X del neumático</i> .....	77
Ecuación 15. <i>Sumatoria de fuerzas en el eje Y del neumático</i> .....	77
Ecuación 16. <i>Fuerza de fricción</i> .....	78
Ecuación 17. <i>Relación de fuerzas y radios del sistema de dirección</i> .....	79
Ecuación 18. <i>Par de la columna de dirección</i> .....	80

## INTRODUCCIÓN

### **Problema de Investigación**

Este proyecto investigativo se realiza por necesidades detectadas en la universidad, esta institución cuenta con la carrera de Ingeniería Automotriz, en la actualidad los estudiantes que la conforman buscan poder competir en este evento de tipo Formula SAE, pero existe un potencial impedimento, la carrera de Ingeniería Automotriz no ha podido participar en estos eventos dado que no poseen con un vehículo que cumpla los requisitos para aprobar la revisión técnica de la competencia.

En la Universidad existe un prototipo, pero este no cuenta con el adecuado diseño y la correcta construcción de los sistemas auxiliares (FRENOS, DIRECCIÓN Y SUSPENCIÓN) dando como resultado la poca seguridad al piloto, la falta de maniobrabilidad, el limitado estudio en cada sistema del vehículo y como consecuencia no se puede lograr que el prototipo apruebe la revisión técnica.

A demás, existen fallas que se pueden presentar al no realizar un análisis de diseño adecuado, esto puede provocar desgastes en los neumáticos, comportamientos inestables en el sistema de dirección, ruidos anormales en las partes de dirección y suspensión del vehículo.

### **Justificación**

En el diseño y construcción de los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para el vehículo tipo formula SAE, estos sistemas son de gran importancia en el vehículo, ya que de estos dependen la maniobrabilidad, eficiencia y rendimiento que el vehículo va a ofrecer, con lo que esto viene de la mano con la seguridad de los pilotos y del evento en sí.

Además, con los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos durante el curso de la carrera de Ingeniería Automotriz se busca mejorar los aspectos antes mencionados, que son: la

maniobrabilidad, eficiencia y rendimiento del vehículo; esto con el fin de obtener un vehículo con mejores prestaciones para la competencia.

Con respecto al 'Plan de Creación de Oportunidades 2021 – 2025' nuestro proyecto se relaciona con un par de los objetivos existentes, pero hemos decidido enfocarnos en el objetivo siete, que se enfoca en: Potenciar a todos los ciudadanos esto se realiza con el objetivo de promover una educación que sea más innovadora, inclusiva y de calidad, esto desde los niveles más bajos hasta los niveles superiores, de esta forma se logrará instruir mejores estudiantes desde temprana edad [1]. En lo que detalla este objetivo existen cinco políticas, de las cuáles haremos énfasis en el número dos y cuatro, que dicen respectivamente: “Promover la modernización y eficiencia del modelos educativos utilizando innovación y herramientas tecnológicas” y “fortalecer los sistemas de educación superior de acuerdo con los principios de libertad, autonomía responsable, igualdad de oportunidades, calidad y pertinencia; promoviendo una investigación altamente efectiva” [1].

Este proyecto aporta a la Universidad y en efecto a nuestra carrera, ya que es de carácter innovador; se busca lograr que el vehículo apruebe la revisión técnica de la SAE, para lo cual se utilizará una lista de recursos en los cuales se incluye el uso de herramientas tecnológicas, y todo esto se logrará realizando investigaciones de alto impacto con el fin de absorber gran cantidad de conocimiento que será un punto clave para lograr los objetivos propuestos.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Diseñar e implementar los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para un vehículo tipo Fórmula “Student”, para conseguir un prototipo que apruebe las revisiones establecidas por la normativa SAE, aplicando todos los conocimientos adquiridos tanto teóricos como prácticos.

### ***Objetivos Específicos***

- Analizar las características de los distintos sistemas que componen el vehículo tipo Fórmula “Student”, en base a los requisitos que establece la normativa de la SAE.
- Diseñar y simular los sistemas auxiliares utilizando un software CAD para conseguir resultados con mayor eficiencia y que cumplan con los requisitos.
- Implementar los sistemas auxiliares en el bastidor tipo Fórmula “Student” con el que cuenta la carrera y realizar pruebas comparativas entre los nuevos sistemas y los anteriores.

### **Alcance**

La presente investigación procura diseñar, elaborar e implementar los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) en el vehículo tipo Fórmula Student existente en el campus de la Universidad, en el cual se realizará unas pruebas de los sistemas auxiliares antiguos con los que actualmente se diseñará e implementará. Para los diseños y simulaciones se utilizarán softwares CAD con los que cuenta la universidad.

Para que el vehículo apruebe la revisión técnica de estos eventos debe de cumplir ciertos requisitos que da a conocer la SAE, de ellos podemos mencionar que el recorrido mínimo de la suspensión con el piloto sentado debe ser de 50mm en los amortiguadores delanteros y traseros, además el vehículo debe de contar con un cilindro maestro hidráulico para frenos, este requisito es obligatorio debido a que se realiza pruebas de frenado por lo que el vehículo debe de tener la capacidad de bloquear las cuatro ruedas al detener el vehículo en línea recta. Se debe considerar que la dirección debe estar conectada mecánicamente a las ruedas delanteras, en estos eventos los sistemas de dirección accionados eléctricamente están prohibidos.

Por estas razones esta investigación se realizará acorde y de cumplimiento a las reglas especificadas por la SAE, para que el diseño e implementación de los sistemas auxiliares puedan ser aprobados en la revisión técnica de este evento.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Generalidades de las Competencias de la Formula SAE.

La Fórmula SAE es una competición anual donde los equipos son conformados por estudiantes de universidades de pregrado o posgrado, ellos se encargan de diseñar y construir un prototipo estilo fórmula, previo a la competencia el vehículo debe pasar pruebas y este tipo de eventos ayuda a que los estudiantes que formarán los equipos demuestren sus creatividades, habilidades y conocimientos adquiridos durante toda la carrera. El diseño del vehículo es un Fórmula Student que debe cumplir varias reglas y restricciones que son controladas por la SAE [2].

Previo a la competición el vehículo pasa por inspecciones muy rigurosas que son examinados por personas que son delegadas de seguridad, en ellas esta una serie de eventos dinámicos que se realizan pruebas de frenado, aceleración y un autocross. Cuando el vehículo pase la inspección, comienza las pruebas dinámicas ya mencionadas, una de ellas está relacionada con la seguridad del conductor, este debe tener el equipo de protección personal (casco, guantes y overol) y debe tener la habilidad de quitar el volante, desconectar el arnés y bajarse del vehículo en menos de cinco segundos [3].

Otros factores que se toman en cuenta cuando se realiza el diseño son los costos y credibilidad del prototipo, este debe ser capaz de terminar cualquier competencia y cumplir con las reglas que la Fórmula SAE las describe. El prototipo debe ser capaz de ser controlado por cualquier piloto sin importar su género y con una estatura promedio. El vehículo debe tener la facilidad, sencillas y poco costoso en lo que se refiere al mantenimiento, aquí los estudiantes que conforman el equipo tienen la capacidad de demostrar sus habilidades.

## **1.2 Dirección**

### ***1.2.1 Sistema de Dirección***

Los sistemas de dirección de un vehículo conforman una parte crítica del vehículo ya que permiten al piloto controlar la dirección de manera estable y por tanto le brinda más seguridad y precisión para el trazado en curvas, esquivar y adelantar obstáculos [4]. En la actualidad todos los sistemas de dirección que existen han ido mejorando, esto con el afán de mejorar la maniobrabilidad de los vehículos. Existen varios tipos de sistemas de dirección: Mecánica, asistida electrónicamente, asistida hidráulicamente, dirección activa, etc. Pero para este caso utilizaremos una dirección con el mecanismo piñón cremallera que tiene la tarea de convertir el movimiento rotatorio proveniente del volante desplazamiento lineal de los axiales de la dirección [5]. Además, este sistema cuenta con ventajas respecto a los otros sistemas, como: construcción sencilla, es eficiente, fabricación más económica, cuenta con una fácil limitación del movimiento, etc. [4].

### ***1.2.2 Componentes Principales del Sistema de Dirección***

El mecanismo tiene como finalidad dirigir las ruedas para que el vehículo siga la trayectoria que el piloto determine. A continuación, se detallará las principales partes del sistema de dirección de un vehículo tipo Formula SAE:

**1.2.2.1 Volante.-** Elemento mediante el cual se transmite la fuerza tangencial que provocará que se genere el par de giro y determinará el giro que se producirá en el vehículo [6] La armadura es de varilla de acero y se encuentra sujeta a un elemento central que está acoplado a la barra de dirección, dicha armadura es recubierta con un material que brinda una superficie ligeramente áspera, esto hace que el piloto tenga un mejor agarre sobre su volante [5].

**1.2.2.2 Columna de Dirección.-** Puede estar constituida por un eje rígido o hueco, su función es transmitir el par de giro a la cremallera [6]. Contamos con dos barras que están unidas con juntas homocinéticas que obtienen la posición del volante y aumentan la seguridad y maniobrabilidad del vehículo. Dichas barras unen el volante con la caja de dirección [5].

**1.2.2.3 Caja de Dirección.-** La caja de dirección está conformada por el conjunto de engranajes que se encuentran en el apartado del tornillo sin fin, el cual tiene la misión de: convertir el par que es transmitido por la columna de dirección conjunto con el brazo de mando y a la vez reduce el rango de giro que recibe y de esta forma logra que el piloto no realice demasiado esfuerzo al momento que gire las ruedas [5].

**1.2.2.4 Brazos de Dirección.-** Conectan la cremallera y la mangueta de las ruedas delanteras y logran que el movimiento del volante se transmita de manera correcta y precisa para maniobrar el vehículo [6].

**1.2.2.5 La Cremallera.-** Es una barra larga y recta que cuenta con dientes a lo largo de su cuerpo. Estos dientes se conectan con los dientes del piñón y de esa forma logran transmitir el movimiento del volante a la dirección de las llantas. Esta cremallera está conectada en sus partes finales a los brazos de dirección [5].

## **1.3 Suspensión**

### ***1.3.1 Sistemas de Suspensión***

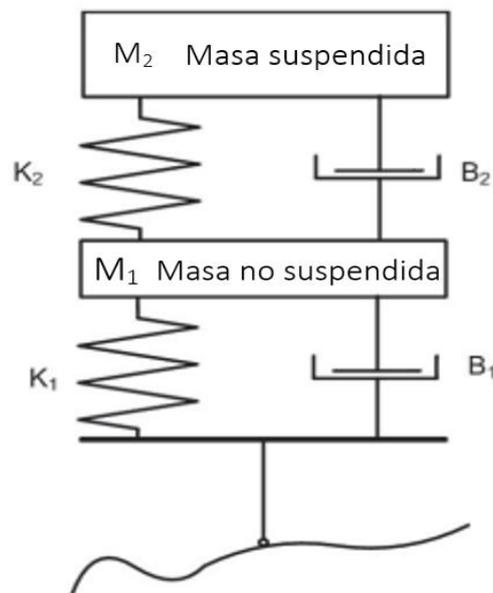
La suspensión de un vehículo se encarga de conectar el chasis del vehículo con las ruedas directrices, para brindar al conductor un viaje suave y estable absorbiendo las irregularidades que existen en el camino durante la conducción [7]. En la actualidad el sistema de suspensión ha mejorado notoriamente, hoy en día mejora la maniobrabilidad y le brinda al piloto el confort necesario. Los sistemas de suspensión pasiva se los caracteriza por usar resortes como

almacenador de energía y amortiguadores para disiparla, los parámetros para la suspensión son fijos, van a depender de las características del terreno y la carga que va a estar ejercida [8].

En la figura 1 se observa que la  $K_1$  representa la rigidez del neumático y la  $K_2$  denota la rigidez de la suspensión. Por otro lado,  $B_1$  corresponde al coeficiente de amortiguamiento del neumático, y  $B_2$  al coeficiente de amortiguamiento de la suspensión. Al modificar la rigidez o el coeficiente de amortiguamiento en una suspensión pasiva se presentan problemas de confort o lo más crucial la maniobrabilidad [8].

### Figura 1

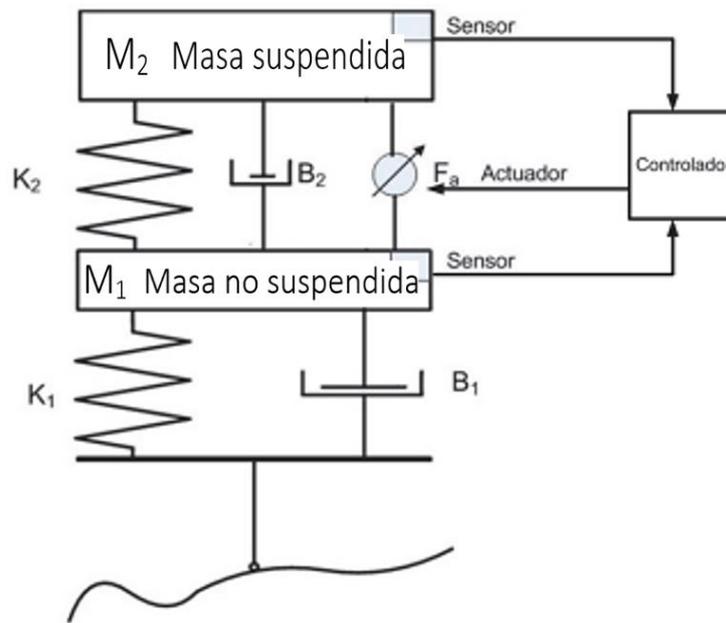
*Sistema de suspensión pasiva*



Obtenida de [9].

En cambio, los sistema de suspensión activa con el uso de actuadores y sensores, ayudaran a almacenar y disipara la energía. Se puede observar en la figura 2 un sistema de suspensión activa en el cual se usan sensores, actuadores y una unidad de control, los sensores analizan el perfil de la calzada y por medio de señales eléctricas se comunica con la unidad de control que es la encargada de controlar los actuadores [9].

**Figura 2**  
*Sistema de suspensión activa*



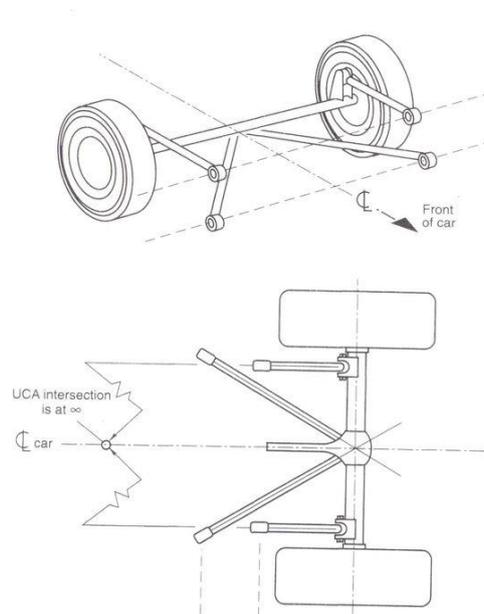
Obtenida de [9].

### 1.3.2 Tipos de Suspensión

Existen dos tipos de suspensión:

**1.3.2.1 Suspensiones Rígidas.-** En la figura 3 se observa un esquema de un eje rígido que une a ambas ruedas, varias ventajas se tienen al usar este tipo de suspensión que es la simplicidad al momento de la fabricación y ensamblaje, estos sistemas resisten mayores cargas y finalmente mayor control de caída de las ruedas debido a que ambos neumáticos están unidos al mismo eje, esto no producirá una variación del camber [10].

**Figura 3.**  
*Esquema del eje rígido*



Obtenida de [11].

**1.3.2.2 Suspensiones Independientes.-** Este sistema de suspensión es el más adecuado para el diseño y construcción de nuestro prototipo formula SAE, este ofrece al piloto mayor estabilidad debido a que absorbe las vibraciones producidas por el tipo de calzada de manera independiente de las ruedas de un mismo eje. En este sistema podemos enumerar algunas variaciones existentes son eje de pivote, brazos de arrastre, diseño McPherson, diseño paralelogramo deformable y diseño multilink [10].

## 1.4 Frenos

### 1.4.1 Principios Básicos del Sistema de Frenos

El principio de un sistema de frenos en un vehículo se basa en la disminución y conversión de energía cinética en calor mediante la fricción que se produce entre las pastillas y los discos de freno [12]. Al pisar el pedal de freno, se crea presión hidráulica que activa las pinzas de freno, aplicando las pastillas sobre los discos y deteniendo el vehículo. Es esencial lograr un equilibrio adecuado entre el frenado de las ruedas delanteras y traseras para mantener la estabilidad del

vehículo. La seguridad, el diseño de calidad y el mantenimiento son fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo y seguro del sistema de frenos en la competición [13].

#### ***1.4.2 Sistemas de Frenos***

El sistema de frenos pertenece a los sistemas más relevantes de seguridad activa y es crucial para garantizar la seguridad y el rendimiento del vehículo durante las pruebas y competiciones.

El sistema de frenos debe ser diseñado de una forma que proporcione una frenada eficiente y controlable, permitiendo que el piloto pueda detener el vehículo de manera segura y rápida cuando sea necesario [14]. Además, el sistema de frenos contribuye para que el vehículo pueda ser más veloz, su función no es sólo servir como un sistema de seguridad, al mejorar la eficiencia de frenado el vehículo perderá menos segundos en las frenadas, esto al momento de ingresar en una curva o al momento de evitar obstáculos [13].

#### ***1.4.3 Componentes del Sistema de Frenos***

Los componentes fundamentales que constituyen al sistema de frenos de un vehículo Formula SAE son:

**1.4.3.1 Depósito del Líquido de Freno.-** Suministra y almacena el líquido de freno, esto con el fin de sustentar todo el circuito. Este componente por lo general se encuentra ubicado sobre la bomba maestra [15].

**1.4.3.2 Bomba Maestra de Freno.-** Transforma la fuerza que el piloto ejerce sobre el pedal del freno y de esta forma suministra el líquido de frenos a presión a todo el circuito de frenado, lo realiza mediante las cañerías y lo hace hasta los cilindros del freno [12].

**1.4.3.3 Cañerías.-** Movilizan el líquido de frenos a través de todo el sistema de frenos. Estas líneas deben estar bien diseñadas y aseguradas para evitar pérdidas de presión o daños durante la competición, deben ser blindadas por un material diferente al plástico, para que estas sean muy resistentes [15].

**1.4.3.4 Caliper.-** Contiene las pastillas de freno y ejercen presión sobre los discos de freno cuando el piloto acciona el pedal de freno. En este segmento contamos con dos tipos de pinzas de freno: Flotante y fija. La pinza de freno flotante se basa en el principio de la tercera Ley de Newton, la pinza se monta sobre el soporte que es móvil. La pinza de freno fija cuenta con pistones opuestos [12]. Las pastillas de freno se presionan contra el disco, esto se produce mediante el accionamiento de los pistones de freno y así se produce la desaceleración [15].

**1.4.3.5 Pastillas de Freno.-** Son bloques de material de fricción de alta resistencia que se encuentran en el interior de las pinzas de freno. Al accionar el pedal de freno, las pastillas se aplican a los discos de freno, generando la fricción necesaria para detener el vehículo [15].

**1.4.3.6 Disco de Freno.-** Los discos de freno consisten en discos metálicos montados en el cubo de la rueda. Cuando se aplica la fuerza de frenado, las pinzas de freno presionan las pastillas de freno contra los discos, lo que crea una fricción que disminuye la velocidad del vehículo. En este componente es donde tiene lugar la transformación de energía cinética en calorífica, esto sucede al momento que se acciona el pedal. Existen dos tipos de discos: Ventilados y sólidos. Su aplicación depende netamente de las temperaturas a las que será expuesto y el calor que se necesite disipar [15].

## **1.5 Diseño de la Geometría de Dirección**

Para garantizar que el manejo sea seguro y de fácil maniobrabilidad las ruedas deben de ser alineadas según la dirección del volante y no cambiar su orientación debido a las irregularidades

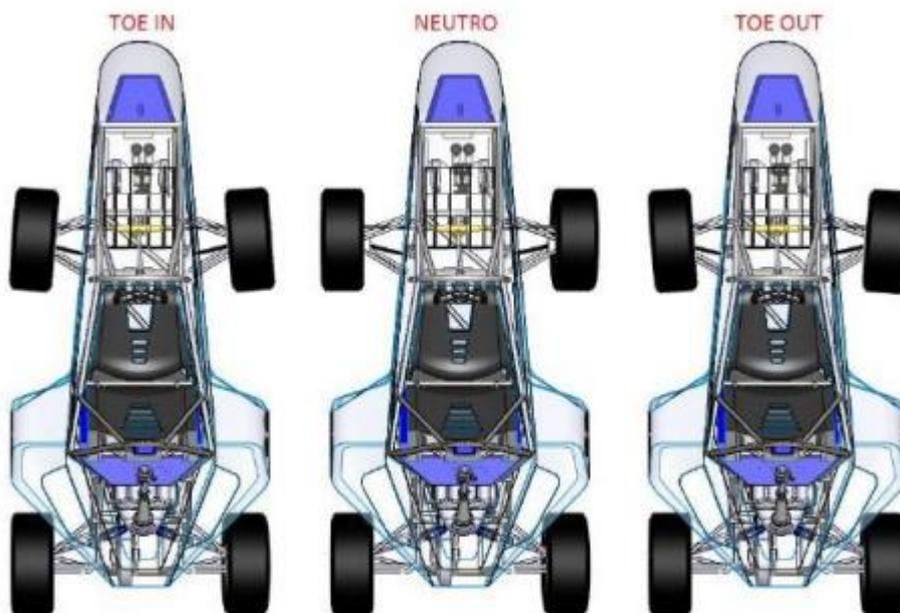
de la carretera. Por lo que es importante que las ruedas cumplan una serie de geometrías y diseños [16].

### 1.5.1 Ángulo de Convergencia o Divergencia (Toe)

El ángulo de convergencia o divergencia indica la orientación de las ruedas con respecto a la línea vertical al tener una vista superior o inferior del vehículo. Para representar el ángulo se utiliza la medida en grados o fracciones de milímetros, como se observa en la figura 4, existe convergencia (*toe in*) en el momento en que la parte delantera de las ruedas apuntan al centro y existe divergencia (*toe out*) en el momento en que la parte delantera del vehículo apunta hacia afuera [17].

#### Figura 4.

*Vista Superior del Vehículo, ángulo de convergencia y divergencia*



Obtenida de [18].

Es importante analizar el uso de este ángulo, en este caso el formula SAE tiene una tracción trasera, la resistencia a la rodadura crea una resistencia que hace que las horquillas de la suspensión trasera se muevan en relación con los bujes, por ende, la convergencia es ideal

porque aumenta la tracción en las ruedas traseras antes que en las delanteras al iniciar una curva que es lo idóneo ya que el eje trasero es el que propulsa al vehículo [17].

Cabe recalcar que, si existe una convergencia o divergencia excesiva en el vehículo, esto podría generar grandes problemas y fallas de las cuales se puede mencionar: un excesivo desgaste en la superficie de la banda de rodadura esta va a depender de, si es una convergencia existirá un desgaste en la parte exterior del neumático por lo contrario si es una divergencia existirá un desgaste por la parte interior del neumático y a su vez esto provoca una pérdida de maniobrabilidad [17].

### ***1.5.2 Ángulo de Caída (Camber)***

El Camber es conocido como el ángulo de caída de los neumáticos, este representa la inclinación de la rueda cuando se observa desde el frente del vehículo formando un eje vertical. Su principal función es el de distribuir el peso del vehículo sobre la banda de rodadura del neumático de forma homogénea para evitar desgastes que no sean uniformes [19].

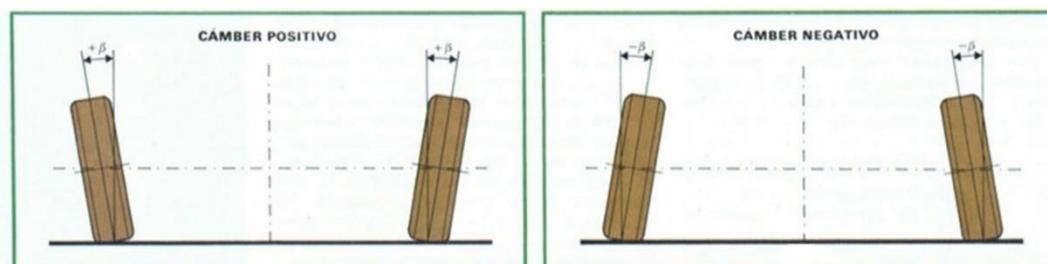
Existe tres tipos de ángulos de caída obtenido [20]:

**1.5.2.1 Camber Cero.-** No existe una inclinación en las ruedas con respecto al eje vertical de los neumáticos. El camber cero permite que las ruedas tengan mayor superficie de contacto con el suelo o calzada cuando el vehículo se movilice en línea recta, obteniendo una buena frenada y a su vez mayor tracción, en este existe un desgaste regular en la banda de rodadura, cabe recalcar que si el vehículo ingresa a una curva la rueda tendrá una inclinación de camber positivo haciendo que exista un desgaste en el exterior del neumático provocado por la inercia de la carrocería y esto limitara el agarre del neumático con la calzada [20].

**1.5.2.2 Camber Positivo.-** Se observa en la figura 5 que la rueda se inclina respecto al eje vertical hacia la parte exterior del vehículo vista desde la parte frontal, esto provocará un menor agarre con la calzada y ocasionará un desgaste en la parte exterior de la banda de rodadura, al entrar en una curva el camber positivo se aumenta y como consecuencia disminuye el agarre de la zona de superficie contra la calzada, de igual manera su desgaste será de forma irregular [20].

**1.5.2.3 Camber Negativo.-** Se observa en la figura 5 la rueda se inclina respecto al eje vertical hacia la parte interior del vehículo, esto provocará un menor agarre con la calzada disminuyendo el consumo y a su vez se obtendrá un desgaste irregular, pero al entrar en una curva esto compensará ya que la rueda tendrá mayor agarre y un desgaste regular al estar en esta situación [20].

**Figura 5.**  
*Ángulo Camber*



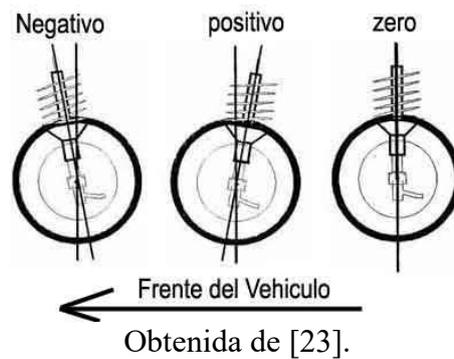
Obtenida de [21].

### 1.5.3 *Ángulo de Avance (Caster)*

El ángulo caster es la inclinación hacia el frente y hacia atrás del eje del sistema de dirección vista lateralmente del vehículo con respecto al eje vertical como se observa en la figura 6, de igual manera existe caster cero, positivo y negativo. Este ángulo es muy importante analizarlo debido a que es el encargado restablecer el volante a su origen de partida, ya sea girando la dirección a la izquierda o derecha.

El caster positivo brinda estabilidad en la dirección, pero al entrar a una curva por ejemplo el vehículo gira a la derecha este tiende a ladearse hacia el exterior de la curva, en cambio al tener un caster negativo el vehículo tiende a ladearse hacia el interior de la curva, debido a que el vehículo tiende a levantar su lado izquierdo y bajar el lado derecho, lo que es lo contrario al tener un caster positivo [22].

**Figura 6.**  
*Ángulo Caster*

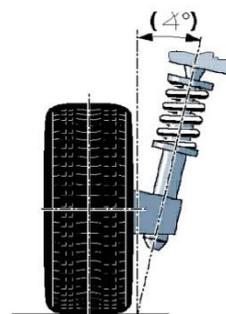


Obtenida de [23].

#### 1.5.4 *Ángulo de Inclinación (Kingpin Angle)*

El ángulo de inclinación está definido como la relación entre el eje del pivote de dirección y la línea vertical de la rueda vista desde la parte frontal del vehículo como en la figura 7, se proyecta una línea desde la rótula superior a la inferior con respecto al eje vertical de la rueda. Este ángulo tiende a generar un efecto de auto centrado en el sistema de dirección, provoca que el vehículo continúe con su trayectoria recta, reduciendo un esfuerzo en la maniobrabilidad de la dirección [24].

**Figura 7.**  
*Ángulo de inclinación*

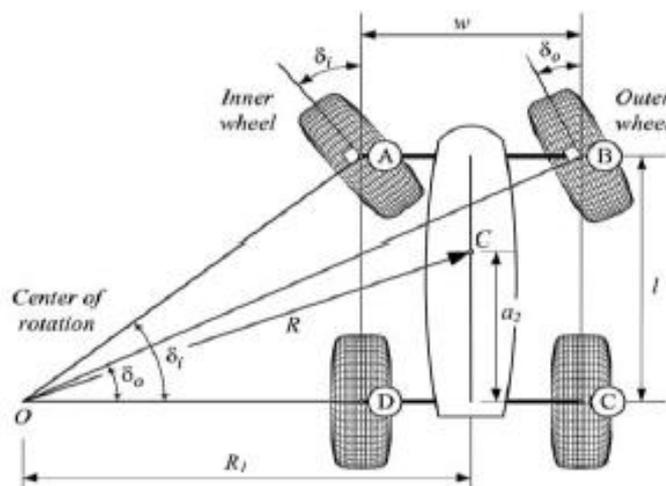


Obtenida de [25].

## 1.6 Geometría de Ackerman

Al entrar a una curva, la rueda externa debe recorrer más que la interna, ya que el radio de trayectorias es diferente y cada rueda debe girar a distintas revoluciones, se fundamenta en hacer un giro correcto sin que el vehículo arrastre las ruedas con un ángulo de giro. Se observa que en la figura 8, el ángulo mayor pertenece a la rueda delantera interna y la rueda externa tiene un ángulo menor, si el vehículo girase con los mismos ángulos se produciría un desgaste en los neumáticos debido a que los arrastraría y produciría calor al neumático, provocando que el piloto pierda el control del vehículo a altas velocidades [6].

**Figura 8.**  
*Geometría de Ackerman*



Obtenida de [26].

Esta geometría puede ser aplicada para vehículos de competencia debido a que este tendrá velocidades altas y giros bruscos, al tener un acople conectada a los brazos de la dirección formaran un paralelogramo aproximado el cual tiene como objetivo generar los ángulos idóneos al momento de tomar una curva, conforme a lo que es la geometría de Ackerman [6]

La geometría de Ackerman se expresa por la siguiente formula:

**Ecuación 1.**  
*Condición de Ackerman*

$$\cot \delta_o + \cot \delta_i = \frac{W}{l}$$

Donde:

$\delta_0$  pertenece al ángulo de la rueda externa

$\delta_i$  pertenece al ángulo de la rueda interna

$l$  es la distancia entre ejes

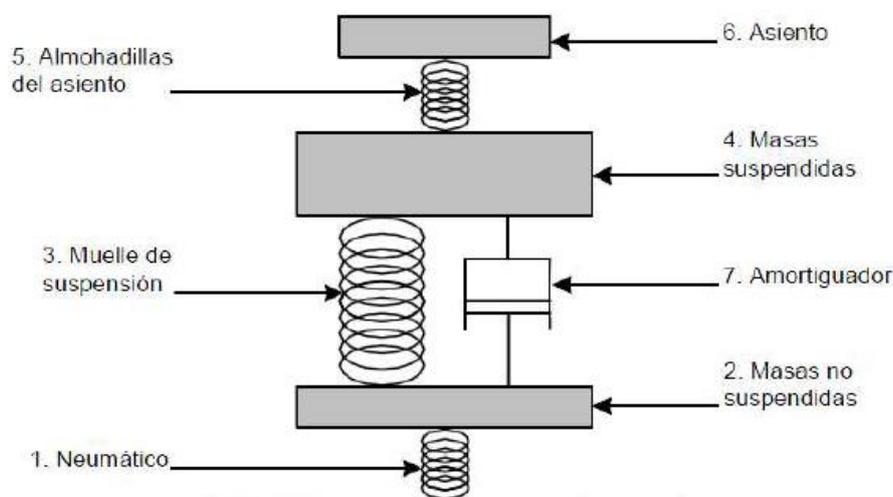
$W$  es el ancho de vía

### 1.7 Masas Suspendidas y no Suspendidas

Las masas suspendidas hacen referencia a los elementos que están sobre los sistemas de suspensión del vehículo, su función es de amortiguar las vibraciones y los desperfectos de la carretera, está constituida el bastidor, la carrocería, los pasajeros, los mandos de dirección, el motor, el diferencial entre otros. Las masas no suspendidas es lo contrario, es la que sigue los desperfectos, vibraciones de la calzada, los elementos que la constituyen son los que se encuentran debajo del sistema de suspensión como los sistemas de frenos, los neumáticos, las manguetas [27].

#### Figura 9.

*Esquema de la composición de la suspensión*



Obtenida de [27].

En la figura 9 pueden observar que en los neumáticos está interpuesto entre el suelo y las masas no suspendidas, los muelles y amortiguadores se encuentran interpuestos entre las masas no

suspendidas y las suspendidas, es un claro ejemplo de cómo los sistemas de suspensión amortiguan los desperfectos de la calzada, finalmente el almohadillado y el asiento son los encargados de proporcionarle al piloto mayor confort y comodidad durante la conducción [27].

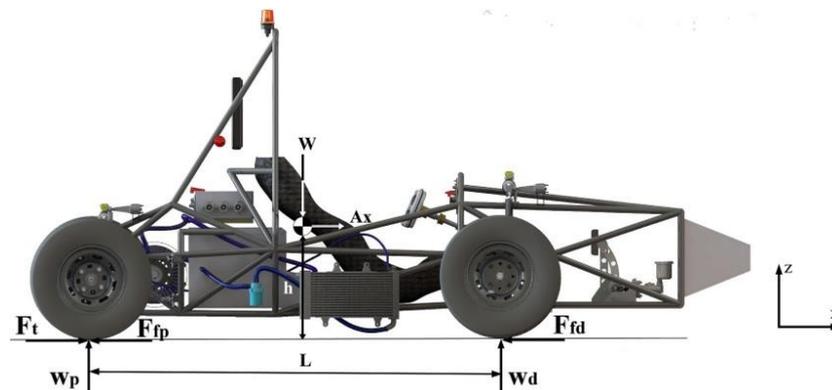
## 1.8 Parámetros de Cinemática y Dinámica

### 1.8.1 Centro de Gravedad

Se observa en la figura 10 un punto en el que se reúnen todas las fuerzas que se ejercen sobre el vehículo y se define como un punto de equilibrio, es de suma importancia considerar este parámetro para el diseño de cualquier vehículo ya que brinda estabilidad y mayor maniobrabilidad en la dirección de igual manera un mejor comportamiento en la tracción y frenada. La relación entre el centro de gravedad es inversamente proporcional a la transferencia de peso si la relación es más bajo la transferencia de masas será menor, se recomienda que el centro de gravedad sea lo más bajo posible, cabe mencionar que es importante recordar que se debe encontrar lo más cerca posible del centro de balanceo [19].

#### Figura 10.

*Centro de gravedad de un Formula SAE*



Obtenida de [28].

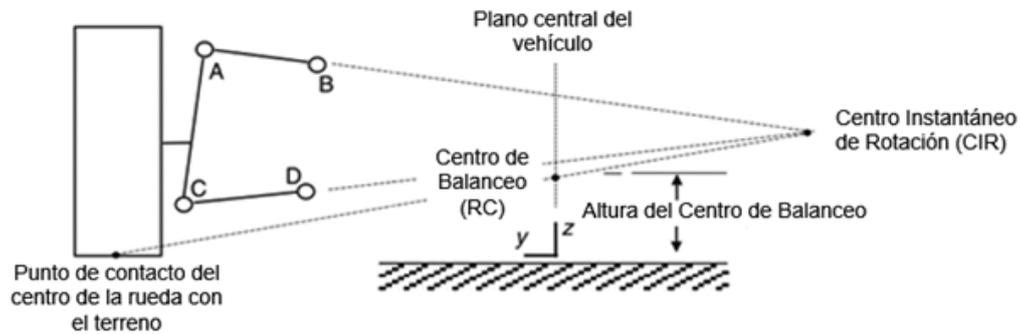
### 1.8.2 Centro Instantáneo de Rotación (CRI)

Se observa en la figura 11 un punto imaginario sobre el cual los neumáticos van a girar con respecto al chasis mientras la suspensión está trabajando, si este se encuentra más alejado con respecto a la vertical del neumático, la variación del ángulo camber de los neumáticos será

menor al moverse verticalmente. El centro instantáneo de rotación va a variar en distintas posiciones ya que va a depender del movimiento de la suspensión [29].

**Figura 11.**

*Centro Instantáneo de Rotación*



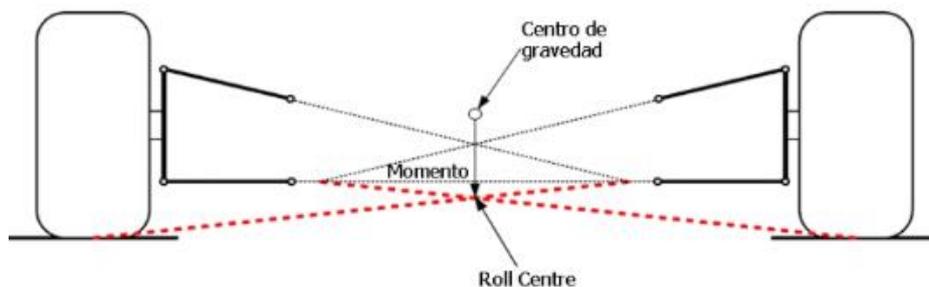
Obtenida de [29].

### 1.8.3 Centro de Balanceo (Roll Center)

El centro de balanceo es un punto donde interactúan las fuerzas laterales que transmiten los neumáticos al resistir las fuerzas centrífugas. Esto va a depender de la geometría y diseño de la suspensión seleccionada, es importante su distancia al centro de gravedad, para que la inclinación producidas por las fuerzas sean de mayor o menor magnitud. Se observa en la figura 12 el centro de balanceo y centro de gravedad, la línea que une ambos se denomina eje de balanceo y esta es donde el par que provoca que el vehículo se balancee [30].

**Figura 12.**

*Centro de balanceo*



Obtenida de [31].

## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Materiales

##### 2.1.1 Vehículo de Estudio

Para realizar el siguiente estudio se utilizará un vehículo Formula Student se observa en la figura 13, disponible en la universidad que servirá para la realización de las pruebas y comprobar que el diseño de los sistemas auxiliares está construido de forma idónea.

**Figura 13.**  
*Formula Student*



Obtenida de [32].

Es necesario tener en cuenta las dimensiones del vehículo a utilizar, se las muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.**  
*Dimensiones del Fórmula Student*

<b>Especificación</b>	<b>Dimensión</b>
Ancho de vía delantero	1300 mm
Ancho de vía posterior	1450 mm
Distancia entre ejes	1530 mm
Centro de gravedad desde el eje neutro	60 mm
Masa total con conductor de 60 kg	250,6 kg
Distribución de masas del eje delantero	46,08%
Distribución de masas del eje trasero	53,92%
Altura del centro de gravedad	260 mm

Obtenida de [32].

### 2.1.2 Frenómetro Maha 2120

Su principal función es realizar una verificación completa del funcionamiento del sistema de frenado, la información que se llega a obtener es; medición de la fuerza de frenada, la eficacia de los frenos y otras características relacionadas con el sistema de frenos del vehículo [33].

**2.1.2.1 Equipamiento Estándar.-** El equipo cuenta con lo siguiente:

- Estructura base
- Consola de control
- Motorreductor
- Rodillos
- Control electrónico y software.

**Figura 14.**

*Frenómetro Maha MBT-2120*



Obtenida de [34].

El equipo que se va a utilizar lo dispone la universidad el cual se observa en la figura 14, cabe recalcar que es importante mencionar que la calibración de estos equipos es un proceso para asegurar que su funcionamiento sea confiable y los datos sean exactos.

### 2.1.3 Soldadora Elite MP 130

En la figura 15 se puede observar la soldadora Elite, esta es una máquina que tiene como función principal la fijación de materiales. Esta fijación se realiza gracias a que los materiales se funden y con un material de aporte que se coloca entre los objetos que se necesita soldar. Actualmente

existen diversos tipos de máquinas soldadoras, pero para la realización de este trabajo se utilizó la máquina [35].

**Figura 15.**  
*Soldadora Elite MP 130*



Obtenida de [36].

Este tipo de soldadora cuenta con dos multiprocesos como MMA que es la soldadura manual por arco eléctrico que utiliza un electrodo revestido y MIG que es la soldadura por arco eléctrico que utiliza alambre autoprotegido, el uso de gas va a depender del tipo de alambre que se utiliza debido a que existe electrodos que no necesitan gas para protección de la soldadura. En la tabla 2 se muestra las especificaciones de la soldadora que se utilizará para realizar diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 2.**  
*Especificaciones de la Soldadora Elite MP130*

<b>Voltaje de entrada</b>	110V- 1 fase
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz
<b>Voltaje en vacío</b>	75V
<b>Rango de corriente</b>	10 – 130 Amperios
<b>Ciclo de trabajo a 40°</b>	45%
<b>Fusible mínimo recomendado</b>	30A
<b>Corriente de salida</b>	DC
<b>Peso</b>	6.2 Kg
<b>Dimensiones</b>	26 cm alto, 14 cm ancho, 46 cm largo
<b>Uso</b>	Profesional

Obtenida de [36].

### 2.1.4 *Kit de cinturón de seguridad*

El cinturón de seguridad forma parte de los elementos más importantes de la seguridad pasiva en los vehículos en la figura 16 se muestra un cinturón de cuatro puntos que será instalado en el Fórmula Student, tiene como función principal mantener al piloto en su sitio en todo momento, evitando que se desplace o en casos extremos salga del vehículo; además, el amortiguamiento al momento que se producen desaceleraciones bruscas [37].

**Figura 16.**  
*Cinturón de seguridad*



Obtenida de [38].

### 2.1.5 *Kit de volante desmontable*

El volante desmontable en un prototipo de carreras tiene varias funciones y ventajas, entre ellas están el facilitar el acceso al habitáculo, aumentar la seguridad del piloto en caso de accidentes, mayor amplitud para la personalización, entre otros este se muestra en la figura 17.

**Figura 17.**  
*Acople para volante desmontable*



Obtenida de [39].

### 2.1.6 Bomba de Frenos y Cañerías

También conocida como cilindro maestro esta se muestra en la figura 18, es encargada de reducir la velocidad gradual o repentina del vehículo convirtiendo una fuerza mecánica en presión hidráulica, presurizando un líquido o mantener la presión por todo el circuito hidráulico [40].

**Figura 18.**  
*Bomba de Frenos*

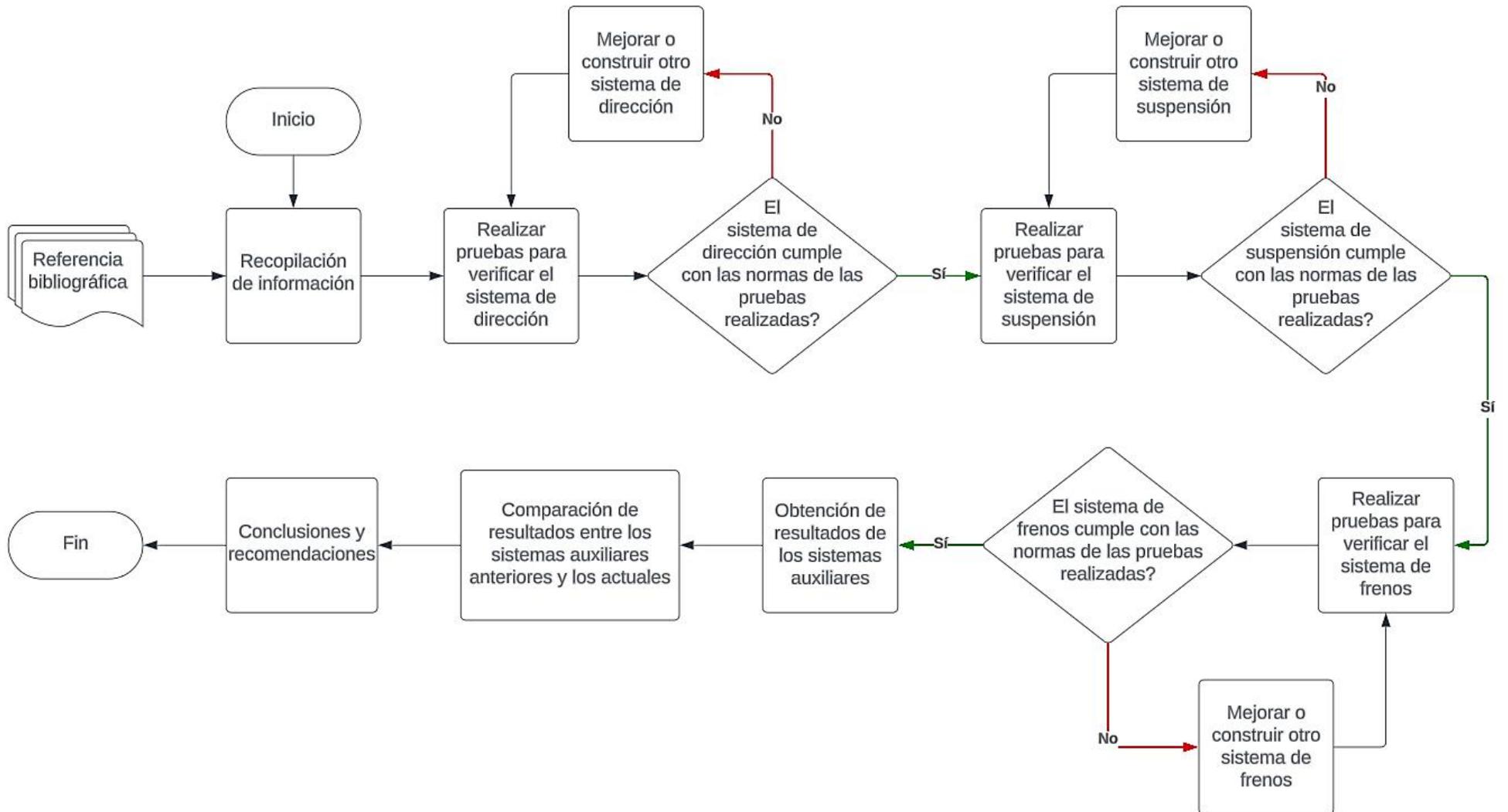


Obtenida de [40].

## 2.2 Metodología

En la siguiente sección se muestra el método, proceso y practica que se llevara a cabo para cumplir los objetivos planteados anteriormente, de esta manera en la figura 20 se observa un diagrama de flujos los pasos a seguir para concluir con el trabajo.

**Figura 19.**  
*Diagrama de Flujo*



### **2.2.1 Pruebas para Verificar el Sistema de Dirección**

Para verificar que el sistema de dirección que fue diseñado para este vehículo trabaje en óptimas condiciones, se realizara pruebas dinámicas donde se evaluaran algunos aspectos del rendimiento y maniobrabilidad del Fórmula Student las cuales son:

**2.2.1.1 Prueba de Manejo en Línea Recta.-** La prueba consiste en que el piloto debe de movilizarse en el Fórmula Student en línea recta sin hacer correcciones en el volante, con esto analizaremos cuanto tiende a desviarse el vehículo del circuito para verificar si existe una correcta alineación en los sistemas de dirección del vehículo.

Para realizar esta prueba se necesita una recta de no más de 30 metros, para este caso se estableció una distancia de 15 metros, se trazó dos líneas de referencia de un ancho de dos metros, para poder tomar datos de la desviación se colocó una línea recta en el centro del carril, el vehículo se colocó dentro de estas líneas y se marcó una línea de referencia en la mitad de los ejes, con esto podemos analizar la desviación tanto para derecha como izquierda en términos de distancia, una vez obtenida la distancia de desviación se procedió a calcular el ángulo de desviación en cada una de las pruebas realizadas, con la ayuda de la ecuación 2 y las fórmulas de trigonometría:

**Ecuación 2.**

*Ángulo de desviación*

$$\text{Ángulo de Desviación} = \tan^{-1} \frac{(\text{Distancia de Desviación})}{(\text{Distancia total recorrida})}$$

Se realizó un total de diez pruebas que serán detalladas a continuación junto a sus resultados en la tabla 3.

**Tabla 3.**  
*Resultados – Dirección en línea recta*

<b>Prueba N°</b>	<b>Distancia de Desviación</b>	<b>Ángulo de Desviación</b>
1	3,71 m	13,89 °
2	3,58 m	13,42 °
3	3,21 m	12,07 °
4	2,44 m	9,23 °
5	3,13 m	11,78 °
6	4,08 m	15,21 °
7	2,43 m	9,20 °
8	2,19 m	8,30 °
9	2,56 m	9,68 °
10	2,97 m	11,20 °
<b>MEDIA</b>	<b>3,03 m</b>	<b>11,39 °</b>

A continuación, en la tabla 4 se detallan los datos obtenidos al implementar el sistema reductor de giro del volante, cabe recalcar que se buscó que los ángulos de desviación no sean elevados al valor medio de la prueba que fue realizada anteriormente.

**Tabla 4.**  
*Resultados – Dirección en línea recta con sistema reductor de giro*

<b>Prueba N°</b>	<b>Distancia de Desviación</b>	<b>Ángulo de Desviación</b>
1	2,95 m	11,12 °
2	2,50 m	9,46 °
3	2,75 m	10,38 °
4	2,40 m	9,09 °
5	2,65 m	10,02 °
6	3,05 m	11,49 °
7	2,83 m	10,68 °
8	2,33 m	8,83 °
9	2,90 m	10,94 °
10	2,47 m	9,35 °
<b>MEDIA</b>	<b>2,68 m</b>	<b>10,13 °</b>

**2.2.1.2 Prueba de Radio de Giro.-** es necesario contar con una área donde se pueda realizar la siguiente prueba, una área plana y segura, de igual manera hay que verificar si el vehículo se encuentra en buenas condiciones y sus neumáticos cuenten con la presión de aire adecuada.

Se debe trazar con la ayuda de conos un carril con un radio, el vehículo va a recorrer una curva de 180 grados, en el cual se analizará si el vehículo puede completar el circuito con diferentes longitudes con respecto al radio de giro, con esto se obtendrá cual es el radio mínimo de giro del vehículo los datos se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.**  
*Resultados-Radio de giro*

No. Prueba	Distancia de Radio	Aprobación
1	4.00 m	No cumplió
2	6.00m	Cumplió
3	5.00 m	Cumplió
4	4.40 m	Cumplió

A continuación, en la tabla 6 se detallan los datos obtenidos al realizar la prueba de radio de giro al tener implementado el sistema reductor de giro, vamos a comparar si existe una mejora al poder maniobrar el vehículo más rápido.

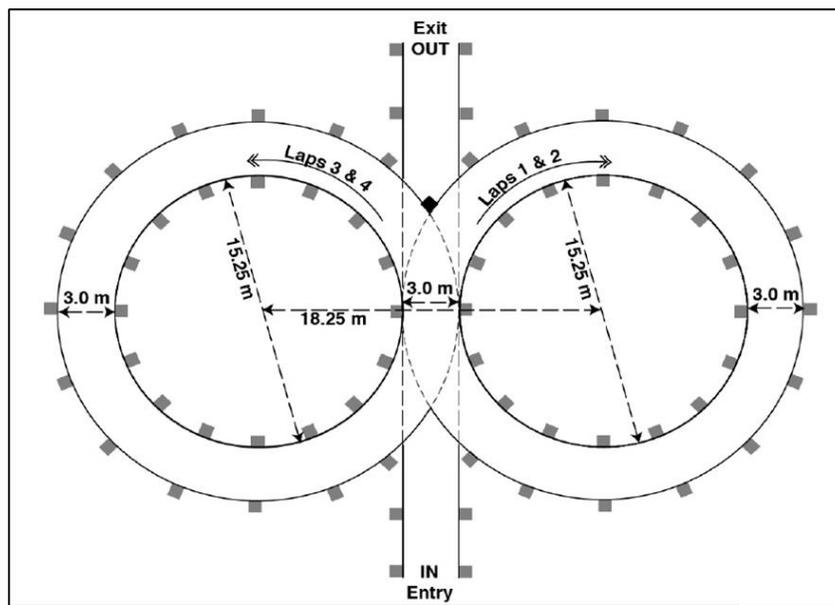
**Tabla 6.**  
*Resultados - Radio de giro con el sistema reductor de giro*

No. Prueba	Distancia de Radio	Aprobación
1	4.00 m	No cumplió
2	6.00m	Cumplió
3	5.00 m	Cumplió
4	4.40 m	Cumplió

## 2.2.2 Pruebas para Verificar el Sistema de Suspensión

**2.2.2.1 SkidPad.-** En esta prueba se busca un límite de adherencia del vehículo en una curva de radio constante sobre una superficie asfaltada y lisa. El objetivo es evaluar las prestaciones de paso por curva del Fórmula Student, para ello se diseña un circuito en forma de ocho con las siguientes dimensiones que se observa en la figura 20.

**Figura 20.**  
*Circuito de Skidpad*



Obtenida de [41].

En la siguiente prueba los vehículos entran al circuito por la parte central y se dirigen a la derecha, cuando el vehículo da una vuelta completa, empieza a correr el tiempo y se realiza dos vueltas en el círculo derecho y dos vueltas en el círculo izquierdo. El diseño de la suspensión y la dirección serán junto con la puesta a punto de amortiguadores y neumáticos claves para obtener mayor adherencia y dar un buen resultado. En esta prueba se evaluará el tiempo en el que tarde en realizar todo el circuito, cabe mencionar que al tener una correcta configuración de la dirección y suspensión brindará que el vehículo tenga fácil

maniobrabilidad y un buen desempeño. En este circuito se podrá analizar el *balanceo lateral*, en cómo responde el vehículo al entrar a una curva a diferentes velocidades, por lo cual debería existir un nivel razonable de inclinación lateral sin perder el control del vehículo y debería ser estable los datos obtenidos se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.**  
*Resultados – Skidpad*

<b>Prueba N°</b>	<b>Tiempo</b>
1	37,00 s
2	39,32 s
3	37,37 s
4	36,64 s
5	35,96 s
6	36,17 s
7	35,89 s
8	37,19 s
9	36,38 s
10	36,11 s
<b>MEDIA</b>	<b>36,80 s</b>

A continuación, se detallan en la tabla 8 los datos obtenidos al realizar la prueba de SkidPad con los nuevos amortiguadores regulables y el sistema reductor de giro, en el caso de los amortiguadores se realizará pruebas con amortiguadores en estado normal y en este caso el amortiguador estará lo más suave posible y otra prueba con amortiguadores rígidos que se muestran en la tabla 9.

**Tabla 8.***Resultados – Skidpad con amortiguadores en estado normal*

<b>Prueba N°</b>	<b>Tiempo</b>
1	33,24 s
2	34,40 s
3	35,26 s
4	34,84 s
5	32,24 s
6	34,27 s
7	34,45 s
8	35,62 s
9	33,88 s
10	35,55 s
<b>MEDIA</b>	<b>34,37 s</b>

Para configurar el amortiguador se ha realizado diez giros para modificar la rigidez del resorte y analizar si existe mejoras en el tiempo, estos datos se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9.***Resultados – Skidpad con amortiguadores en estado rígidos*

<b>Prueba N°</b>	<b>Tiempo</b>
1	34,14 s
2	33,52 s
3	34,86 s
4	33,32 s
5	33,14 s
6	33,96 s
7	32,35 s
8	34,03 s
9	33,24 s
10	33,95 s
<b>MEDIA</b>	<b>33,65 s</b>

**2.2.2.2 Prueba de Rebote Prolongado.-** En esta prueba se analizará que después de aplicar una fuerza o un peso que comprimirá al amortiguador, este deberá regresar a su posición normal, un rebote prolongado puede ser indicativo de amortiguadores desgastados o dañados de igual manera la suspensión no debe ser ni muy rígida ni muy suave. Es crucial que en las reglas para el diseño de un sistema de suspensión cuente con un recorrido de rueda mínimo de 50 milímetros. En esta prueba se procede aplicar una fuerza o un peso en las cuatro partes del vehículo donde se encuentren los amortiguadores y analizar si están en buen estado y en óptimas condiciones para la carrera.

**Tabla 10.**  
*Resultados-Rebote prolongado*

<b>Amortiguador</b>	<b>Aprobación</b>
Delantero Izquierdo	No cumple
Delantero Derecho	No cumple
Posterior Izquierdo	No cumple
Posterior Derecho	No cumple

A continuación, se detallan en la tabla 11 los datos obtenidos al realizar las pruebas de los amortiguadores implementados en el Fórmula Student, esta prueba se realizará con los amortiguadores en estado normal y en estado rígidos.

**Tabla 11.**  
*Resultados-Rebote prolongado con amortiguadores en estado normal*

<b>Amortiguador</b>	<b>Aprobación</b>
Delantero Izquierdo	Cumple
Delantero Derecho	Cumple
Posterior Izquierdo	Cumple
Posterior Derecho	Cumple

Al modificar la rigidez del amortiguador con diez giros en los pernos de ajuste podemos obtener una suspensión más rígida, con esto podemos obtener datos que se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12.**

*Resultados-Rebote prolongado con amortiguadores en estado rígido*

<b>Amortiguador</b>	<b>Aprobación</b>
Delantero Izquierdo	Cumple
Delantero Derecho	Cumple
Posterior Izquierdo	Cumple
Posterior Derecho	Cumple

### **2.2.3 Pruebas para Verificar el Sistema de Frenos**

**2.2.3.1 Prueba de Capacidad de Bloqueo de las Cuatro Ruedas.-** El sistema de frenos se pondrá a prueba de forma dinámica y es obligatorio que demuestre la capacidad de bloquear las cuatro ruedas al detener el vehículo en línea recta al final de una carrera de aceleración especificada por los inspectores de frenos [2].

Realización de la prueba:

- a. Acelerar a velocidad hasta llegar a la zona designada.
- b. Apague el sistema de tracción.
- c. Aplique los frenos con fuerza suficiente para demostrar el bloqueo total de las cuatro ruedas.

La prueba de frenos pasa si las cuatro ruedas se bloquean mientras el sistema de tracción está apagado [2].

Se realizó la prueba siguiendo a detalle los pasos descritos con anterioridad, y en los intentos que se realizó el vehículo no demostró el bloqueo total de las 4 ruedas se observa en la figura 21.

**Figura 21.***Prueba - Bloqueo cuatro ruedas*

Para obtener resultados más precisos se utilizó un frenómetro con el cual realizamos cuatro pruebas, en las cuales obtuvimos la fuerza de frenado por cada una de las llantas, se realizó dos tipos de frenado: progresivo y brusco. A continuación, se detallarán cada una de las pruebas realizadas:

- **Prueba de Frenado Progresivo en las Llantas Delanteras.**

Se realiza un frenado progresivo, que se basa en aplicar fuerza de forma progresiva en el pedal del freno hasta llegar a su tope.

**Tabla 13.***Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas delanteras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,45 kN	0,50 kN
2	0,45 kN	0,45 kN
3	0,40 kN	0,42 kN
4	0,35 kN	0,40 kN
5	0,40 kN	0,42 kN
6	0,39 kN	0,42 kN
7	0,40 kN	0,44 kN
8	0,35 kN	0,35 kN
9	0,35 kN	0,40 kN
10	0,35 kN	0,39 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,389 kN</b>	<b>0,419 kN</b>

• **Prueba de Frenado Brusco en las Llantas Delanteras.**

Se realiza un frenado brusco, que se basa en aplicar una fuerza máxima sobre el pedal del freno.

**Tabla 14.**

*Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas delanteras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,25 kN	0,25 kN
2	0,30 kN	0,30 kN
3	0,30 kN	0,30 kN
4	0,30 kN	0,31 kN
5	0,25 kN	0,25 kN
6	0,30 kN	0,31 kN
7	0,40 kN	0,44 kN
8	0,30 kN	0,30 kN
9	0,50 kN	0,50 kN
10	0,45 kN	0,50 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,335 kN</b>	<b>0,346 kN</b>

• **Prueba de Frenado Progresivo en las Llantas Traseras.**

Se realiza un frenado progresivo, que se basa en aplicar fuerza de forma progresiva en el pedal del freno hasta llegar a su tope.

**Tabla 15.**

*Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas traseras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,40 kN	0,55 kN
2	0,50 kN	0,60 kN
3	0,50 kN	0,60 kN
4	0,50 kN	0,60 kN
5	0,45 kN	0,55 kN
6	0,45 kN	0,55 kN
7	0,40 kN	0,50 kN
8	0,35 kN	0,50 kN
9	0,40 kN	0,50 kN
10	0,50 kN	0,60 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,445 kN</b>	<b>0,555 kN</b>

• **Prueba de Frenado Brusco en las Llantas Traseras.**

Se realiza un frenado brusco, que se basa en aplicar una fuerza máxima sobre el pedal del freno.

**Tabla 16.**

*Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas traseras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,52 kN	0,62 kN
2	0,45 kN	0,60 kN
3	0,52 kN	0,62 kN
4	0,55 kN	0,65 kN
5	0,55 kN	0,65 kN
6	0,50 kN	0,65 kN
7	0,55 kN	0,65 kN
8	0,49 kN	0,59 kN
9	0,50 kN	0,65 kN
10	0,50 kN	0,65 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,513 kN</b>	<b>0,633 kN</b>

A continuación, se detallan los valores obtenidos en las mismas pruebas con los nuevos sistemas auxiliares instalados.

• **Prueba de Frenado Progresivo en las Llantas Delanteras.**

Se realiza un frenado progresivo, que se basa en aplicar fuerza de forma progresiva en el pedal del freno hasta llegar a su tope.

**Tabla 17.***Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas delanteras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,55 kN	0,55 kN
2	0,45 kN	0,45 kN
3	0,40 kN	0,42 kN
4	0,42 kN	0,45 kN
5	0,50 kN	0,50 kN
6	0,40 kN	0,42 kN
7	0,45 kN	0,45 kN
8	0,50 kN	0,50 kN
9	0,45 kN	0,45 kN
10	0,50 kN	0,50 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,462 kN</b>	<b>0,469 kN</b>

• **Prueba de Frenado Brusco en las Llantas Delanteras.**

Se realiza un frenado brusco, que se basa en aplicar una fuerza máxima sobre el pedal del freno.

**Tabla 18.***Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas delanteras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,40 kN	0,40 kN
2	0,35 kN	0,35 kN
3	0,40 kN	0,40 kN
4	0,45 kN	0,47 kN
5	0,40 kN	0,42 kN
6	0,35 kN	0,35 kN
7	0,40 kN	0,40 kN
8	0,35 kN	0,35 kN
9	0,45 kN	0,45 kN
10	0,40 kN	0,42 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,395 kN</b>	<b>0,401 kN</b>

• **Prueba de Frenado Progresivo en las Llantas Traseras.**

Se realiza un frenado progresivo, que se basa en aplicar fuerza de forma progresiva en el pedal del freno hasta llegar a su tope.

**Tabla 19.***Resultados - Prueba de frenado progresivo en las llantas traseras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,60 kN	0,60 kN
2	0,65 kN	0,65 kN
3	0,60 kN	0,60 kN
4	0,60 kN	0,65 kN
5	0,55 kN	0,55 kN
6	0,55 kN	0,55 kN
7	0,50 kN	0,50 kN
8	0,50 kN	0,50 kN
9	0,60 kN	0,65 kN
10	0,60 kN	0,60 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,575 kN</b>	<b>0,585 kN</b>

• **Prueba de Frenado Brusco en las Llantas Traseras.**

Se realiza un frenado brusco, que se basa en aplicar una fuerza máxima sobre el pedal del freno.

**Tabla 20.***Resultados - Prueba de frenado brusco en las llantas traseras*

<b>Prueba N°</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Izquierda</b>	<b>Fuerza máxima - Llanta Derecha</b>
1	0,50 kN	0,50kN
2	0,55 kN	0,60 kN
3	0,50 kN	0,52 kN
4	0,45 kN	0,45 kN
5	0,55 kN	0,55 kN
6	0,50 kN	0,50 kN
7	0,55 kN	0,55 kN
8	0,55 kN	0,55 kN
9	0,50 kN	0,50 kN
10	0,50 kN	0,50 kN
<b>MEDIA</b>	<b>0,515 kN</b>	<b>0,522 kN</b>

**2.2.3.2 Distancia de Frenado.**- La distancia de frenado es la que recorre el vehículo desde el momento en que se acciona el freno hasta que el vehículo se detiene por completo [42].

Para realizar el cálculo propuesto se tiene que disponer de los siguientes datos:

**a. Velocidad del Vehículo**

Se obtuvo las velocidades del vehículo gracias al velocímetro que tiene instalado en la parte superior del volante, es importante mencionar que la velocidad que muestra se encuentra en  $\frac{km}{h}$ , para realizar los cálculos es fundamental transformar a  $\frac{m}{s}$ .

**b. Coeficiente de Adherencia de los Neumáticos**

Para obtener el coeficiente de adherencia de los neumáticos más cercano a nuestra realidad realizamos un análisis de los valores tomados en tesis anteriores, además revisamos otros documentos que nos ayudaron a definir un  $U_r = 0,35$  [43].

**c. Gravedad**

Es el resultante de la atracción gravitatoria entre la Tierra y otros cuerpos celestiales, y de la aceleración centrífuga, debida al movimiento de rotación terrestre y su valor global medio es de  $(9,807 \frac{m}{s^2})$  [44].

**d. Inclinación de la Calzada**

Para este caso se eliminó la inclinación de la calzada, dado que la prueba se realizó en una calzada plana.

Con todos estos datos, se resolvió la siguiente fórmula:

**Ecuación 3.**

*Distancia de frenado*

$$D_f = \frac{v^2}{2 \times g \times U_r}$$

Obtenida de [42].

Donde:

$D_f$  es la distancia de frenado

$V^2$  es la velocidad al cuadrado

$g$  es la gravedad

$U_r$  Coeficiente de adherencia de los neumáticos

Con la resolución de esta fórmula se obtuvo valores teóricos de la distancia de frenado, se realizaron diez pruebas con el fin de realizar una media y analizar los resultados; en la tabla 21 se muestran los valores y resultados tanto reales como teóricos.

**Tabla 21.**

*Resultados Distancia de Frenado*

<b>Prueba N°</b>	<b>Velocidad máxima</b>	<b><math>D_f</math> teórica</b>	<b><math>D_f</math> real</b>
1	28 km/h - 7,77 m/s	10,26 m	11,61 m
2	28 km/h - 7,77 m/s	10,26 m	10,75 m
3	27 km/h - 7,50 m/s	9,56 m	10,69 m
4	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	10,30 m
5	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	10,35 m
6	26 km/h - 7,22 m/s	8,86 m	11,22 m
7	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	10,81 m
8	26 km/h - 7,22 m/s	8,86 m	10,78 m
9	26 km/h - 7,22 m/s	8,86 m	10,87 m
10	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	9,81 m
<b>MEDIA</b>	<b>26 km/h - 7,22 m/s</b>	<b>8,86 m</b>	<b>10,71 m</b>

A continuación, se detallarán los valores obtenidos en la misma prueba con los nuevos sistemas auxiliares instalados. Es importante mencionar que con los nuevos sistemas instalados se pudo realizar dos pruebas, una con los amortiguadores en su estado normal y otra con los amortiguadores rígidos.

• **Prueba con amortiguadores en estado normal**

En la tabla 22 se muestran los valores y resultados tanto reales como teóricos.

**Tabla 22.**

*Resultados Distancia de Frenado Amortiguadores Estado Normal*

<b>Prueba N°</b>	<b>Velocidad máxima</b>	<b><math>D_f</math> teórica</b>	<b><math>D_f</math> real</b>
1	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	6,19 m
2	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	5,59 m
3	27 km/h - 7,50 m/s	9,56 m	6,27 m
4	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,14 m
5	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,75 m
6	26 km/h - 7,22 m/s	8,86 m	6,80 m
7	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,81 m
8	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,26 m
9	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	5,18 m
10	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,89 m
<b>MEDIA</b>	<b>25,1 km/h - 6,97 m/s</b>	<b>8,26 m</b>	<b>5,78 m</b>

• **Prueba con amortiguadores rígidos**

En la tabla 23 se muestran los valores y resultados tanto reales como teóricos.

**Tabla 23.**  
*Resultados Distancia de Frenado Amortiguadores Rígidos*

<b>Prueba N°</b>	<b>Velocidad máxima</b>	<b><math>D_f</math> teórica</b>	<b><math>D_f</math> real</b>
1	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	5,69 m
2	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	6,35 m
3	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	6,29 m
4	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	5,80 m
5	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	6,14 m
6	26 km/h - 7,22 m/s	8,86 m	6,51 m
7	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	5,81 m
8	25 km/h - 6,94 m/s	8,19 m	6,02 m
9	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	5,87 m
10	24 km/h - 6,66 m/s	7,53 m	6,01 m
<b>MEDIA</b>	<b>24,7 km/h - 6,86 m/s</b>	<b>7,99 m</b>	<b>6,05 m</b>

#### **2.2.4 Mejoramiento del Sistema de Dirección**

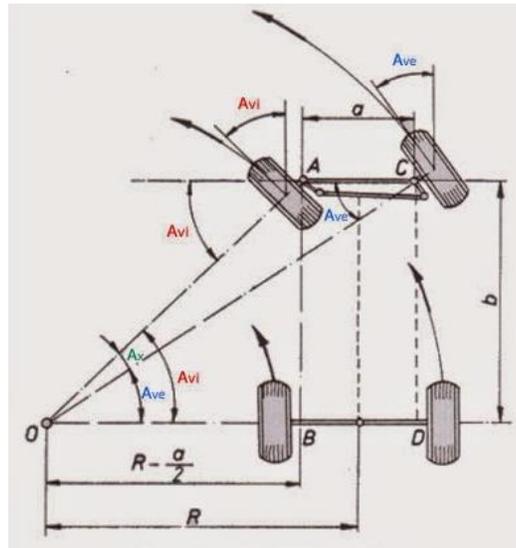
Con las pruebas realizadas se pudo verificar que el sistema de dirección requiere de modificaciones para mejorar la maniobrabilidad y para evitar que el conductor pierda el control total del vehículo, el sistema de dirección del Formula Student que cuenta la universidad realiza 3 giros en el volante de lado a lado, en este caso se mejorará la relación que existe entre el piñón y la cremallera para disminuir estos giros en el volante. Para mejorar el sistema de dirección del Formula Student, se implementará un sistema reductor de giro del volante, este sistema será instalado en la columna de dirección para reducir la desmultiplicación de la dirección, para ello es importante calcular los ángulos de giro y tener en cuenta el número de vueltas totales que da el volante de lado a lado.

**2.2.4.1 Cálculos de la Geometría de la Dirección del Formula Student.**- Para realizar los siguientes cálculos es necesario tomar las dimensiones del vehículo que se va a analizar, estos datos están adjuntos en la tabla 1.

Ancho de vía delantero (a)	1300 mm
Batalla (b)	1530 mm

**Figura 22.**

*Ángulo de viraje de las ruedas*



Obtenida de [45].

$A_{vi}$  = Ángulo de giro de la rueda interior

$A_{ve}$  = Ángulo de giro de la rueda exterior

Con la prueba de radio de giro del vehículo se determinó el radio mínimo de giro, en la tabla 5, se observa que el vehículo tiende a cumplir la prueba con un radio mínimo de 4.40 metros, por ende, este es un dato con el que se va a iniciar para analizar los ángulos de giro de las ruedas.

Para calcular los valores de los ángulos, podemos observar que se forma un triángulo rectángulo entre los valores de radio de giro y la batalla, con la ayuda de las fórmulas trigonométrica y geométricas se puede obtener estos valores, tanto el valor de ángulo de

giro de rueda interna y externa. Al saber que el vehículo cumple la prueba al girar una curva de radio de 4.40 metros con un ancho de carril de 2 metros, el vehículo tiene un ancho de vía delantero de 1.30 metros, al suponer que el vehículo tiende a pasar por el centro del carril se obtiene el radio de giro del vehículo:

**Ecuación 4.**

*Radio de giro del Vehículo*

$$R_{Giro} = R_{prueba} - \frac{Ancho_{Carril}}{2}$$

Datos:

$$R_{prueba} = 4400 \text{ mm}$$

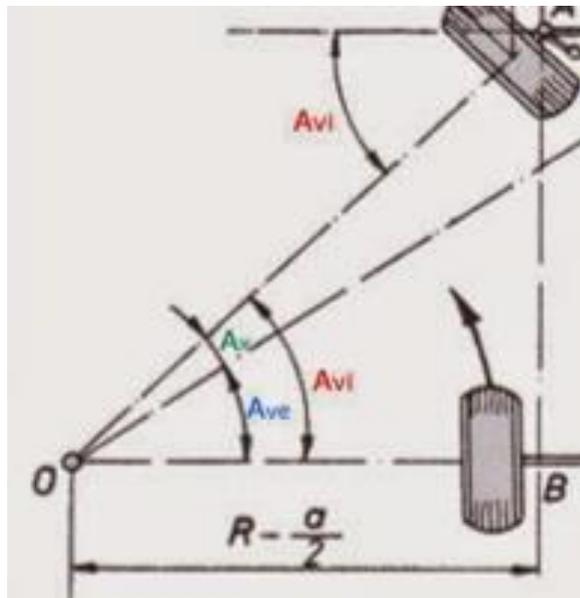
$$Ancho_{Carril} = 2000 \text{ mm}$$

$$R_{Giro} = 4400 \text{ mm} - \frac{2000 \text{ mm}}{2}$$

$$R_{Giro} = 3400 \text{ mm}$$

**Figura 23.**

*Diagrama para el ángulo de giro externo*



Obtenida de [45].

Para calcular el radio de viraje interno se resta la mitad del ancho de via delantero.

**Ecuación 5.**

*Radio de giro de la rueda interna*

$$R_{vi} = R_{giro} - \frac{a}{2}$$

$$R_{vi} = 3400 \text{ mm} - \frac{1300\text{mm}}{2}$$

$$R_{vi} = 2750 \text{ mm}$$

Para calcular el radio de viraje externo se suma la mitad del ancho de via delantero.

**Ecuación 6.**

*Radio de giro de la rueda externa*

$$R_{ve} = R_{Giro} + \frac{a}{2}$$

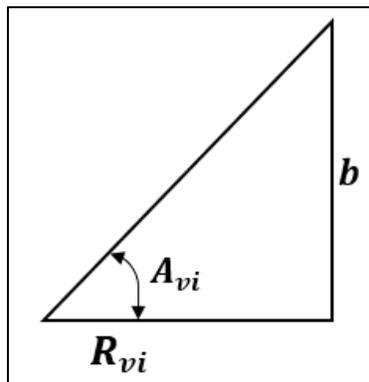
$$R_{ve} = 3400 \text{ mm} + \frac{1300\text{mm}}{2}$$

$$R_{ve} = 4050 \text{ mm}$$

Para calcular el ángulo de giro de la rueda interna se utiliza las funciones trigonométricas ya que el radio de giro y la batalla forman un triángulo rectángulo y se calcula de la siguiente manera.

**Figura 24.**

*Diagrama del ángulo de giro de las ruedas internas*



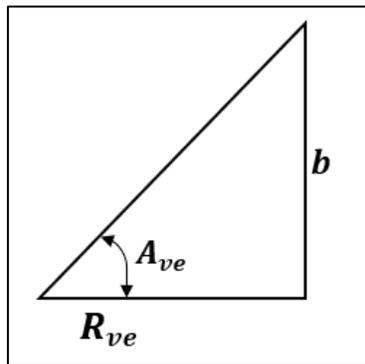
$$A_{vi} = \tan^{-1} \frac{b}{R_{vi}}$$

$$A_{vi} = \tan^{-1} \left( \frac{1530 \text{ mm}}{2750 \text{ mm}} \right)$$

$$A_{vi} = 29.09^\circ$$

**Figura 25.**

*Diagrama del ángulo de giro de las ruedas externas*



$$A_{ve} = \tan^{-1} \frac{b}{R_{ve}}$$

$$A_{ve} = \tan^{-1} \left( \frac{1530 \text{ mm}}{4050 \text{ mm}} \right)$$

$$A_{ve} = 20.69^\circ$$

**2.2.4.2 Desmultiplicación del sistema de dirección.-** Con los datos obtenidos podemos analizar la desmultiplicación del sistema de dirección, partiendo de que el volante gira 3 vueltas de lado a lado, y una vez calculado los ángulos de giro procedemos a obtener la desmultiplicación del sistema de dirección.

El ángulo de giro de las ruedas internas tiene un valor de  $29.09^\circ$  cuando se gira 1 vuelta y media en el volante con estos siguientes datos podemos obtener la desmultiplicación de la dirección.

**Ecuación 7.***Desmultiplicación de la dirección*

$$i = \frac{\text{Ángulo de giro del volante}}{\text{Ángulo de giro del neumático}}$$

Obtenida de [46].

$$i = \frac{1,5 * 360^\circ}{29,09^\circ}$$

$$i = 18,56:1$$

Esto quiere decir que por cada 18,56 grados que gire el volante, las ruedas giraran 1 grado, por ende, se buscará un sistema que logre bajar esta relación por la mitad lo que sería esencial diseñar un sistema con relación 1:2, que quiere decir que por cada giro en el eje de entrada que es el volante se realizaran dos giros en el eje de salida que va a conectar a la caja de dirección.

**2.2.4.3 Prototipo de un sistema de reducción de giro del volante.-** Se diseñará un prototipo de un sistema reductor utilizando un sistema de engranajes tipo planetario, para analizar los esfuerzos de los dientes tanto del eje de entrada y salida.

Cabe recalcar que necesitamos que el giro del volante reduzca a la mitad, comenzamos calculando el número de dientes que se requiere para cumplir la relación de 1:2, se parte que el piñón conducido cuente con un número de 20 dientes para que este sistema reductor no exceda en el peso y perjudique en el rendimiento del vehículo.

**Ecuación 8.***Relación de transmisión de los Engranajes*

$$i_E = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Obtenida de [47].

$$Z_1 = \#Dientes_{\text{engranaje salida}}$$

$$Z_2 = \#Dientes_{\text{engranaje entrada}}$$

$$2 = \frac{Z_2}{20 \text{ dientes}}$$

$$Z_2 = 40 \text{ dientes}$$

Para calcular el diámetro del eje conducido es importante seleccionar un módulo adecuado, para engranajes que trabajan a revoluciones bajas se recomienda seleccionar un módulo bajo y un número de dientes altos, debido a que los esfuerzos que se ejercerán a los dientes sean más distribuidos y generando una larga vida útil del engrane [48].

**Tabla 24.**

*Módulos y pasos de engranes estandarizados UNE3121*

Modulo m	paso	Modulo m	Paso	Modulo m	paso
0.5	1.571	2	6.284	6	18.850
0.55	1.727	2.25	7.069	6.5	20.420
0.6	1.885	2.5	7.854	7	21.991
0.7	2.199	2.75	8.639	8	25.133
0.8	2.513	3	9.425	9	28.274
0.9	2.827	3.25	10.210	10	31.416
1	3.142	3.5	10.996	11	34.557
1.125	3.534	3.75	11.781	12	37.699
1.25	3.927	4	12.556	14	43.982
1.375	4.320	4.5	14.137	16	50.265
1.5	4.712	5	15.708	18	56.549
1.75	5.498	5.5	17.279	20	62.832

Obtenida de [49].

En la tabla 24 se observa diferentes módulos y pasos, para realizar este diseño se seleccionará un módulo de valor de 0.8 mm y un paso 2.513 mm, como lo antes mencionado se requiere seleccionar un módulo bajo ya que este sistema trabajará a bajas revoluciones, con estos datos seleccionados podemos calcular el diámetro exterior, primitivo, interno y el paso circular. Para calcular lo antes mencionado se utilizan las siguientes ecuaciones:

Con la ecuación 9 podemos obtener el diámetro exterior que es importante debido a que con este valor tenemos una referencia para el momento de adquirir el material con el que se va a fabricar el engrane.

**Ecuación 9.**

*Diámetro Exterior*

$$D_e = m * (Z_1 + 2)$$

Obtenida de [47].

$$D_e = 0,8 \text{ mm} * (20 + 2)$$

$$D_e = 17,6 \text{ mm}$$

Con la ecuación 10 se calcula el diámetro primitivo que es crucial para el diseño de engranes, este diámetro es un círculo imaginario que se considera que los engranes engranan entre sí, sin provocar un deslizamiento garantizando que la transmisión de movimiento sea uniforme y lo más suave posible.

**Ecuación 10.**

*Diámetro Primitivo*

$$D_p = m * Z_1$$

Obtenida de [47].

$$D_p = 0,8 \text{ mm} * 20$$

$$D_p = 16 \text{ mm}$$

Con la ecuación 11 se calcula el paso circular que este se define como la distancia que existe entre los puntos en los dientes adyacentes, se mide el arco que se forma en el círculo primitivo.

**Ecuación 11.**

*Paso Circular*

$$P_c = \pi * M$$

Obtenida de [47].

$$P_c = \pi * 0,8 \text{ mm}$$

$$P_c = 2,51 \text{ mm}$$

Con la ecuación 12 calcular el diámetro interno, este es importante debido a podemos establecer las tolerancias adecuadas.

**Ecuación 12.**

*Diámetro Interno*

$$D_i = D_p - (2,5 * m)$$

Obtenida de [48].

$$D_i = 16 \text{ mm} - (2,5 * 0.8\text{mm})$$

$$D_i = 14 \text{ mm}$$

Una vez calculado los diámetro internos, externos, primitivos y paso circular, es importante calcular el grosor del diente en este caso se lo puede obtener con la ecuación 13.

**Ecuación 13.**

*Grosor del diente*

$$G_d = \frac{P_c}{2}$$

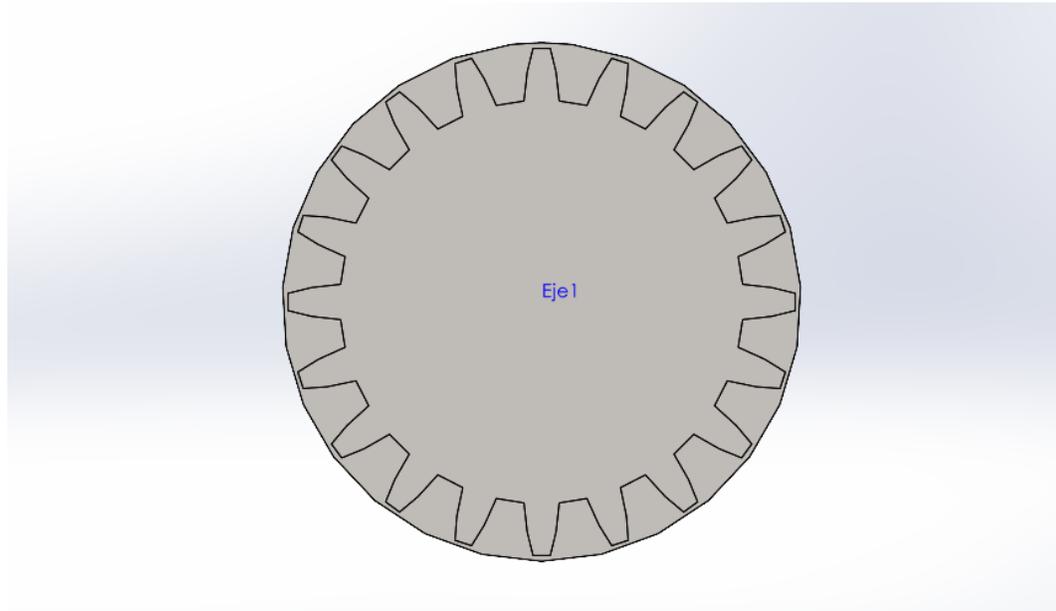
Obtenida de [47].

$$G_d = \frac{2,51 \text{ mm}}{2}$$

$$G_d = 1,225 \text{ mm}$$

En la figura 26 podemos observar el proceso final del diseño del piñón conducido con los datos obtenidos, como diámetro interior de 14 mm, diámetro exterior de 17,6 mm, un grosor del diente de 1,225 mm y un paso circular de 2,51 mm y como resultado un diámetro primitivo de 16 mm del cual engranan los dientes.

**Figura 26.**  
*Diseño Piñón conducido*



Para diseñar el piñón conductor en este caso se realizará un engranaje de interiores, es importante calcular las dimensiones con el número de dientes calculados, empezamos a obtener datos como el diámetro exterior, primitivo, interno y el paso circular. Con la ecuación 9 podemos calcular el diámetro exterior.

$$D_e = 0,8 \text{ mm} * (40 + 2)$$

$$D_e = 33,6 \text{ mm}$$

Con la ecuación 10, se calcula el diámetro primitivo.

$$D_p = 0,8 \text{ mm} * 40$$

$$D_p = 32 \text{ mm}$$

Con la ecuación 11, se calcula el paso circular.

$$P_c = \pi * 0,8 \text{ mm}$$

$$P_c = 2,51 \text{ mm}$$

Con la ecuación 12, se calcula el diámetro interno.

$$D_i = 32 \text{ mm} - (2,5 * 0.8\text{mm})$$

$$D_i = 30 \text{ mm}$$

Para calcular el grosor del diente del engranaje conductor se utiliza la ecuación 13.

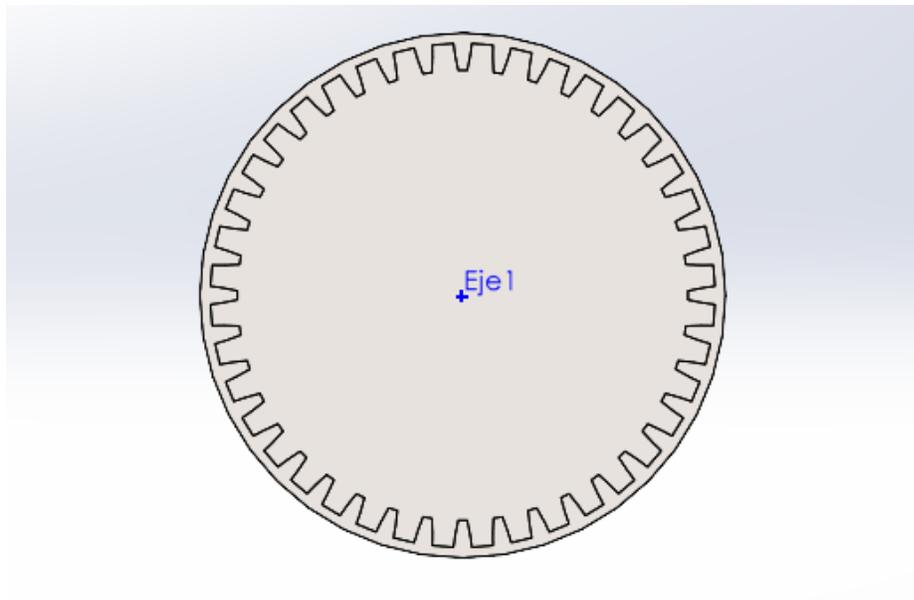
$$G_d = \frac{2,51 \text{ mm}}{2}$$

$$G_d = 1,225 \text{ mm}$$

En la figura 27 se observa el resultado final del diseño del piñón conductor, tomando en cuenta los datos que se obtuvo.

**Figura 27.**

*Diseño del Piñón Conductor*

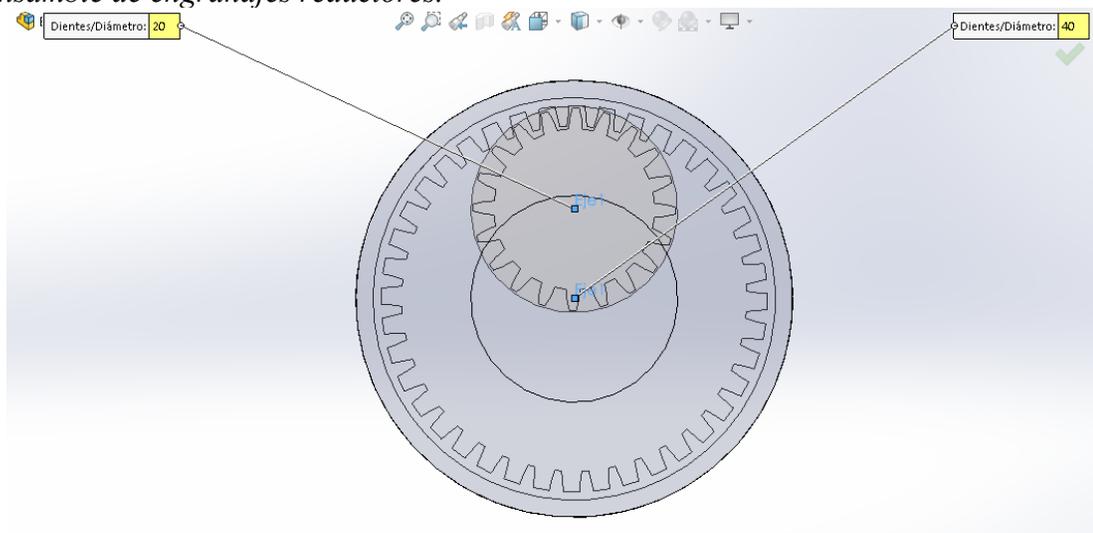


Para finalizar el diseño, en la figura 28 se muestra el resultado del ensamble de ambas piezas se utilizó una relación de posición de engranajes de 20 dientes en el engranaje de salida y 40 dientes en el engranaje de entrada, por lo que genera una relación de una vuelta en el eje de entrada y dos vueltas en el eje de salida, como resultado se obtiene un relación de

transmisión de 1:2 que es lo que se quería anteriormente para mejorar el giro del volante en el sistema de dirección del Fórmula SAE.

**Figura 28.**

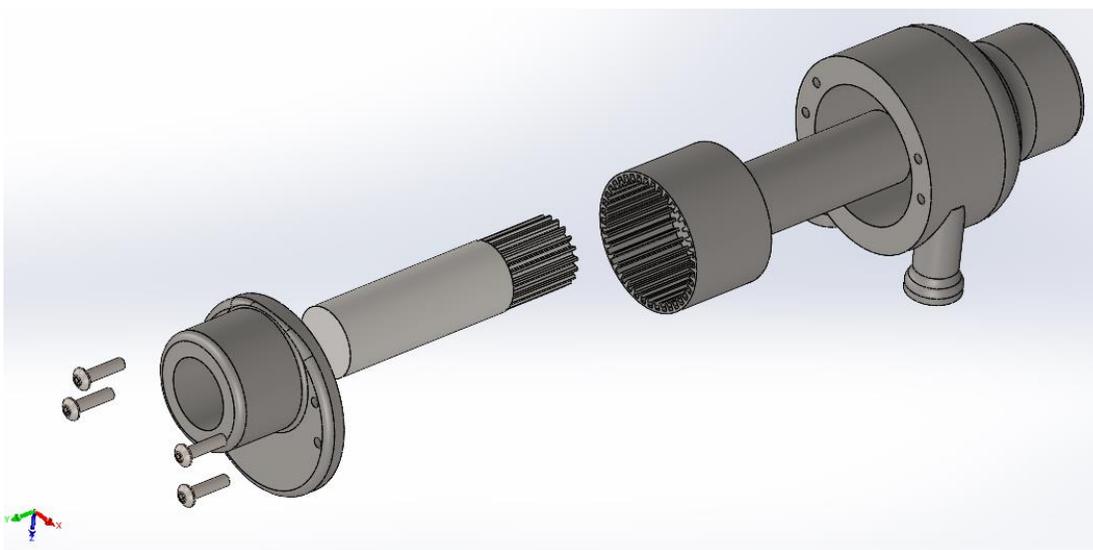
*Ensamble de engranajes reductores.*



En la figura 29 se observa la vista explosionada del prototipo reductor del giro del volante con todas sus partes en ellas consta la carcasa, los engranajes de entrada y salida y los pernos de sujeción de todo el componente reductor.

**Figura 29.**

*Vista explosionada del ensamble del prototipo reductor de giro.*



**2.2.4.4 Estudio Estático de los Engranajes.-** Para iniciar con el estudio estático del prototipo de reductor del giro del volante es importante seleccionar el tipo de material para los engranes y realizar el análisis, en este caso se utilizará un acero SAE-4140 debido al contenido de carbono y aleaciones de cromo molibdeno, sus propiedades físicoquímica se detallan en la tabla 25, por lo que generan una alta resistencia y dureza al tener mayor concentración de carbono, este material es ideal para este tipo de piezas.

**Tabla 25.**

*Propiedades del Acero SAE 4140*

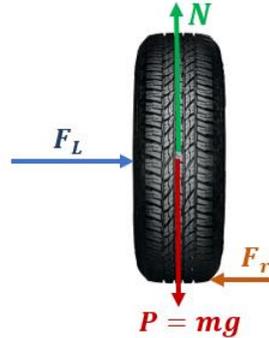
Propiedad	Valor	Unidad
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>		
Modulo Elástico	200	$Gpa = GN/m^2$
Límite de Tracción, $\sigma; > 16 \leq 45$	1000 – 1200	$N/mm^2$
Límite de Compresión	–	$N/mm^2$
Esfuerzo de Fluencia	655	$MPa$
Dureza	302	$HB$
<b>PREOPIEDADES FÍSICAS</b>		
Limite Elástico, $\sigma; > 16 \leq 45$	750	$N/mm^2$
Coefficiente de Expansión térmica	12,3 @ 200 – 100°C	$10^{-6}/K$
Conductividad Térmica	14	$W/m * K$
Calor Especifico	473 @ 20 – 200 °C	$J/Kg * K$
Densidad de Masa	7800	$Kg/m^3$
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>		
Carbono	0,38 – 0,43	%
Silicio	0,15 – 0,35	%
Manganeso	0,75 – 1,00	%
Fosforo	0,035	%
Azufre	0,040	%
Cromo	0,80 – 1,00	%
Molibdeno	0,15 – 0,25	%

Obtenida de [50].

Para calcular la fuerza que se ejerce sobre los dientes de los engranes es necesario calcular la fuerza que se requiere para girar las ruedas, para calcular esta fuerza es importante realizar un diagrama de cuerpo libre de los neumáticos, esto se muestra en la figura 30.

**Figura 30.**

*Diagrama de cuerpo libre del Neumático*



Obtenida de [51].

En la figura 30 se observa el diagrama de cuerpo libre de un neumático cuando este tiende a girar, para que este criterio se cumpla el neumático debe de vencer la  $F_r$  que es la fuerza de fricción cuando se aplica una  $F_L$  fuerza lateral que esta viene siendo la fuerza que se aplica con la ayuda del brazo de dirección.

Para que se cumpla que la rueda tienda a girar la fuerza lateral debe ser mayor que la fuerza de fricción, de lo cual si realizamos un análisis de las fuerzas en el eje X y Y se obtiene lo siguiente:

**Ecuación 14.**

*Sumatoria de fuerzas en el eje X del neumático*

$$\sum F_x = 0$$

$$F_L - F_r = 0$$

**Ecuación 15.**

*Sumatoria de fuerzas en el eje Y del neumático*

$$\sum F_y = 0$$

$$N - mg = 0$$

$$N - mg = 0$$

Para realizar los cálculos es importante tomar en cuenta el peso del Fórmula Student, en la tabla 1 se tiene el dato de que el vehículo tiene un masa de **250,6 kg**, además contamos con la distribución de masas en el eje delantero con un valor de 46,08 %, por lo que podemos calcular la masa total que soportan las ruedas del eje delantero.

$$250,6 \text{ kg} * \frac{46,08}{100} = 115,47 \text{ kg}$$

Con la ecuación 15 podemos calcular  $N$ , ya que sabemos el valor de la masa que soportan las ruedas delanteras cada rueda soporta una masa de 57,73 kg.

$$N = mg$$

$$N = 57,73 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$N = 565,83 \text{ N}$$

Para calcular la fuerza de fricción se usa la siguiente formula:

#### **Ecuación 16.**

*Fuerza de fricción*

$$F_r = \mu N$$

Obtenida de [52].

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción que este puede variar dependiendo del tipo de material con el que va a estar en contacto el objeto, estos valores se observan en la figura 31.

#### **Figura 31.**

*Coefficientes de fricción*

<i>Superficie de rodamiento</i>	<i>Valor máximo de <math>\mu</math></i>	<i>Valor de deslizamiento de <math>\mu</math></i>
<i>Asfalto seco</i>	0.8-0.9	0.75
<i>Hormigón seco</i>	0.8-0.9	0.76
<i>Asfalto húmedo</i>	0.5-0.7	0.45-0.6
<i>Hormigón húmedo</i>	0.8	0.7
<i>Grava</i>	0.6	0.55
<i>Nieve</i>	0.2	0.15
<i>Hielo</i>	0.1	0.07

Obtenida de [53].

Se elegirá un coeficiente de valor entre 0,8 a 0,9 porque las pruebas se realizarán en una cancha de hormigón seco.

Al utilizar la ecuación 16 podemos obtener el valor de la fuerza de fricción.

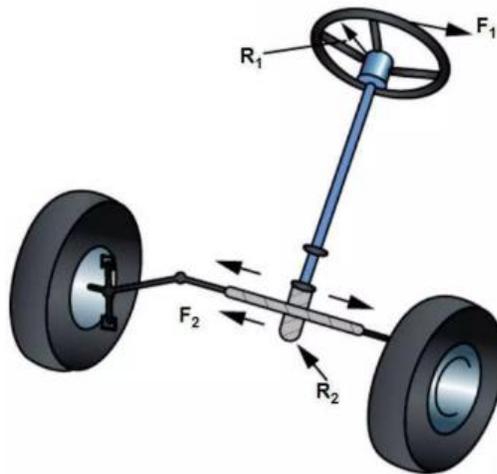
$$F_r = \mu N$$

$$F_r = 0,8 * 565,83 \text{ N}$$

$$F_r = 452,66 \text{ N} = F_L$$

**Figura 32.**

*Relación de esfuerzos el sistema de dirección*



Obtenida de [54].

Se observa en la figura 32 la relación que existe entre la fuerza, radio del volante y la fuerza, radio del piñón, el valor promedio de un piñón de una dirección mecánica es de 76 mm por lo que podemos utilizar este valor para obtener el par que se ejerce sobre la columna de dirección.

**Ecuación 17.**

*Relación de fuerzas y radios del sistema de dirección*

$$F_1 * R_1 = F_2 * R_2$$

Obtenida de [5].

Para obtener el par que se ejerce en la columna de dirección podemos ocupar la ecuación 18 sabiendo que el diámetro del piñón es de 76 mm [5].

**Ecuación 18.**

*Par de la columna de dirección*

$$\tau = F_2 * R_2 = F_L * R_p$$

$$\tau = 452,66 \text{ N} * 0.038 \text{ m}$$

$$\tau = 17,20 \text{ Nm}$$

Se obtuvo un par de 17,20 Nm en la columna de dirección, para obtener la fuerza que se necesita para aplicar sobre el reductor para girar las ruedas se la obtiene de la ecuación 17, sabiendo que el diámetro de los engranajes tanto el que une al volante es de 33,6 mm y el engranaje que une a la columna es de 17,6mm.

$$\tau = F_{eje \text{ Columna}} * R_{eje \text{ Columna}}$$

$$F_{eje \text{ Columna}} = \frac{\tau}{R_{eje \text{ Columna}}}$$

$$F_{eje \text{ Columna}} = \frac{17,20 \text{ Nm}}{0.0176 \text{ m}}$$

$$F_{eje \text{ Columna}} = 977,27 \text{ N}$$

La fuerza que se utilizará para aplicarla en los dientes del engranaje que une a la columna de dirección será del valor ya calculado de 977,27 N, de igual manera se calcula la fuerza que será aplicada para los dientes del engranaje que une al volante.

$$F_{eje\ Volante} = \frac{\tau}{R_{eje\ Volante}}$$

$$F_{eje\ Volante} = \frac{17,20\ Nm}{0.0336\ m}$$

$$F_{eje\ Volante} = 511,90\ N$$

Finalmente se obtuvo la fuerza que se deberá aplicar en los dientes el engranaje que conecta al volante que tiene como valor de 511,90 N.

**2.2.4.5 Montaje del Reductor de Giro del Volante.-** La principal función del reductor es reducir el número de vueltas que da el volante, en este caso el vehículo cuenta con 3 vueltas de lado a lado por lo que es esencial reducir este número de vuelta para generar un mayor control al sistema de dirección que cuenta el Fórmula Student.

La instalación del reductor se lo realizara en la columna de la dirección realizando un corte transversal modificando su longitud para colocar los acoples del sistema reductor que cuentan con un diámetro exterior de 30mm y un diámetro interior de 24mm. Para la unión de los acoples con la columna de dirección se utilizará la soldadora y un electrodo E6011.

**2.2.4.6 Montaje del Acople Rápido del Volante.-** En las reglas de la fórmula SAE menciona que el vehículo debe contar con una desconexión rápida del volante mientras que el piloto se encuentre en posición normal de conducción con los guantes puesto se menciona en el apartado V.3.3.3, por lo que es importante implementar un sistema de desconexión del volante [2].

Para implementar este sistema es necesario quitar el volante con el que contaba y previo a eso colocar el acople de desconexión rápida del volante, de igual manera se cambiara el

volante, este debe de tener un perímetro continuo que sea círculo o casi ovalado, no se permite volante de tipo H ni que tengan cortes se menciona en el apartado V.3.3.4 [2].

### **2.2.5 Mejoramiento del Sistema de Suspensión**

Para el mejoramiento del sistema de suspensión se ha tomado varios aspectos mencionados en las reglas de la fórmula SAE, el vehículo debe de contar con un sistema de suspensión en funcionamiento con amortiguadores delanteros y traseros con recorrido mínimo de las ruedas de 50 mm se menciona en el apartado V.3.1.1, todos los puntos donde se montará la suspensión deberán ser visible se menciona en el apartado V.3.1.3 [2]. Por lo que es esencial el cambio de amortiguadores, porque con lo que contaba el Fórmula Student eran sumamente rígidos por lo que no tenían ningún recorrido.

**2.2.5.1 Selección del Amortiguador.-** El amortiguador está diseñado para absorber y disipar la energía de los impactos que se genera por irregularidades de la calzada para generar mayor confort y maniobrabilidad al conductor. Su principal función es reducir los movimientos transversales en los diferentes sistemas mecánicos previniendo que se generen daños y garantizando una conducción más suave.

Para este tipo de competencias es recomendable utilizar amortiguadores que dispongan un tanque de reserva de aceite o gas para una mayor disipación del calor generado por la carrera, de igual manera se quiere analizar dos casos de amortiguadores suaves y rígidos por lo que es esencial contar con tipo regulables. Las propuestas de selección de amortiguadores se observarán en la tabla 26.

**Tabla 26.**  
*Propuestas de selección de amortiguadores*

<i>Propuestas</i>	<b>1. Amortiguador Xuri a Gas CG125/GY6-150</b>	<b>2. Amortiguador Ciclomotor 360mm Cromo X2</b>	<b>3. Amortiguador Rognee 360mm</b>
<i>Diseño</i>			
<i>Características</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Longitud entre ejes:</b> 360 mm.</li> <li>• <b>Peso:</b> 1,5 kg</li> <li>• El amortiguador se puede ajustarse en varias posiciones, ajustando el resorte y aumentando su rigidez.</li> <li>• Los pasadores de fijación son de Ø10 mm y Ø8 mm y cuenta con reductores.</li> <li>• <b>Color:</b> Negro-Rojo.</li> <li>• Tanque de reserva de gas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Longitud entre ejes:</b> 360 mm.</li> <li>• <b>Peso:</b> 1,3 kg.</li> <li>• El soporte superior e inferior tienen 21 mm de ancho y 32 mm de diámetro.</li> <li>• El amortiguador es mecánico y la dureza de los muelles puede ajustarse en 5 posiciones.</li> <li>• Los pasadores de fijación son de Ø10 mm y Ø8 mm cuenta con reductores.</li> <li>• <b>Color:</b> Cromo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Longitud entre ejes:</b> 360 mm.</li> <li>• <b>Peso:</b> 1,5 kg.</li> <li>• <b>Tipo de Material:</b> Aleación de Aluminio.</li> <li>• <b>Grosor del resorte:</b> 7mm.</li> <li>• El amortiguador se puede ajustar en varias posiciones, ajustando el resorte y aumentando su rigidez.</li> </ul>

**Tabla 27.**  
*Matriz de decisión para la selección del amortiguador*

Factores de Selección	FP	Amortiguador Xuri a Gas CG125/GY6-150	Amortiguador Ciclomotor 360mm Cromo X2	Amortiguador Rognec 360mm
Precio	0,15	9 1,35	6 0,9	7 1,05
Peso	0,40	8 3,2	9 3,6	8 3,2
Facilidad de instalación	0,25	8 2	8 2	8 2
Facilidad de adquisición	0,20	7 1,4	6 1,2	6 1,2
<b>Total</b>	<b>1,0</b>	<b>7,95</b>	<b>7,7</b>	<b>7,45</b>

En la tabla 26 se observa varias propuestas para la selección del amortiguador que será empleado en el Fórmula Student, como antes se menciona es ideal de que el amortiguador cuente con un recipiente de aceite o gas para mejorar la disipación de calor, tras la aplicación de la matriz de selección en la tabla 27 se seleccionará el Amortiguador Xuri que cuenta con un recipiente de Nitrógeno que ayudará a mejorar la disipación de calor que se genera durante la carrera, mejorando su trabajo. De igual manera se tomó en cuenta que se quiere analizar casos como lo es amortiguadores suaves y rígidos por lo que es importante que cuente con un ajuste en el resorte para aumentar o disminuir su rigidez con esto se podrá analizar cómo actúa el amortiguador sometiéndolo a las pruebas que se han mencionado anteriormente.

### **2.2.6 Mejoramiento del Sistema de Frenos**

El sistema de frenos del prototipo contaba con cañerías posteriores de plástico, lo cual está prohibido por las reglas de la fórmula SAE, se menciona en el apartado T.3.1.7 Se prohíben las líneas de freno de plástico [2].

El sistema de frenos también presentaba fugas en varios lugares, lo cual producía una pérdida del líquido de frenos y a su vez una disminución en la fuerza de frenado, además, mediante las pruebas realizadas y un análisis se determinó que la bomba de freno tenía una falla, la cual producía una deficiencia al momento de generar presión.

Por estas razones fue necesario realizar varios cambios que se detallarán a continuación; cambio de la bomba de freno, cambio de cañerías de los frenos posteriores, cambio de acoples y arandelas en todas las uniones de las cañerías del sistema de frenos.

Para los frenos posteriores se diseñó cañerías independientes debido a que el vehículo cuenta con tracción posterior, con esto se pudo mejorar la distancia de frenado, de igual manera mejorará el equilibrio de frenado para evitar que las ruedas delanteras se bloqueen antes que las traseras, lo que provocaría una pérdida de control y posteriormente un accidente.

## CAPÍTULO III

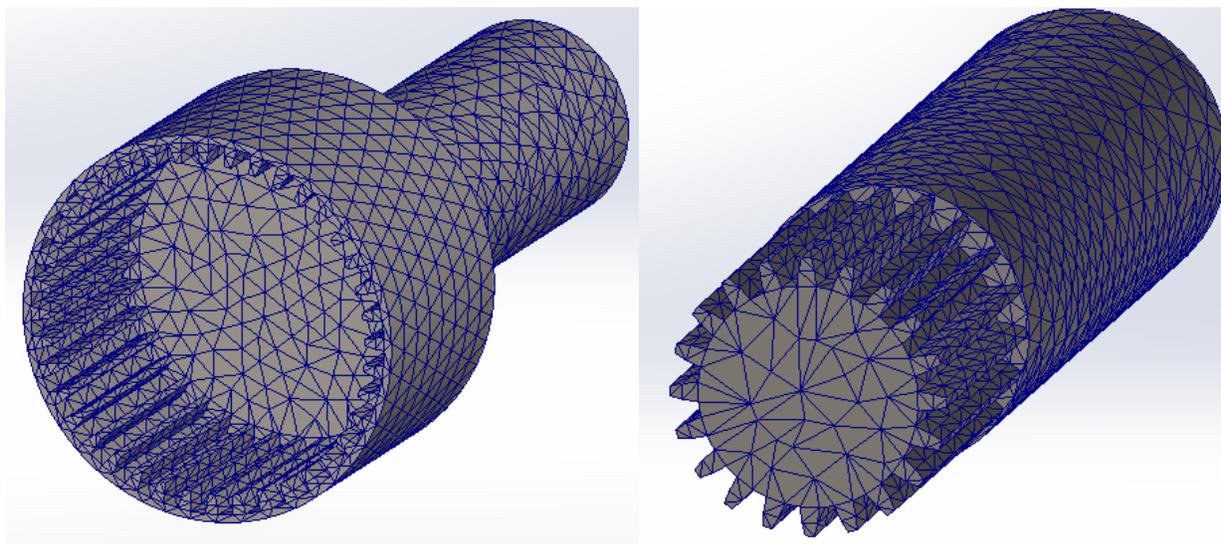
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis de la Simulación

Para iniciar con los análisis de simulación es importante tener en cuenta ciertos procesos, como lo es el mallado, que es el análisis de elementos finitos que ayuda a determinar si los modelos CAD creados cumplen con requisitos antes de ser fabricados caso contrario se requiere reconstruir o mejorar como lo es el tipo de material o modificar sus dimensiones.

**Figura 33.**

*Mallado de los engranajes*



En la Figura 33 Se puede observar el mallado de las piezas, tanto engranaje de entrada y engranaje de salida, la configuración del mallado que se utilizó para la simulación se detalla en la tabla 28.

**Tabla 28.**  
*Resultados obtenidos del Mallado*

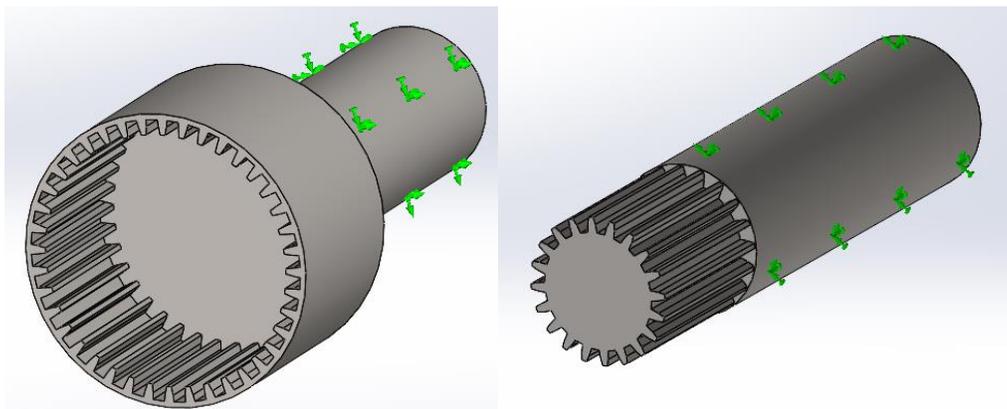
Configuración	Elementos	
	Engranaje de entrada	Engranaje de Salida
Densidad de Malla	Estándar	
Mallador	Malla Basada en Curvatura	
Tipo de Malla	Malla Sólida	
Calidad de Malla	Elementos cuadráticos de alto orden	
Número total de nodos	31953	23537
Número total de elementos	18373	14962
Tamaño de elemento	2,66874 mm	2,83103 mm
Tamaño máximo del elemento	2,5 mm	2,5 mm
Tamaño mínimo del elemento	2,10831 mm	2,45143 mm
Puntos Jacobianos	16	

En la tabla 28 podemos observar los resultado obtenido del Mallado que arroja el software, cabe recalcar que la densidad de malla que se utiliza para esta simulación no es demasiado fina debido a que el mallado para este tipo de engranajes no se requiere de una densidad de malla muy alta por lo que se ha seleccionado una calidad estándar ya que de igual manera se obtiene resultados que son viables sin un alto consumo computacional.

Un factor importante son los puntos de fijación, se debe tener en cuenta el funcionamiento de cada pieza simulada al mismo tiempo comprender que puntos se encuentran fijos para realizar la simulación, en este caso en la figura 33 se muestran los puntos de fijación, como el eje esta soldado con los acoples y unidos a la columna se utilizó puntos de fijación sobre el eje del engranaje.

**Figura 34.**

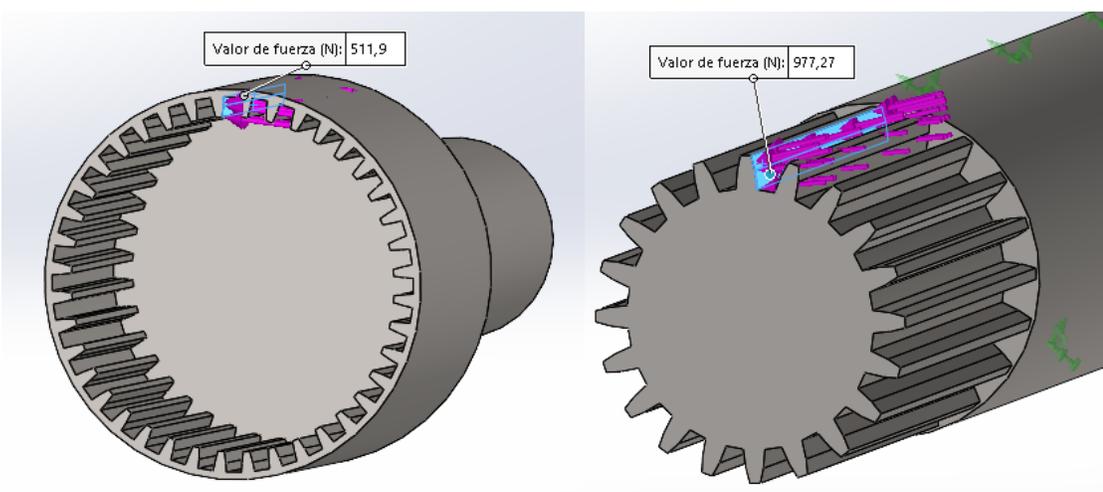
*Determinación de los puntos de fijación de los engranajes*



La fuerza que se va a utilizar para esta simulación será aplicada sobre la cara de los dientes de los engranajes como se observa en la figura 34, cabe destacar que en el apartado anterior se calculó y para cada engranaje tenemos una fuerza, para el engranaje de entrada que este será conectado al volante tenemos un valor de 511,90 N y para el engranaje de salida que este será conectado a la columna de dirección un valor de 977,27 N estas fuerzas deberán soportar los dientes tanto del engranaje de entrada y de salida, estos se detallarán en la figura 35.

**Figura 35.**

*Determinación de las fuerzas sobre la cara de los dientes de los engranajes*

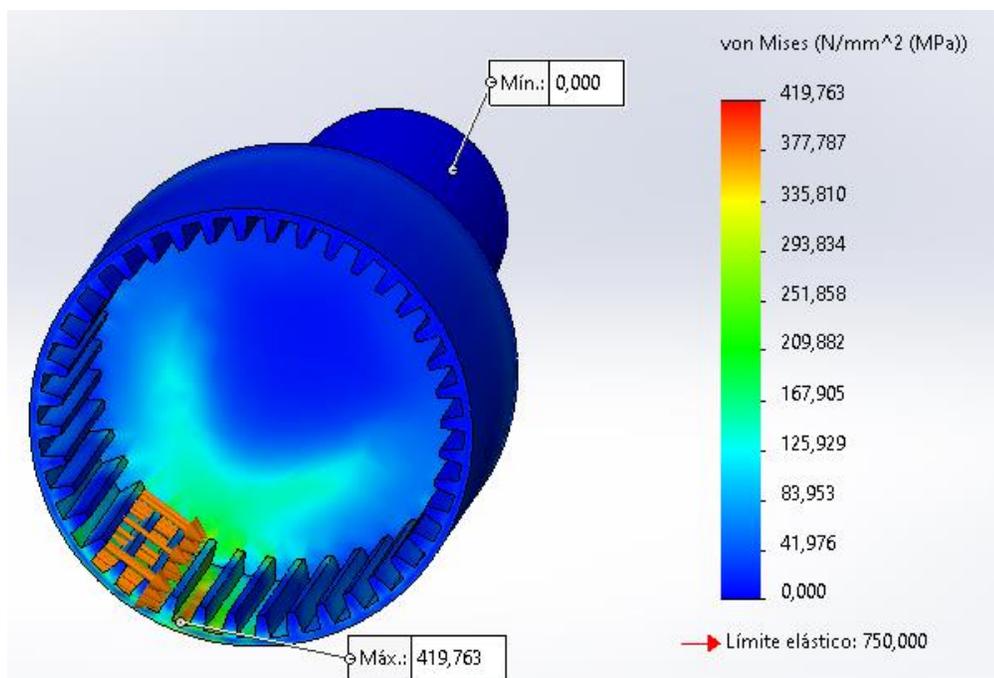


### 3.1.1 Análisis de Resultados de la Simulación Engranaje de Entrada

**3.1.1.1 Análisis de Tensión.-** En la figura 36 se puede observar que existe una mayor concentración de tensiones al costado del engranaje cerca de la raíz de los dientes, los valores máximo de tensiones para este diseño son de 419,763 MPa, esto quiere decir que el material que se ha empleado es ideal para este tipo de piezas debido a que el límite elástico que cuenta el acero AISI 4140 es de 750,000 MPa, que este valor está por encima del resultante de la simulación, por ende esta pieza no sufrirá de deformaciones debido a que la pieza permanece en la zona elástica.

**Figura 36.**

*Análisis de tensiones del engranaje de entrada*



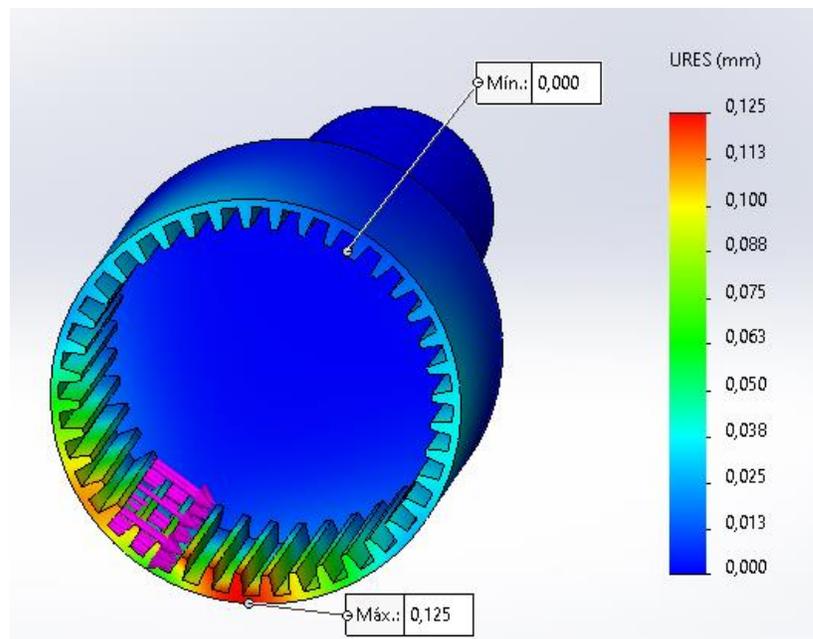
En la simulación se basa en los conceptos de la tensión de Von Mises, esta teoría analiza la deformación plástica que comienza cuando la energía de distorsión de un material alcanza los valores máximos que son críticos para el diseño de cualquier pieza, este concepto es ideal para piezas o materias dúctiles que pueden soportar elevadas deformaciones antes de

sufrir una fractura, o sobrepasar el límite elástico del material pasando al límite plástico que es cuando una pieza tiende a deformarse y no volver a su posición normal.

**3.1.1.2 Análisis de Desplazamientos.-** URES es una función que permite analizar y visualizar los resultados de la simulación para entender el comportamiento del diseño bajo diversas condiciones. En la figura 37 se observa que al aplicar la fuerza de 511,9 N esta pieza sufre un pequeño desplazamiento de un valor de 0,125 mm al tener una geometría fija en el eje, ya que se quiere analizar cómo se comporta los dientes al aplicar esta fuerza, pero en la figura 35 se demostró de que el material que se aplicó para la simulación de esta pieza no tiende a pasar el límite elástico lo que al dejar de aplicar la fuerza en el diente este tiende a regresar a su posición original, ya que no sobrepasa los límites elásticos ni mucho menos los límites plásticos, si llegara a sobre pasar estos valores la pieza sufriría un ruptura en la raíz del diente debido a que esta zona es la más afectada como lo podemos observar en las figuras 36 y 37.

**Figura 37.**

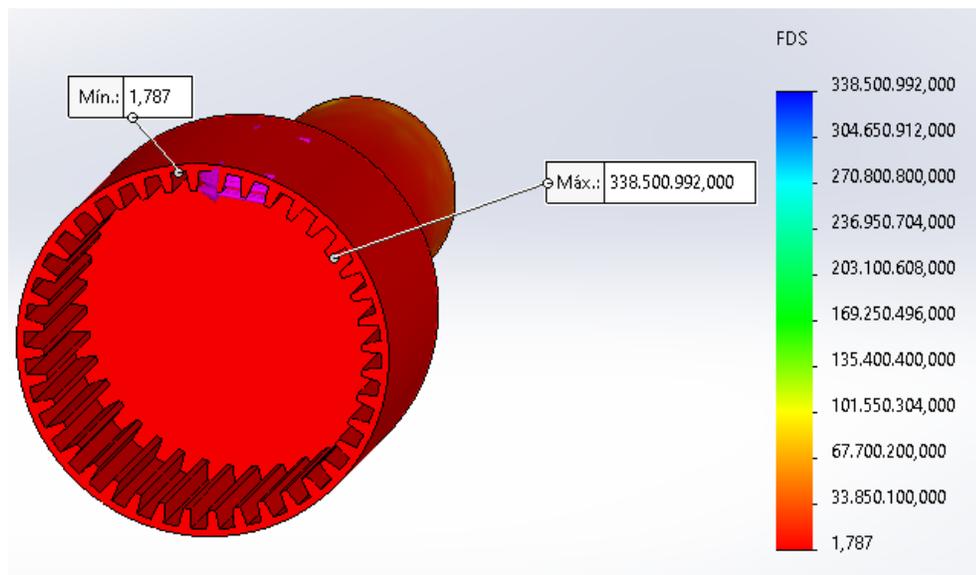
*Análisis de desplazamientos del engranaje de entrada*



**3.1.1.3 Análisis de Factor de Seguridad.-** También conocido como factor de diseño, es un valor que proporciona un margen de seguridad en el diseño de piezas, estructuras que se aplica para proporcionar incertidumbres en la carga, calidad de fabricación, en las propiedades de los materiales utilizados y de las diversas condiciones en la que va a estar expuesta. En la figura 38 podemos observar que el diseño cuenta con un valor mínimo de 1,787 como factor de seguridad en la zona más afectada por la fuerza que se aplica, este valor se encuentra en el intervalo sugerido de 1,5 a 2 que estos valores son recomendados para este tipo de diseño que son los engranajes. Al estar el valor en este intervalo demuestra que el diseño realizado, el tipo de material que se ha utilizado son los ideales, debido a que se ha demostrado que no tiende a superar los límites elásticos. Podemos concluir que el diseño es aprobado con esto podemos utilizar o a su vez fabricar este diseño, debido a que no sufre rupturas ni fracturas al aplicar una fuerza.

**Figura 38.**

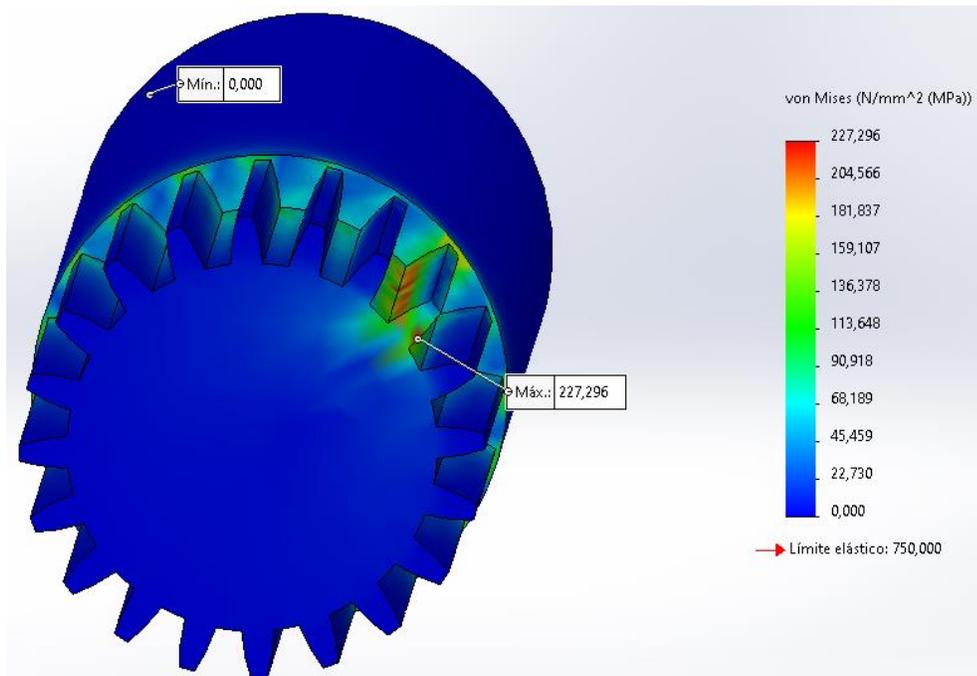
*Análisis del Factor de Seguridad del engranaje de entrada*



### 3.1.2 Análisis de Resultados de la Simulación Engranaje de Salida

**3.1.2.1 Análisis de Tensión.-** En la figura 39 se puede observar que existe un concentración de tensiones cerca a la raíz del diente, estas se encuentran en el lado opuesto al que se le aplicó la fuerza. El valor máximo es de 227,296 MPa, este valor no sobrepasa los límites elásticos del material AISI 4140 seleccionado para la simulación teniendo un valor de 750 MPa, por lo tanto, el material utilizado para este diseño es idóneo debido a que no sobrepasa los límites elásticos del material, si este diseño llegase a sobrepasar estos límites, sufriría desplazamientos muy elevados que tiende a provocar deformaciones y a su vez provocar fracturas o rupturas, que es lo que se quiere evitar.

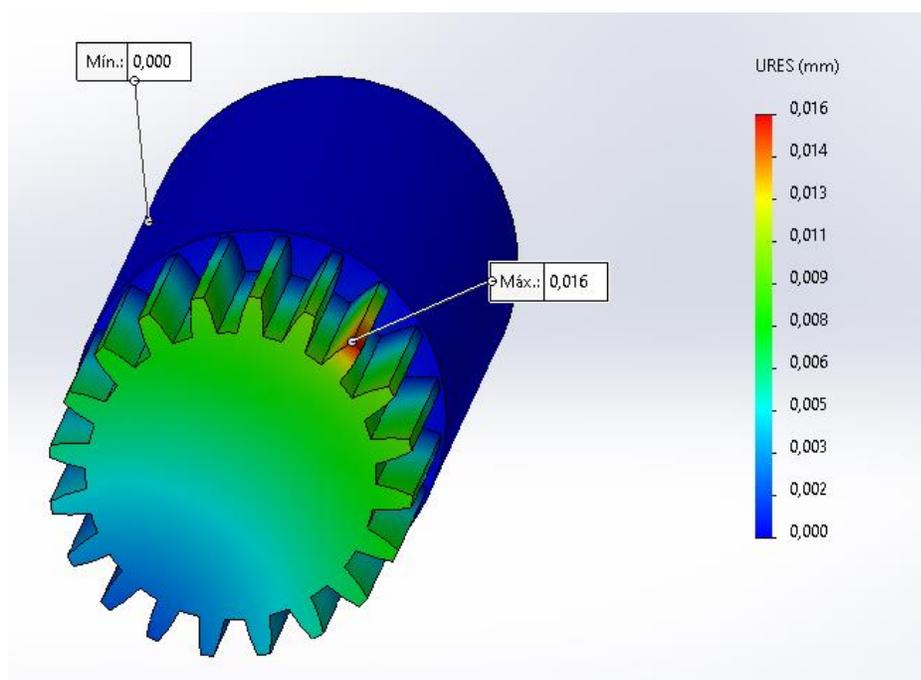
**Figura 39.**  
*Análisis de tensiones del engranaje de salida*



**3.1.2.2 Análisis de Desplazamientos.-** En la figura 40 se observa que existe un mínimo desplazamiento en la cresta del diente del engranaje de un valor de 0,016 mm, como se lo mencionó antes esta pieza cuenta con una concentración de tensiones que no sobre pasan los límites elásticos, por lo que se puede concluir que no sufrirá de deformaciones debido a que no sobrepasa los límites plásticos, realizará desplazamientos muy pequeños pero estos tenderían a de volver a su posición original al momento de dejar de aplicar la fuerza, debido a sus propiedades físico químicas del material seleccionado para la simulación.

**Figura 40.**

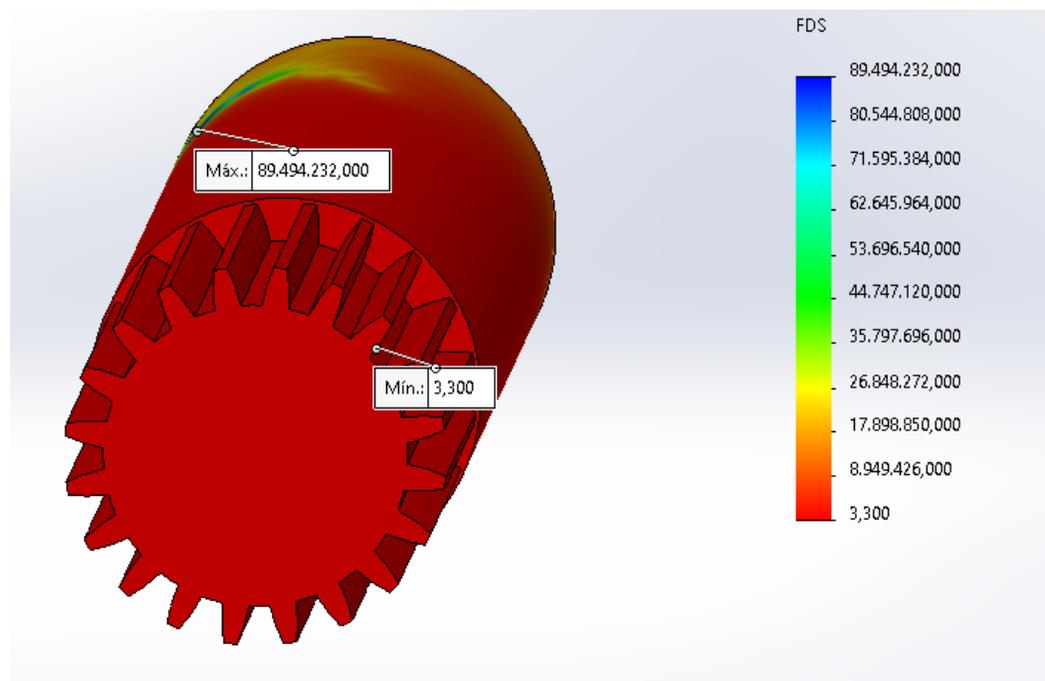
*Análisis de desplazamientos del engranaje de salida*



**3.1.2.3 Análisis de Factor de Seguridad.-** En la figura 41 se puede observar que el factor de seguridad mínimo se encuentra en el intervalo antes mencionada, que para engranajes es ideal un factor de seguridad mayor a 1,5. En este diseño de engranaje se obtuvo un valor mínimo de 3,3 que es el doble del valor que se requiere, por lo tanto, el diseño, la selección del material, sus dimensiones son ideales y no requieren de modificaciones porque se encuentra en el intervalo requerido. Cabe recalcar que al tener un elevado factor de seguridad demuestra que nuestro diseño puede llegar a un sobredimensionamiento, como lo es el desperdicio de material o una selección errónea del material, se debe de seleccionar según la aplicación a la que va a estar sometida.

**Figura 41.**

*Análisis de factor de seguridad del engranaje de salida*



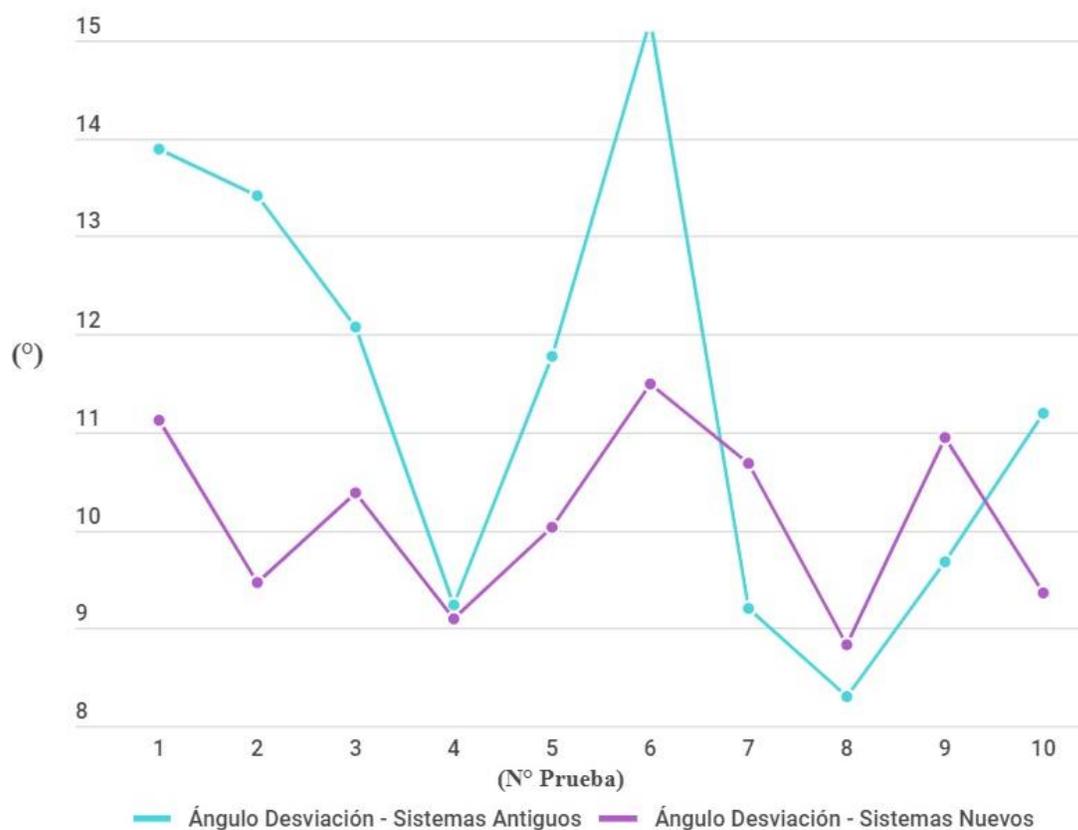
**3.2 Análisis del Sistema de Dirección**

Cabe aclarar que para cada sistema se realizaron pruebas para obtener datos y comparar los sistemas antiguos con los nuevos, en este caso se realizaron dos pruebas, al implementar el sistema reductor de giro al Fórmula Student se obtuvieron los siguientes datos de cada prueba.

### 3.2.1 Pruebas de Manejo en Línea Recta

**Figura 42.**

*Resultados de la Prueba de Línea Recta*



Al implementar el sistema reductor se mejora la maniobrabilidad del Fórmula Student, se observa en la figura 42 que los ángulos de desviación de los sistemas antiguos tienen fluctuaciones comparado a la gráfica de los sistemas nuevos, con una diferencia de medias de los datos de cada prueba de un 12,43%, un cambio significativo esto debido a que se realizó mantenimiento en el sistema de dirección con una alineación manualmente, de igual manera al contar el vehículo con sistemas de suspensión nuevas hace que las irregularidades de la calzada sean absorbidas sin perjudicar el movimiento de la dirección esto se puede observar en la prueba 4 un decrecimiento de un 30,8%, en la prueba 6 con un crecimiento en los ángulos de un 64,78% que son las de mayor y menor valor en la gráfica de los sistemas antiguos que cuenta con mayor fluctuaciones, en la

gráfica de los sistemas nuevos se observa que los valores no se encuentran dispersos en la prueba 8 se observa un decrecimiento de un 30,12 % que es el pico menor y la prueba 6 con un crecimiento de 26,40% con estos porcentajes se demostró que los sistemas nuevas cuentan con valores no tan dispersos como los sistemas antiguos que duplica el valor porcentual desde el valor menor al mayor, en cambio la diferencia del porcentaje de los sistemas nuevos es de un valor 3,72 que de igual manera son datos con los puntos más críticos tanto menor y mayor.

### 3.2.2 Pruebas de Radio de Giro

**Tabla 29.**

*Resultados de la Prueba de Radio de Giro*

No. Prueba	Distancia de Radio	Aprobación
1	4.00 m	No cumplió
2	6.00m	Cumplió
3	5.00 m	Cumplió
4	4.40 m	Cumplió

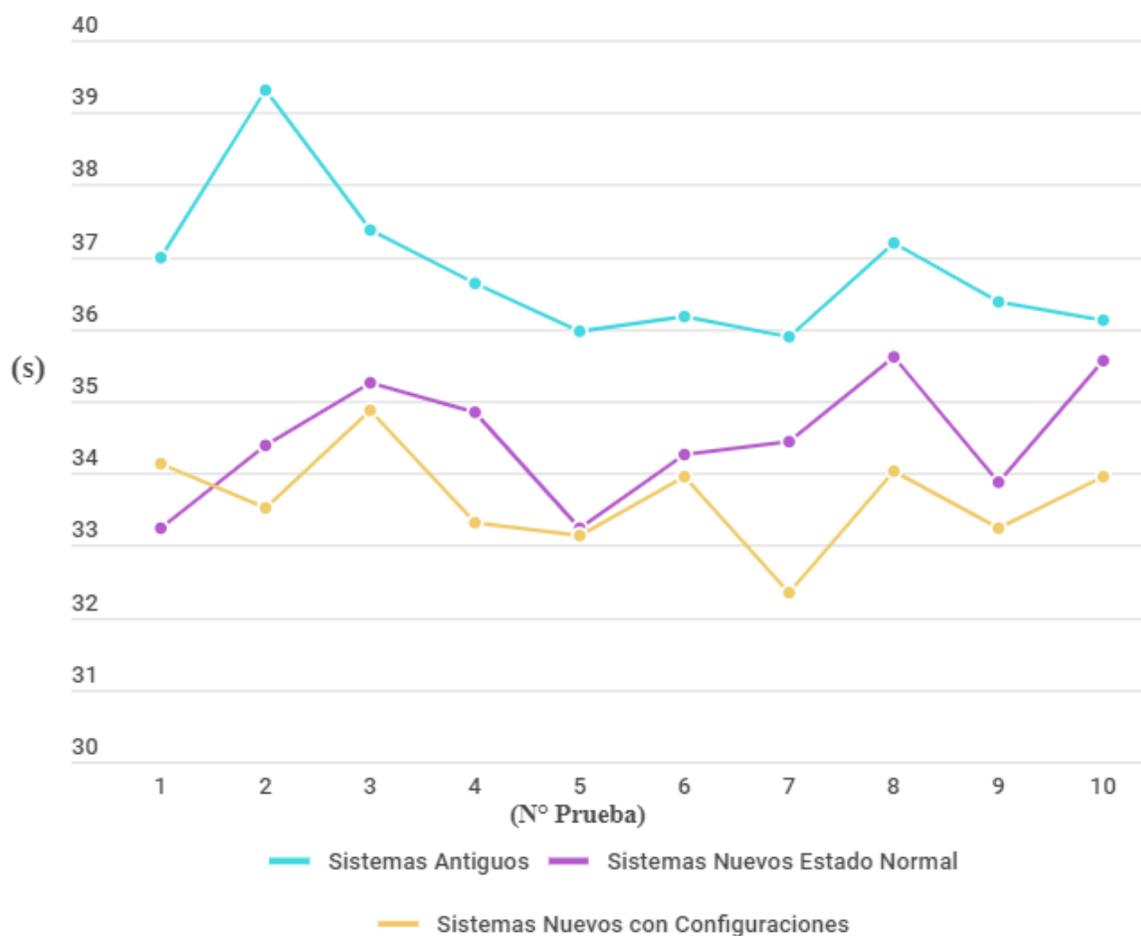
En este caso se realizaron pruebas para verificar si se modificó el radio de giro, en la tabla 29 se obtuvo datos que sirve para analizar si existe un cambio en el radio de giro pero en este caso al implementar el reductor de giro del volante no hubo cambios en los valores, sabemos que el radio de giro mide la capacidad que tiene el vehículo a la hora de girar, es decir si el vehículo cuenta con un radio de giro menor este tiende a mejorar la maniobrabilidad en lugares reducidos o en carreteras estrechas, por lo que es esencial que este valor no aumente a la hora de emplear cualquier sistema sobre la dirección, para ello en este análisis se demostró que no hubo cambios en el radio de giro por lo que no perjudica en la maniobrabilidad del vehículo.

### 3.3 Análisis del Sistema de Suspensión

#### 3.3.1 Pruebas de SkidPad

Se realizó tres casos, una prueba con los amortiguadores antiguos para analizar el tiempo en el que tarda el Fórmula Student en completar el circuito, de la misma manera otro con los amortiguadores nuevos en estado normal y otra en estado rígido, para esta configuración se ajustó de 10 pasos de rosca en cada amortiguador. En la figura 43 se observa los datos obtenidos de cada prueba en función del tiempo en el que tardan en completar el circuito.

**Figura 43.**  
*Resultados de las Pruebas de SkidPad*



El sistema nuevo con configuraciones es el más eficiente en términos de tiempo, generalmente cuenta con tiempos más bajos, aunque con algunas fluctuaciones, seguido por el sistema nuevo en

estado normal con una diferencia porcentual de la media de 2,13% debido a que la configuración que tienen los amortiguadores ofrece al vehículo mayor maniobrabilidad y contacto con la calzada, con esto el piloto no pierde el control del vehículo al acelerar más al entrar en las curvas del circuito y cumpliendo sin derribar los obstáculos, por lo que se ha decidido optar por esta configuración.

### ***3.3.2 Pruebas de Rebote Prolongado***

Se realizaron tres tipos de pruebas, una con los amortiguadores antiguos, otra con los amortiguadores nuevo en estado normal y otra con los amortiguadores en estado rígido para verificar si existe un cambio en la altura de los amortiguadores al momento de aplicar un peso sobre las zonas de los soportes donde están implementados.

En la tabla 10 se observa que los amortiguadores no cumplen la prueba debido que al aplicar la masa en este caso de 60 kg que es el del piloto, no realiza cambios en la altura o recorrido del amortiguador por lo que se verificó que necesita otro tipo de sistema de suspensión, para este caso se optó por unos amortiguadores regulables para poder realizar pruebas con diferentes configuraciones, una en estado normal como se lo menciono antes y otra en estado rígido para ello se realizó un ajuste en los amortiguadores de 10 pasos de rosca en cada uno y verificar si existe un recorrido en estos al aplicar la masa del conductor, finalmente en ambas pruebas se verificó que existe un recorrido en la altura de los amortiguadores por lo que son ideales para este tipo de vehículos y para lo que van a estar sometidos, se optó la configuración de los amortiguadores rígidos ya que en las demás pruebas se verifica que al tener esta configuración mejora en su rendimiento, en la maniobrabilidad y lo más esencial la distancia de frenado.

### **3.4 Análisis del Sistema de Frenos**

Es importante mencionar que las pruebas que fueron designadas para cada uno de los sistemas se realizaron por tres ocasiones, la primera ocasión con los sistemas auxiliares que contaba el Fórmula

Student en un inicio, la segunda ocasión con los nuevos sistemas auxiliares que fueron instalados y la tercera ocasión con los nuevos sistemas auxiliares, pero realizando configuraciones en el sistema de suspensión del Fórmula Student.

En el apartado del sistema de frenos se realizaron dos pruebas, la primera fue la capacidad de bloqueo de las cuatro ruedas y la segunda fue la distancia de frenado, en cada una se obtuvieron diferentes resultados que serán detallados a continuación.

### ***3.4.1 Prueba de Capacidad de Bloqueo de las Cuatro Ruedas***

Se realizó la prueba siguiendo a detalle los pasos descritos por las Reglas de la fórmula SAE, se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 30.**

*Prueba de Capacidad de Bloqueo de las Cuatro Ruedas*

<b>N° Prueba</b>	<b>Consideraciones</b>	<b>Aprobación</b>
1	Sistemas auxiliares anteriores	No aprobó
2	Sistemas auxiliares nuevos	Aprobó
3	Sistemas auxiliares nuevos con configuraciones	Aprobó

Con estos resultados se puede afirmar que, el Fórmula Student aprobaría con la inspección realizada por la SAE, ya que es la única prueba correspondiente al sistema de frenos en un vehículo con motor eléctrico.

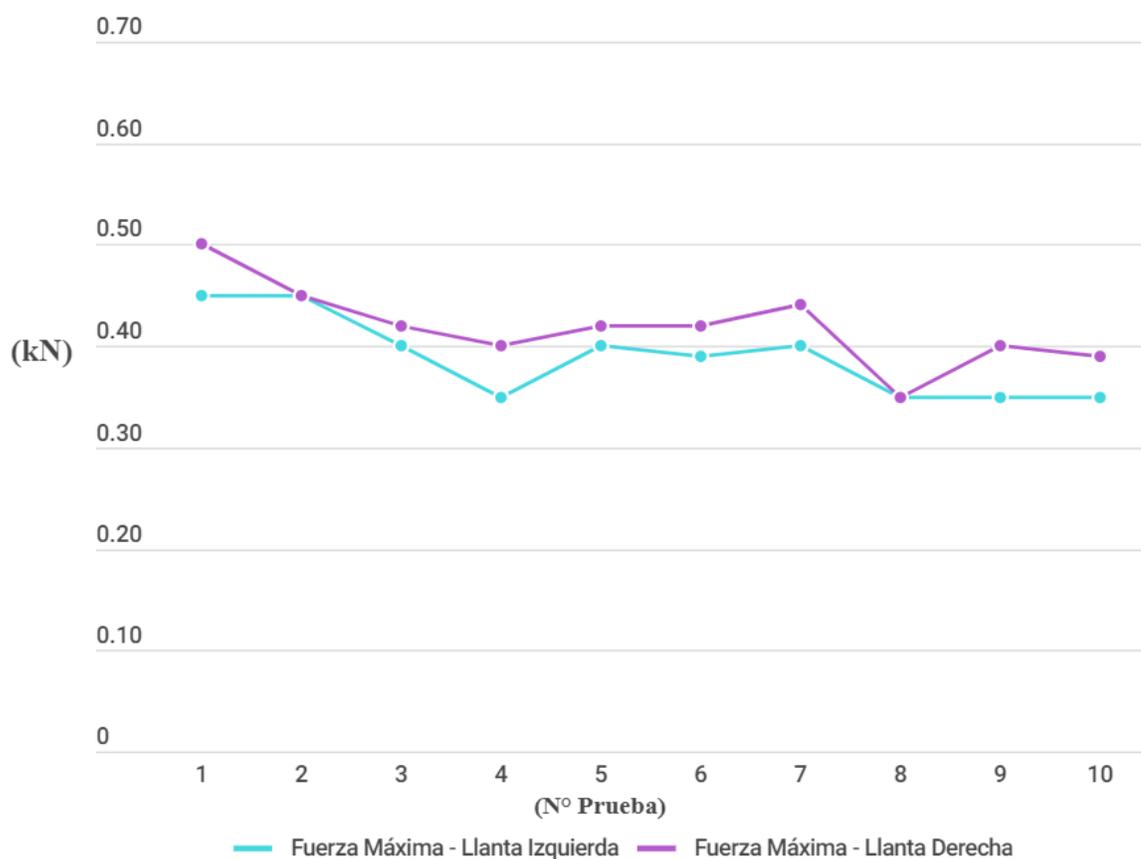
Sin embargo, para obtener valores más precisos sobre la fuerza de frenado del vehículo se utilizó un frenómetro en el cual realizamos un total de cuatro pruebas; las dos primeras pruebas se realizaron con los sistemas auxiliares anteriores, una prueba en las llantas delanteras y otra en las llantas traseras, las otras dos pruebas se realizaron con los sistemas auxiliares nuevos y siguiendo los parámetros de las anteriores pruebas, en este caso no se mostrarán una quinta y sexta prueba con los sistemas nuevos con configuraciones ya que no existía una diferencia de resultados.

De igual forma, los resultados que se mostrarán son de las pruebas de frenado progresivo, se eligió esta prueba para obtener las gráficas de resultados, ya que es en la que mejor se puede comprobar la diferencia de la fuerza de frenado entre ruedas.

**3.4.1.1 Prueba de Frenado en las Llantas Delanteras.**-Se realizó diez intentos en cada una de las pruebas para obtener una media y comparar los distintos resultados.

**Figura 44.**

*Fuerza de frenado en las llantas delanteras Sistemas Antiguos*

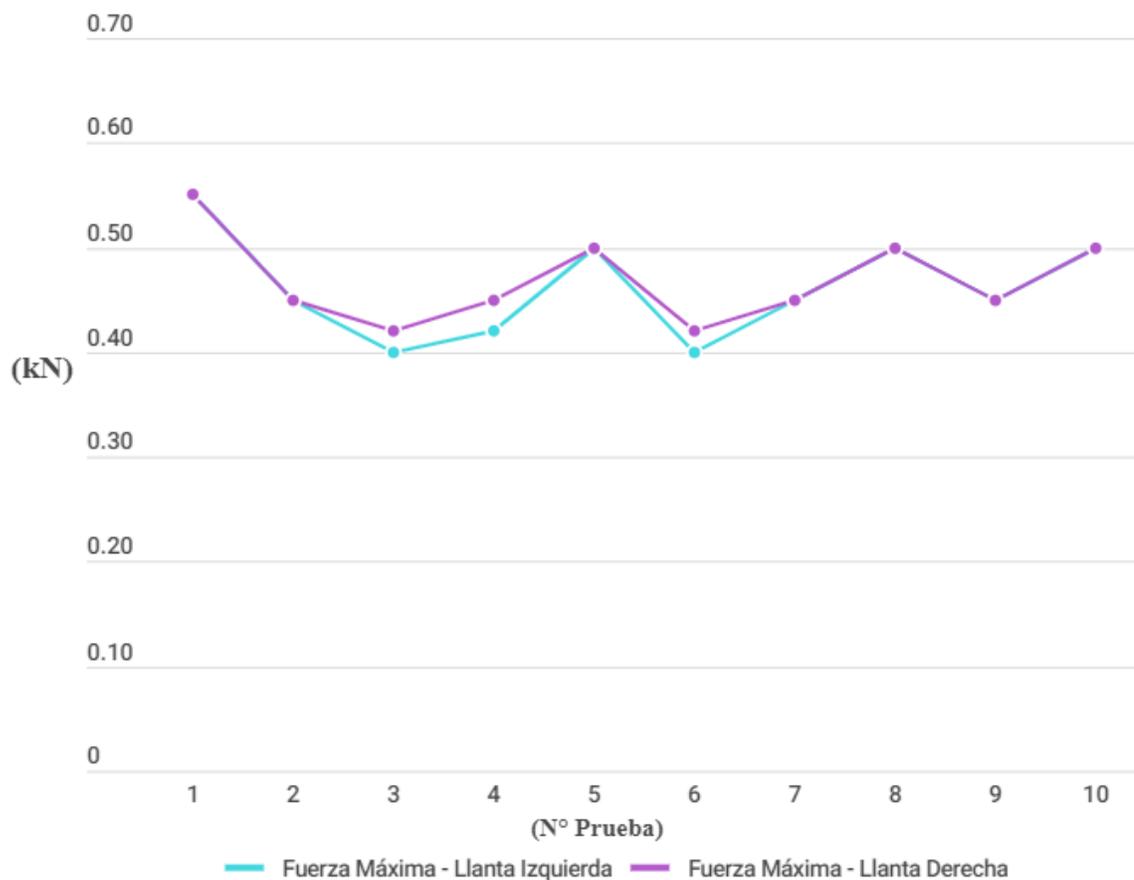


Se observa en la figura 44 que existe un porcentaje de desigualdad en la fuerza de frenado entre la llanta izquierda y derecha, con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la fuerza de frenado en la llanta izquierda de 0,389 kN y en la llanta derecha 0,419 kN. Lo cual nos indica que la llanta derecha tiene más fuerza de frenado en un 7,71% con respecto a la llanta izquierda.

A continuación, en la figura 45 se muestran los resultados obtenidos con los sistemas nuevos.

**Figura 45.**

*Fuerza de frenado en las llantas delanteras Sistemas Nuevos*

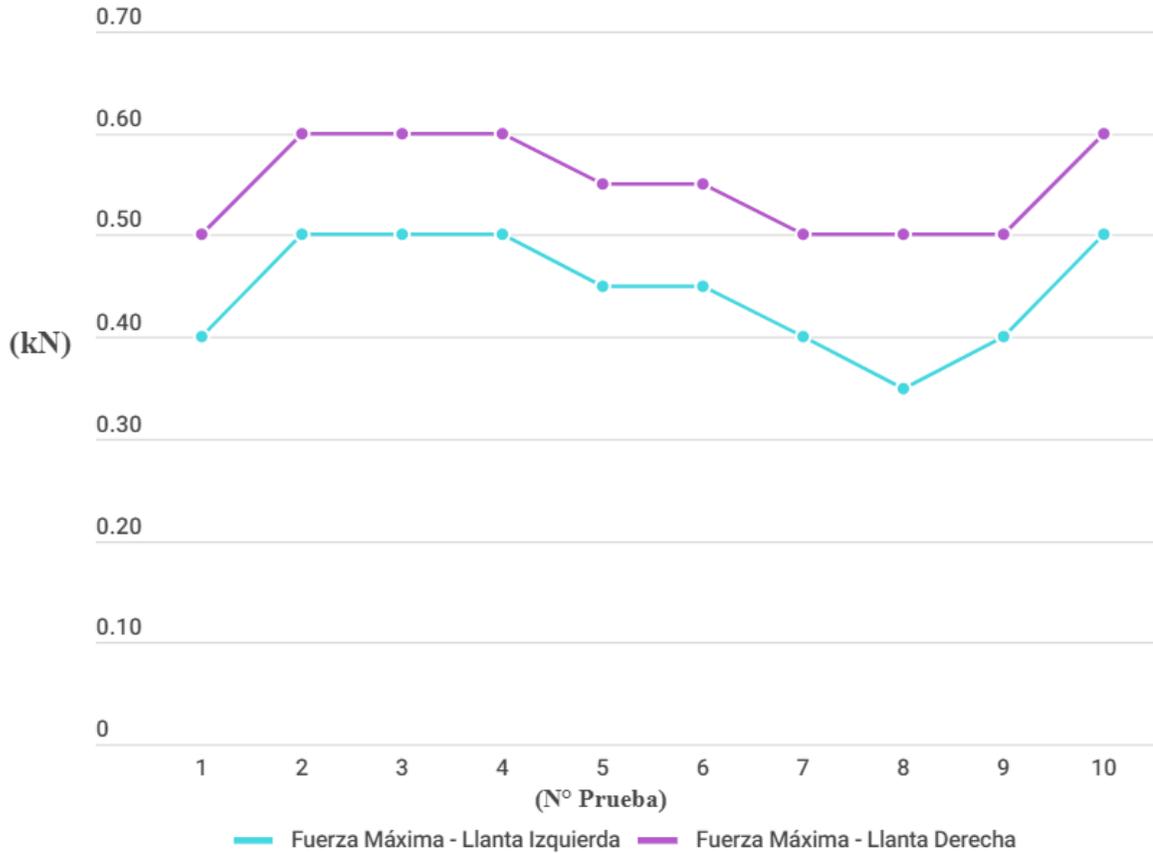


Se observa que aún existe un porcentaje de desigualdad en la fuerza de frenado entre la llanta izquierda y derecha, con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la fuerza de frenado en la llanta izquierda de 0,462 kN y en la llanta derecha 0,469 kN. Lo cual nos indica que la llanta derecha tiene más fuerza de frenado en un 1,51% con respecto a la llanta izquierda, lo cual es una variación muy baja entre la fuerza de frenado entre ambas ruedas.

### 3.4.1.2 Prueba de Frenado en las Llantas Traseras.-

**Figura 46.**

*Fuerza de frenado en las llantas traseras Sistemas Antiguos*

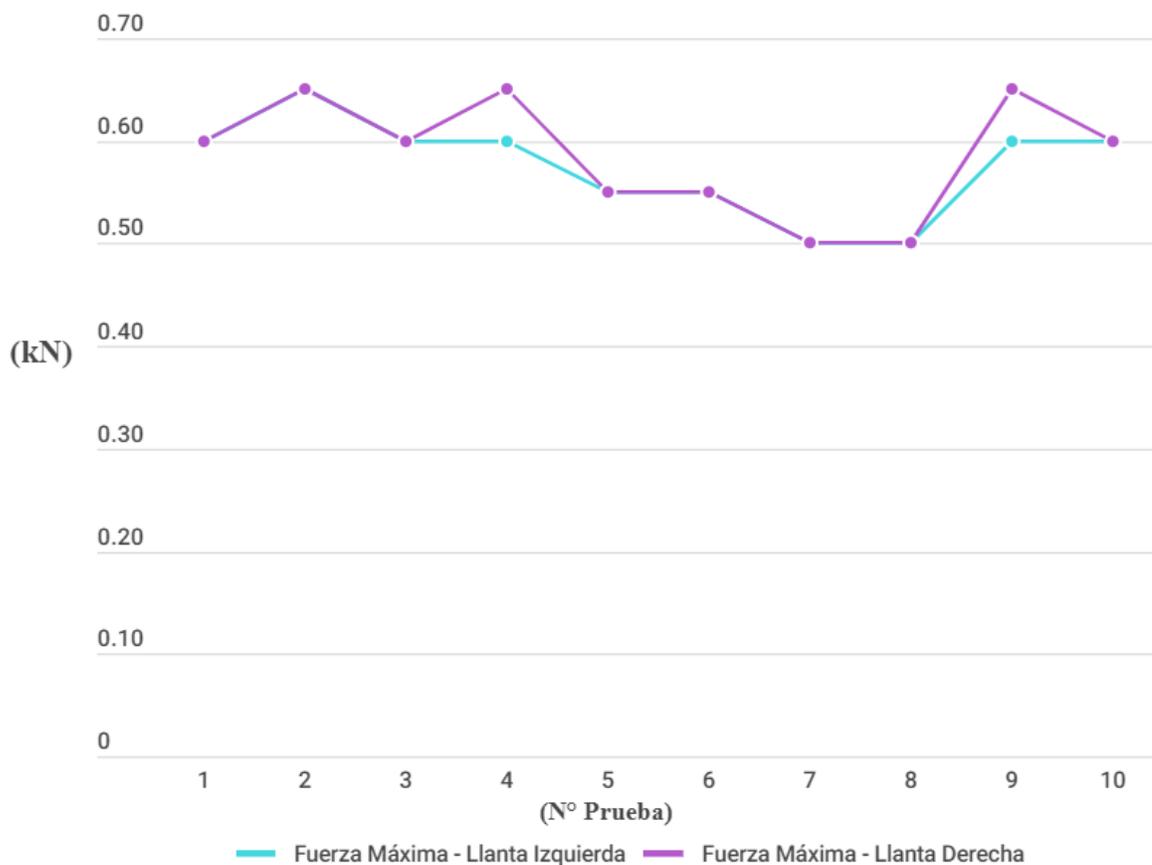


Se observa en la figura 46 que existe un porcentaje de desigualdad en la fuerza de frenado entre la llanta izquierda y derecha, con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la fuerza de frenado en la llanta izquierda de 0,445 kN y en la llanta derecha 0,555 kN. Lo cual nos indica que la llanta derecha tiene más fuerza de frenado en un 24,71% con respecto a la llanta izquierda.

A continuación, en la figura 47 se muestran los resultados obtenidos con los sistemas nuevos.

**Figura 47.**

*Fuerza de frenado en las llantas traseras Sistemas Nuevos.*



Se observa que aún existe un porcentaje de desigualdad en la fuerza de frenado entre la llanta izquierda y derecha, con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la fuerza de frenado en la llanta izquierda de 0,575 kN y en la llanta derecha 0,585 kN. Esto indica que la llanta derecha tiene más fuerza de frenado en un 1,73% con respecto a la llanta izquierda, lo cual es una variación muy baja entre la fuerza de frenado entre ambas ruedas.

También es importante mencionar que con los nuevos sistemas la fuerza de freno aumentó y ahora es más equitativa entre ambas ruedas, tanto en las delanteras como en las traseras.

### 3.4.2 Prueba Distancia de Frenado

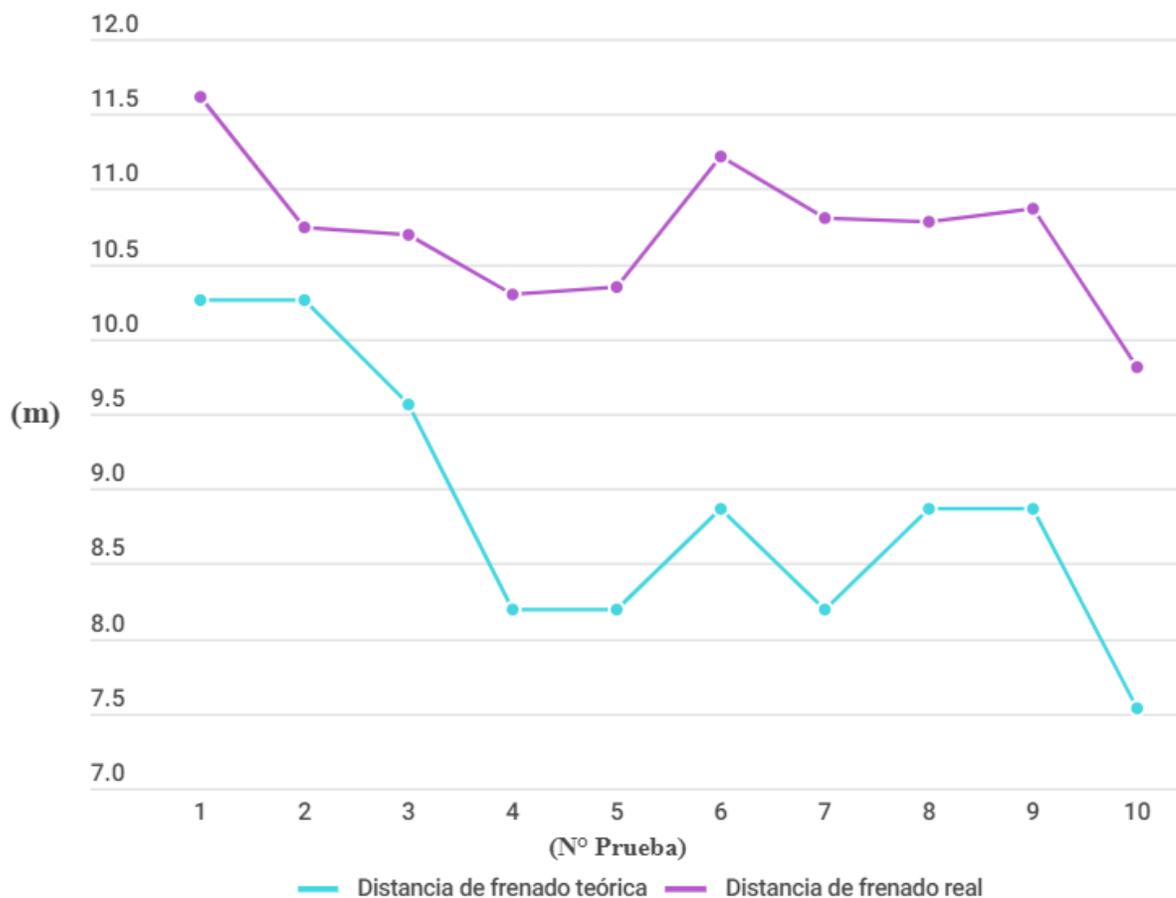
Se realizó esta prueba tomando en cuenta los parámetros descritos con anterioridad en el documento y mediante la ecuación 3. Se analizarán los resultados de las pruebas por separado y finalmente las tres juntas.

Se realizaron diez intentos en cada una de las pruebas para obtener una media y comparar los distintos resultados.

#### 3.4.2.1 Distancia de Frenado con Sistemas Auxiliares Antiguos.-

**Figura 48.**

*Distancia de Frenado con Sistemas Antiguos*



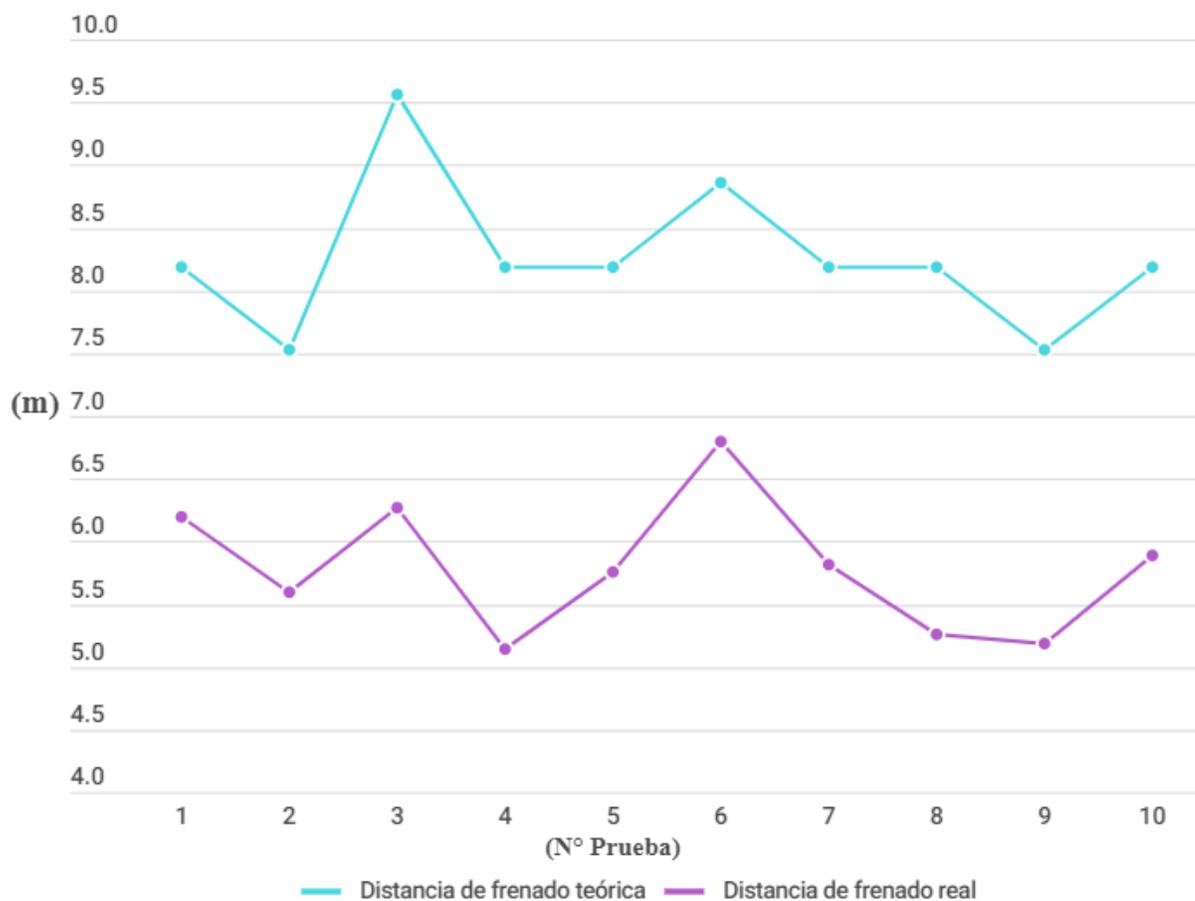
Con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la distancia de frenado tanto real como teórica, además, la media de la velocidad empleada en las pruebas dando como

resultado 26 km/h (7,22 m/s), una distancia de frenado teórica de 8,86m y una distancia de frenado real de 10,71 m. La distancia de frenado teórica supera en un 17,27% a la distancia de frenado real, lo cual no es óptimo.

### 3.4.2.2 Distancia de Frenado con Sistemas Auxiliares Nuevos en Estado Normal.-

**Figura 49.**

*Distancia de Frenado con Sistemas Nuevos Estado Normal*

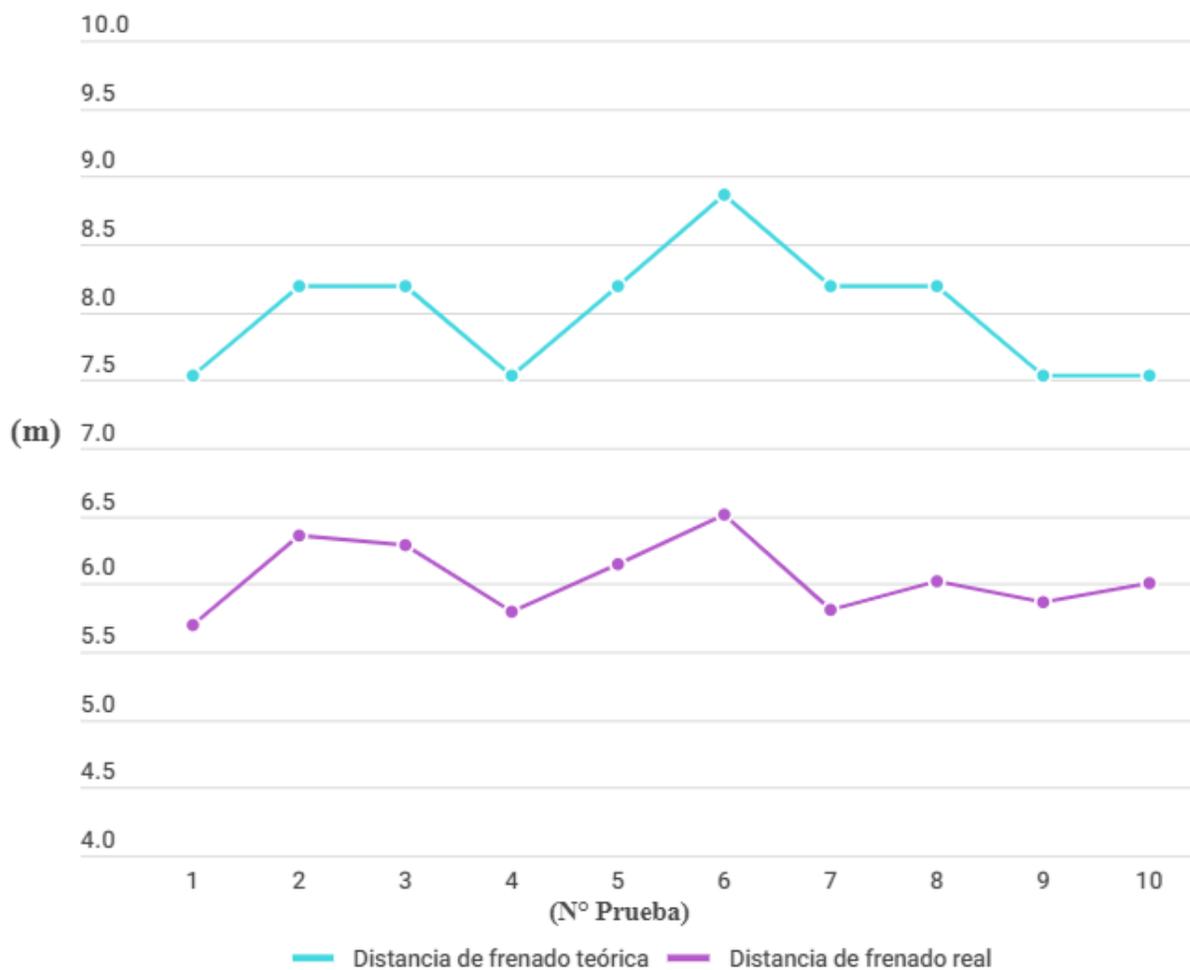


Con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la velocidad empleada de 25,1 km/h (6,97 m/s), una distancia de frenado teórica de 8,26 m y una distancia de frenado real de 5,78m. La distancia de frenado real supera en un 30,02% a la distancia de frenado teórica, lo cual nos indica una mejora muy considerable y un sistema de frenos óptimo.

### 3.4.2.3 Distancia de Frenado con Sistemas Auxiliares Nuevos con Configuraciones.-

**Figura 50.**

*Distancia de Frenado con Sistemas Nuevos con Configuraciones*

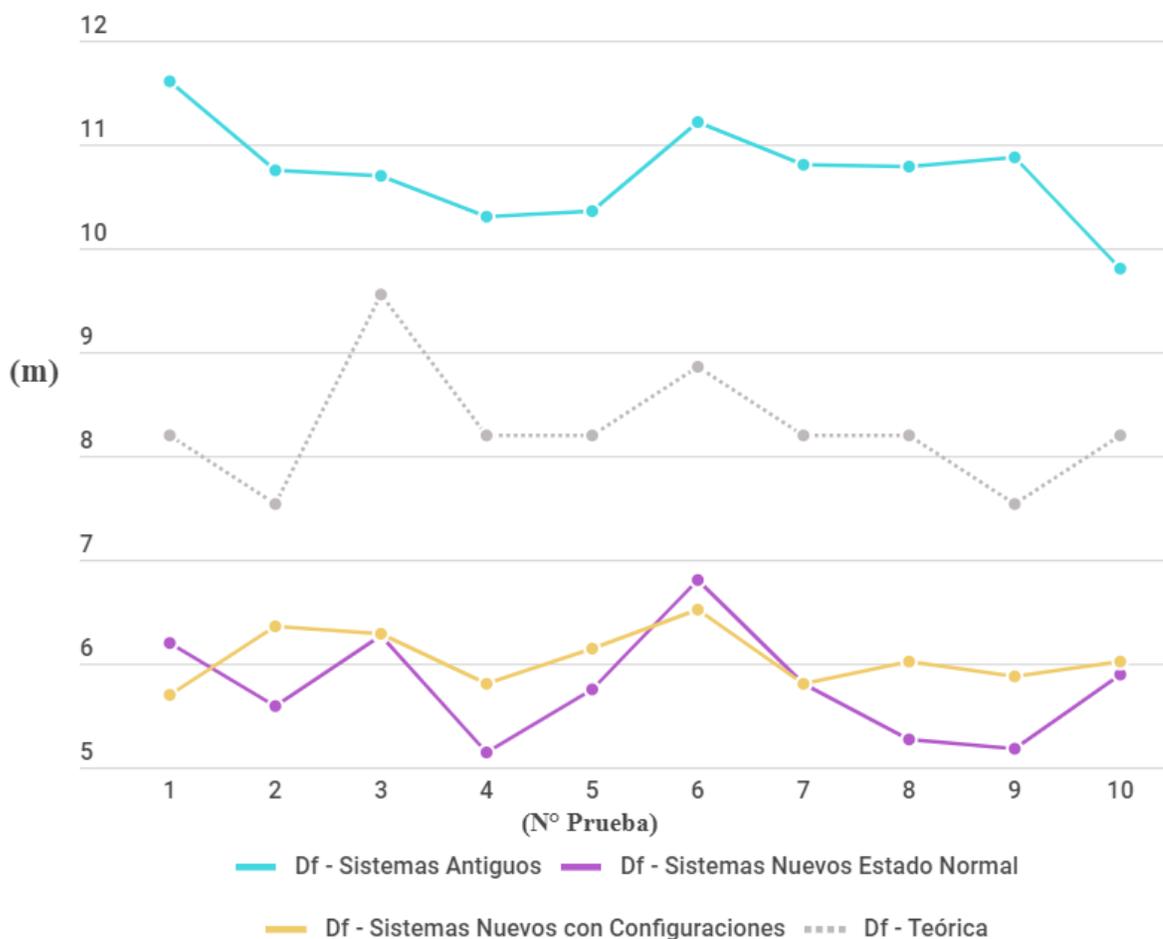


Con los resultados de las diez pruebas se obtuvo una media de la velocidad empleada de 24,7 km/h (6,86 m/s), una distancia de frenado teórica de 7,99 m y una distancia de frenado real de 6,05 m. La distancia de frenado real supera en un 24,28% a la distancia de frenado teórica.

**3.4.2.4 Comparación de las Pruebas Realizadas.-** Para realizar esta comparación tomamos únicamente los resultados de las distancias de frenado real obtenidas en las tres pruebas que se realizó.

**Figura 51.**

*Resultados Completos de la Distancia de Frenado Real*



Se observa en la figura 51, los resultados de la distancia de frenado con los sistemas antiguos son los más deficientes, seguido de estos están los resultados con los sistemas nuevos con configuraciones y finalmente los resultados con los sistemas nuevos en estado normal los cuales son los más eficientes.

Los sistemas nuevos en estado normal superan en un 46,03% a los sistemas antiguos y en un 4,46% a los sistemas nuevos con configuraciones.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Finalmente, el análisis exhaustivo de las características de los sistemas auxiliares dirección, suspensión y frenos del vehículo Fórmula Student tuvo como base los requisitos de la normativa SAE, que permitió identificar deficiencias en el diseño original del prototipo. Todo este proceso logró identificar que se necesitaba ajustes en los sistemas auxiliares para garantizar que el vehículo cumpliera con las reglas exigidas por la competición. La revisión técnica según la normativa SAE fue un punto clave para orientar el nuevo diseño de los sistemas auxiliares, para asegurar que el prototipo tenga mejoras en la maniobrabilidad, seguridad y rendimiento en general del mismo.
- En la normativa que plantea la Fórmula SAE, existe un apartado en que se menciona una serie de pruebas estáticas y dinámicas, estas fueron tomadas para analizar el estado del vehículo antes y después del diseño o implementación de los sistemas auxiliares, iniciando con pruebas de diseño de construcción del prototipo, cumpliendo una distancia entre ejes de 1530 mm superando los valores mínimos que dicta la normativa, de igual manera el ancho de vía menor no debe ser inferior al 75% del ancho de vía mayor, obteniendo valores de ancho de vía delantero de 1300 mm y posterior de 1450 mm. En las verificaciones técnicas el prototipo debe de contar con un sistema de seguridad para el piloto, lo que fue esencial la implementación de un cinturón de seguridad y un volante desmontable para el fácil acceso al vehículo y el piloto debe ser capaz de salir en un tiempo inferior a los 5 segundos, cumpliendo con un tiempo de 4 segundos.

- La utilización de un software CAD resultó fundamental, debido a que se pudo analizar si al implementar el sistema reductor de giro del volante existieran deformaciones excesivas entre los engranajes de entrada y de salida, en este caso estos fueron instalados sobre la columna de dirección, para ello fue importante calcular las fuerzas en las que estarán sometidos, la fuerza que se aplicó en los dientes del engranaje que conecta al volante fue de un valor de 511,90 N y el valor de la fuerza que se aplicó en los dientes del engranaje que conecta a la columna de dirección fue de un valor de 977,27 N estos valores cambian debido al diámetro de cada engranaje.
- En cuanto a los resultados de tensiones, para este diseño en el engranaje con valores más críticos fueron de 419,763 MPa que demostró que el material utilizado para este diseño no supera al valor del límite elástico del acero AISI 4140 de un valor de 750,000 MPa concluyendo que al aplicar la fuerza sobre el diente este tiende a deformarse y volver a su posición de origen sin ningún problema.
- Al concluir con las simulaciones se obtuvo que este diseño cuenta con un factor de seguridad de 1,78 demostrando que este valor se encuentra en el intervalo sugerido para este tipo de diseño que son los engranajes, con todos estos análisis se pudo instalar el sistema reductor de giro en el Fórmula Student.
- La implementación de los nuevos sistemas auxiliares dirección, suspensión y frenos en el prototipo Fórmula Student permitió mejoras significativas en el rendimiento y seguridad del prototipo. Se realizaron pruebas comparativas que demostraron la superioridad de los nuevos componentes en comparación con los sistemas anteriores. Con las pruebas dinámicas se demostró mejoras entre los sistemas, al haber implementado los amortiguadores regulables para este caso se utilizó un ajuste de 10 pasos de rosca y el sistema reductor de giro del volante, se presentaron mejoras en la maniobrabilidad y

estabilidad del prototipo, esto se observó en las pruebas de SkidPad que mejoró un 8,94% de la media de los tiempos obtenidos en las pruebas realizadas debido a que el fórmula Student no pierde la adherencia de los neumáticos con la calzada favoreciendo que las pruebas sean cumplidas con menores tiempos comparado con los sistemas antiguos, también se mejoró un 11,71% en las pruebas de dirección en línea recta, debido a que se realizó una alineación manual modificando el ángulo Toe a un valor neutro, para que el prototipo mantenga una dirección recta sin necesidad que el piloto tienda hacer correcciones constante del volante y ofreciendo una mejor respuesta de la dirección ya que esta es más precisa y predecible especialmente en estas situaciones que son de un manejo rápido.

- Con las pruebas de radio de giro se demostró que al haber implementado el sistema reductor de giro no se modificó estos valores, al tener un valor bajo en el radio de giro ayuda que el vehículo sea fácil de maniobrar en lugares reducidos y carreteras estrechas, por lo que el vehículo va a estar sometido a curvas cerradas, finalmente con las pruebas de rebote prolongado se cumplió que el vehículo al aplicar la masa del conductor en este caso 60 kg, exista un recorrido en los amortiguadores, con los antiguos sistemas de suspensión no existía el recorrido mínimo que es de 50 mm, al tener la configuración de 10 pasos de rosca se cumplió este requisito que menciona la Fórmula SAE.
- La implementación del nuevo sistema de frenos ha demostrado ser significativamente más eficiente que los sistemas antiguos. La distancia de frenado se ha reducido en un 46,03% en comparación con los sistemas antiguos, las configuraciones realizadas a los sistemas nuevos también mejoraron la eficiencia de frenado, aunque en menor medida que los sistemas nuevos en estado normal, superándolos en un 4,46%. Esto sugiere que las configuraciones adicionales aportan beneficios, pero no tanto como el diseño original de los sistemas nuevos. Un punto clave para lograr todos estos resultados fue la

implementación de cañerías independientes en los frenos y cañerías de metal, con esto no sólo aumentamos la eficiencia, si no, también aumentó la seguridad. Es importante mencionar que al momento de realizar las pruebas en el frenómetro con los sistemas nuevos no existió diferencia de resultados en estado normal y con configuraciones.

#### 4.2 Recomendaciones

- A pesar de la eficiencia que se logró con los nuevos sistemas de frenos en estado normal, se recomienda continuar investigando y experimentando con diferentes configuraciones adicionales que puedan mejorar aún más la eficiencia y distancia de frenado, como podría ser utilizando diferentes tipos de bombas, diferentes materiales de fricción, etc.
- Es fundamental revisar que el sistema reductor de giro del volante se encuentre con el mantenimiento adecuado para mejorar y asegurar su óptimo funcionamiento, verificar que sus conexiones tanto del engranaje de entrada y salida se encuentren en buen estado, esto para evitar que se pierda el control de la dirección.
- Se recomienda analizar los recorridos de los amortiguadores en diferentes tipos de pruebas dinámicas, para asegurar el correcto funcionamiento de igual manera aprovechar al máximo la capacidad de regulación de la nueva suspensión, se sugiere documentar todas las configuraciones y resultados de las pruebas con esto se podrá determinar las configuraciones óptimas para diferentes escenarios de carrera y obtener el mayor rendimiento del vehículo.
- Considerar la posibilidad de implementar un nuevo tren de potencia ya que como parte de este trabajo de grado se implementaron nuevas partes y piezas, como consecuencia el vehículo aumentó su peso, lo cual produjo cambios en la relación de peso potencia que este vehículo tenía anteriormente.

## REFERENCIAS

- [1] Secretaria Nacional de Planificación, «Plan de creación de oportunidades», 2021. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/1unBK7>
- [2] SAE International, «Reglas Formula SAE», 2024.
- [3] C. Clonts, «Una fórmula para la experiencia del mundo real». [En línea]. Disponible en: <https://www.sae.org/news/2023/06/formula-sae-michigan-2023>
- [4] G. Cruz y D. Mesías, «Diseño, Construcción E Implementación De Sistemas De Suspensión, Dirección Y Frenos Del Vehículo De Competencia Fórmula SAE», Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6121/1/T-ESPEL-MAI-0408A.pdf>
- [5] F. Morillo, «Diseño e implementación de un sistema de dirección para un vehículo tipo formula student», Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8089>
- [6] C. Llivisaca, «Diseño Y Construcción Del Sistema De Frenos De Un Vehículo De Competencia Formula SAE Eléctrico», Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15520/1/UPS-CT007621.pdf>
- [7] C. Caraguay y S. Caraguay, «Diseño y Construcción del Sistema de Suspensión de un Vehículo Monoplaza Para la Competencia Formula Student.», Universidad Politécnica Salesiana SEDE Cuenca, Ecuador, 2015.
- [8] J. Ezeta, A. Mandow, y A. Garcia, «Los sistemas de suspension activa y semiactiva: Una revision», *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 10, n.o 2, pp. 121-132, 2013, doi: 10.1016/j.riai.2013.03.002.
- [9] J. Hurel, E. Terán, F. Flores, J. Peralta, y B. Flores, «Modelado físico y matemático del sistema de suspensión de un cuarto de vehículo», *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, vol. 2017-July, 2017, doi: 10.18687/LACCEI2017.1.1.295.
- [10] E. Efler, «Diseño de la suspensión trasera de un vehículo Formula Student», Universidad Politécnica de Madrid, España, 2016. [En línea]. Disponible en: [http://oa.upm.es/43912/1/TFG\\_ELIAS\\_ISIDRO\\_EFLER\\_HERRANZ.pdf](http://oa.upm.es/43912/1/TFG_ELIAS_ISIDRO_EFLER_HERRANZ.pdf)
- [11] M. Schnubel, «Automotive Suspension and Steering Systems». Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/430020041/pdfjoiner-19>
- [12] D. Ayala, «Diseño E Implementación De Un Sistema De Frenos Para Un Vehículo Tipo Formula Student», pp. 1-112, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8087>
- [13] C. Groczewski, «Diseño y optimización del sistema de frenada de un vehículo monoplaza», Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2019.
- [14] E. Águeda, J. Navarro, y T. Gómez, *Sistemas de Transmision de Fuerza*, Paraninfo., vol. 1. España, 2012. [En línea]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=sTPfsq4e0g4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=sTPfsq4e0g4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [15] D. Carpio, «Diseño y construcción del sistema de frenos de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico», Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2018. Accedido: 18 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15358>

- [16] R. Chanes, «Análisis y propuestas de mejora del sistema de dirección de un vehículo de Fórmula SAE», Universidad Politécnica de Madrid, España, 2019.
- [17] J. López, «Estudio Teórico De La Alineación De Un Vehículo Por Visión Artificial», Universidad Carlos III de Madrid, España, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/762cd778-a87d-4bb2-9c21-2eec15385dd1/content>
- [18] C. Cepeda y A. Quishpe, «Investigación del comportamiento de un bastidor construido en aluminio en un prototipo Formula Student.», Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/14955>
- [19] J. Auquilla y C. Torres, «Diseño del sistema de suspensión de un vehículo monoplaza eléctrico Fórmula SAE», Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2016.
- [20] J. Jácome, «Diseño Y Construcción De Un Sistema De Suspensión Para Un Vehículo Monoplaza Formula Sae», Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11962>
- [21] MotorGIGA, «CÁMBER, Definición», MotorGIGA. Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/camber-definicion-significado/gmx-niv15-con193355.htm>
- [22] F. Sanz, «Análisis del sistema de dirección de un automóvil mediante Multibody de Simulink», Universidad Carlos III de Madrid, España, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.ciencialatina.org/wp-content/uploads/2024/01/Simulink-y-Simscape-multibody-en-Accion-Ejercicios-practicos-de-simulacion-de-Sistemas-Mecanicos-y-Roboticos.pdf>
- [23] Automecanico.com, «Suspension, direccion, alineacion», Automecanico.com. Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://automecanico.com/auto2029/susp6b.html>
- [24] D. Mejía, «Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplaza para la competición en la Formula SAE», Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7547/1/UPS-CT004482.pdf>
- [25] Grupo Circuit, «Nociones sobre alineación de la dirección de un vehículo», Grupo Circuit. Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.grupocircuit.com/nociones-sobre-alineacion-de-la-direccion-de-un-vehiculo-parte-3/>
- [26] ResearchGate, «A front wheel steering vehicle and steer angles of the inner and outer wheels», ResearchGate. Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/A-front-wheel-steering-vehicle-and-steer-angles-of-the-inner-and-outer-wheels-44\\_fig2\\_271742461](https://www.researchgate.net/figure/A-front-wheel-steering-vehicle-and-steer-angles-of-the-inner-and-outer-wheels-44_fig2_271742461)
- [27] F. Muñoz, «Modelo director no paramétrico de amortiguador magneto-reológico basado en redes Neuronales», Universidad Carlos III de Madrid, España, 2012.
- [28] C. Arévalo, A. Medina, y J. Valladolid, «Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student», *Ingenius*, n.o 20, pp. 96-107, 2018, doi: 10.17163/ings.n20.2018.09.
- [29] N. Peña y C. Castro, «Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla», *Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla*, vol. 11, n.o 2, pp. 10-33, 2019, doi: 10.22335/rfct.v11i2.641.

- [30] C. Pulido, «Diseño de un sistema de suspensión para un vehículo de formula student», Universidad Carlos III de Madrid, España, 2014.
- [31] A. Rodríguez, «ANÁLISIS TÉCNICO, CENTRO DE GRAVEDAD», Albrodpulf1. Accedido: 11 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/page/8/>
- [32] C. Carvajal y F. Flores, «Construcción de un monoplaza eléctrico con motores independientes», Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12920>
- [33] MAHA, «Manual de instrucciones original frenómetro de rodillos». [En línea]. Disponible en: <https://www.maha.es/es/productos/tecnologia-para-la-inspeccion-de-frenos/mbt-2000-series~t2396>
- [34] J. Benalcázar y P. Navisoy, «Eficacia de Frenado en un vehículo Peugeot Año 2003 utilizando distintos materiales en las pastillas de freno.», Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15897>
- [35] Solyman, «Máquinas de soldar». Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.solyman.com/tipos-de-maquinas-de-soldar-que-existen/>
- [36] Disoloxi, «Soldadora Mig Elite 130 MP 110/220», Disoloxi. Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.disoloxi.com/industrial/soldadora-mig-elite-130-mp-110-220.html>
- [37] HelloAuto, «¿Qué es el Cinturón de Seguridad?» Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://helloauto.com/glosario/cinturon-de-seguridad>
- [38] Amazon, «Sparco FIA Juego de Arnés de 4 Puntos 04716M1RS». Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/Sparco-Juego-arnés-puntos-FIA/dp/B07Q4CSDW1?th=1>
- [39] Autoaccesorioselchinito, «ACOPLE DE TIMON DESMONTABLE». Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://autoaccesorioselchinito.com/products/acople-de-timon-desmontable>
- [40] Frenkit, «Qué es una bomba de freno o cilindro maestro y para qué sirve». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.frenkit.es/es/que-es-una-bomba-de-freno>
- [41] Instituto de Automovilismo Deportivo, «Secretos de puesta a punto:El Skid-Pad». Accedido: 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iad.la/blogs/skid-pad-secretos-de-la-puesta-a-punto/>
- [42] A. Soriano, «Eficacia y distancia de frenado», *PublicacionesDidácticas*, pp. 341-345, 2016, Accedido: 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/235859049.pdf>
- [43] H. Cristal, «Coeficiente Adherencia Naumático», vol. 1, p. 1999, 1999.
- [44] M. Bomford y W. Torge, «Gravedad», 2001, [En línea]. Disponible en: <https://www.ign.es/web/resources/actividades/gravimetria/Conceptos.pdf>
- [45] J. Jimenez, «CFSD (geometría de ejes)», BlogSpot. Accedido: 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://javierjimenezmedima.blogspot.com/2015/05/cfsd-geometria-de-ejes.html>
- [46] K. Osorio, «Ángulos y relación de transmisión de la dirección», Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2020.
- [47] Formación Mecanizado, «Fórmulas para Fabricar Engranajes», Blogs. Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://formacionmecanizado.com/formulas-engranajes/>

- [48] L. Paspuel, «Diseño y construcción de una caja de dirección para vehículos monoplaza.», Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14478>
- [49] Compañía Levantina de Reductores, «Cálculo de engranajes: ideas esenciales en tus transmisiones mecánicas». Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://clr.es/blog/es/calculo-de-engranajes-transmisiones-mecanicas/>
- [50] EUROPER, «Ficha Técnica de Acero SAE 4140». [En línea]. Disponible en: <https://europer.cl/wp-content/uploads/2022/04/FICHA-TECNICA-SAE-4140.pdf>
- [51] Yokohama, «Yokohama Rubber introduce el neumático “GEOLANDAR A/T G015». Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.yokohama.eu/da/nyheder/?tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=1043&cHash=da9c33fae59b87c09c42c508e755ca52](https://www.yokohama.eu/da/nyheder/?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=1043&cHash=da9c33fae59b87c09c42c508e755ca52)
- [52] Unitips, «Fuerza de fricción». Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.unitips.mx/tema-examen-de-ingreso-fuerza-de-friccion>
- [53] G. Rado y D. Presa, «Análisis de las Fuerzas que Actúan en la Interface Neumático Carretera.», Semantic Scholar. Accedido: 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Análisis-de-las-Fuerzas-que-Actúan-en-la-Interface-Rado-García/e2e3651fdafede1085d3f96a377fe1ff17148be7>
- [54] N. Colado, «La Dirección». Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/09-la-direccion-136326773/136326773#4>

## ANEXOS

### Anexo I. Pruebas del Radio de Giro



### Anexo II. Pruebas de Manejo en Línea Recta



### Anexo III. Prueba de Fuerza de Frenada en Frenómetro



### Anexo IV. Prueba del SkidPad



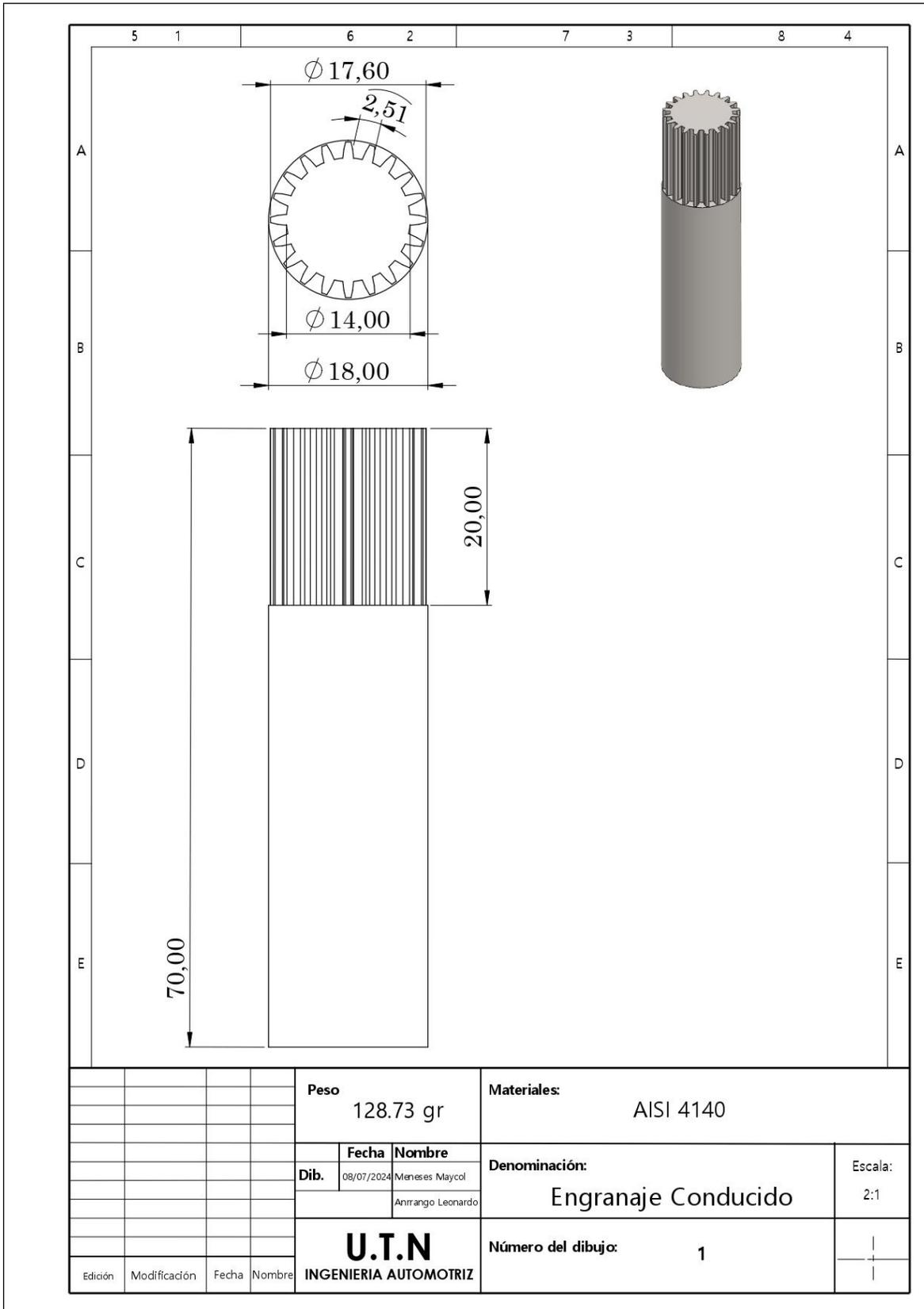
### Anexo V. Prueba de Bloqueo de las Cuatro Ruedas

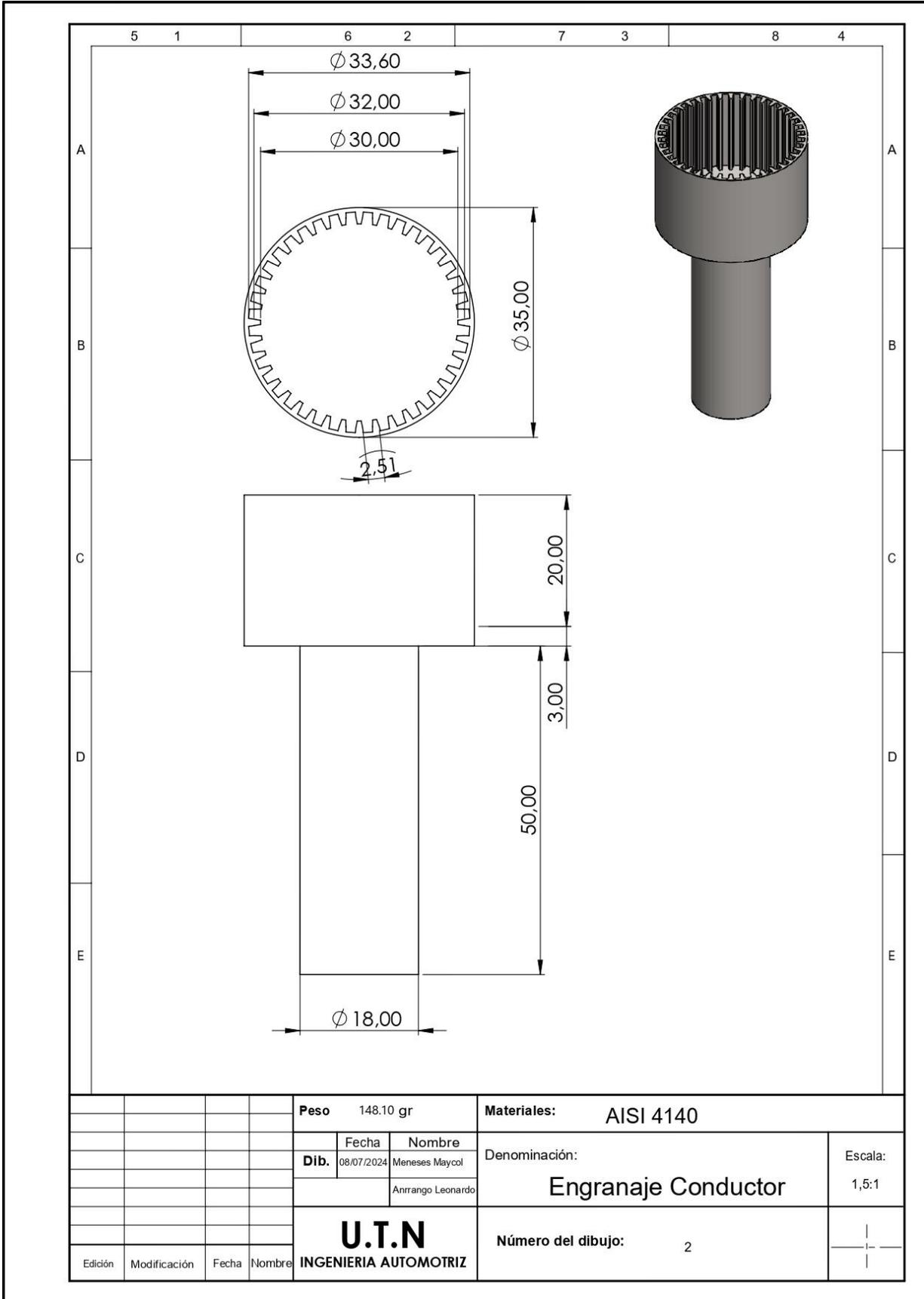


### Anexo VI. Prueba de Distancia de Frenada



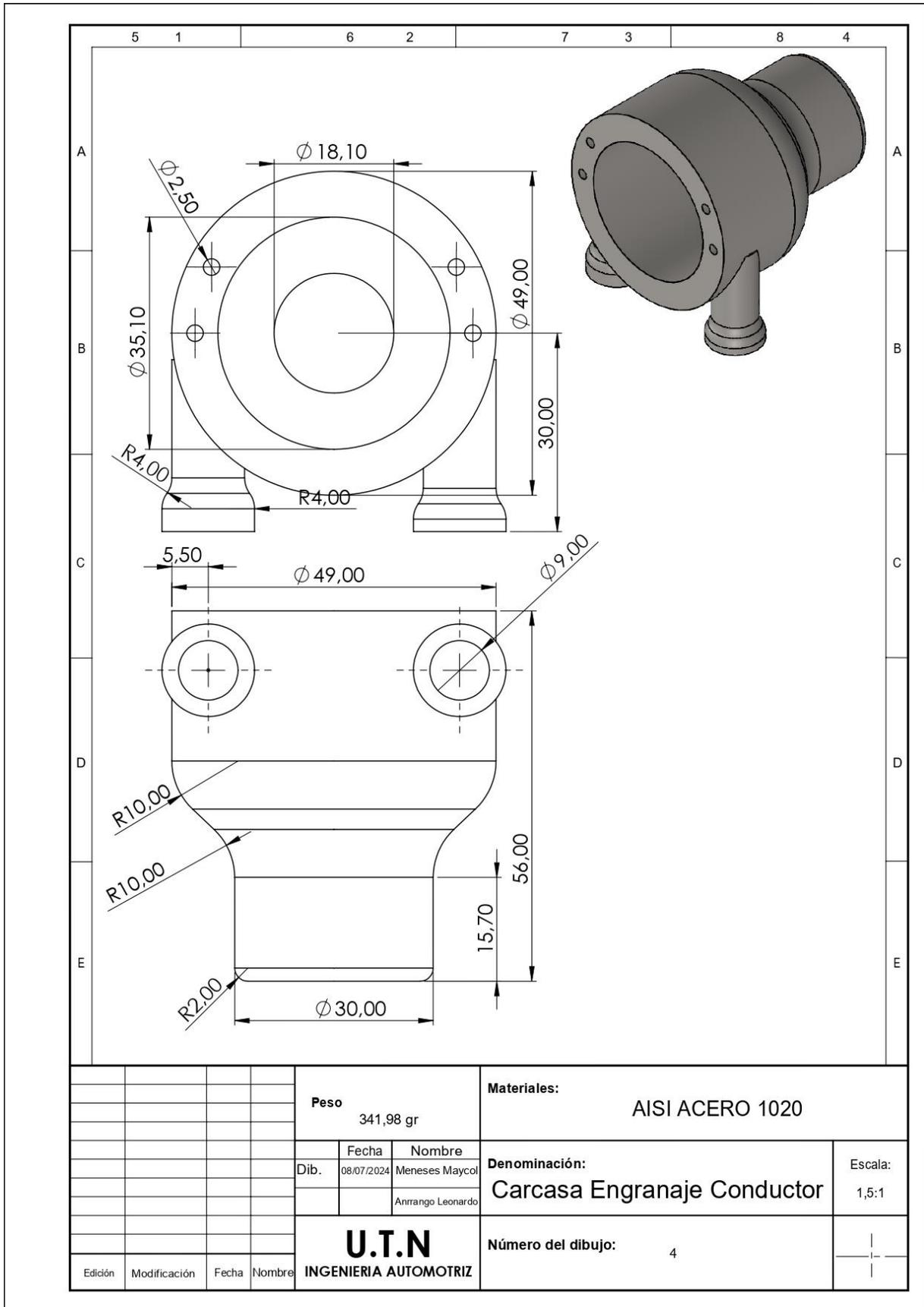
**Anexo VII. Planos del Prototipo de Reductor de Giro del Volante**





				<b>Peso</b> 148.10 gr	<b>Materiales:</b> AISI 4140					
				<b>Dib.</b> 08/07/2024	<b>Nombre</b> Menseses Maycol	<b>Denominación:</b> Engranaje Conductor	<b>Escala:</b> 1,5:1			
					Anrango Leonardo					
				<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ			<table border="1"> <tr> <td><b>Número del dibujo:</b> 2</td> <td rowspan="2"> </td> </tr> <tr> <td></td> </tr> </table>	<b>Número del dibujo:</b> 2		
<b>Número del dibujo:</b> 2										
<b>Edición</b>	<b>Modificación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>							





				<b>Peso</b> 341,98 gr		<b>Materiales:</b> AISI ACERO 1020									
				<table border="1"> <tr> <td><b>Fecha</b></td> <td><b>Nombre</b></td> </tr> <tr> <td>08/07/2024</td> <td>Meneses Maycol</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Anrrango Leonardo</td> </tr> </table>		<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	08/07/2024	Meneses Maycol		Anrrango Leonardo	<b>Denominación:</b> Carcasa Engranaje Conductor		<b>Escala:</b> 1,5:1	
<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>														
08/07/2024	Meneses Maycol														
	Anrrango Leonardo														
				<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ		<b>Número del dibujo:</b> 4									
<b>Edición</b>	<b>Modificación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>												

### Anexo VIII. Montaje del Reductor de Giro



### Anexo IX. Montaje del Kit de Volante Desmontable



### Anexo X. Montaje del Kit de Cinturones de Seguridad



### Anexo XI. Montaje de Bomba de Frenos y Cañerías nuevas e independientes



