



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

### **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PARA UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”**

**ARELLANO VILLARES JEAN CARLOS  
TADAY YUPANQUI EDISON FERNANDO**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

# **INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2016**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DE LA TESIS DE GRADO**

---

2015-05-05

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**ARELLANO VILLARES JEAN CARLOS  
TADAY YUPANQUI EDISON FERNANDO**

---

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PARA UN  
VEHÍCULO TIPO FÓRMULA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA  
AUTOMOTRIZ”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Celín Padilla Padilla  
**DIRECTOR**

---

Ing. Edwin Pozo Safla  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** ARELLANO VILLARES JEAN CARLOS

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PARA UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”

**Fecha de Examinación:** 2016-08-18

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Miguel Aquino Arroba <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Celin Padilla Padilla <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Edwin Pozo Safla <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Miguel Aquino Arroba  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** TADAY YUPANQUI EDISON FERNANDO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PARA UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”

**Fecha de Examinación:** 2016-08-18

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Miguel Aquino Arroba <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Celin Padilla Padilla <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Edwin Pozo Safla <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Miguel Aquino Arroba  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Arellano Villares Jean Carlos**

---

**Taday Yupanqui Edison Fernando**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Arellano Villares Jean Carlos, Taday Yupanqui Edison Fernando declaramos que el presente trabajo de grado es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente, están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Grado.

---

**Arellano Villares Jean Carlos**  
Cédula de Identidad: 020219504-6

---

**Taday Yupanqui Edison Fernando**  
Cédula de Identidad: 060381985-5

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre María Herculía Villares Vega, quien me dio la vida y siempre está a mi lado acompañándome y apoyándome en cada una de mis metas, a mi padre Oswaldo Guillermo Arellano, quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional, a mis hermanos quienes me apoyaron en este duro camino.

**Jean Carlos Arellano**

Esta tesis dedico principalmente a Dios por habernos permitido la vida y darnos la fortaleza para poder llegar a la meta de ser un profesional, también a mis queridos padres Jorge y Rosa que están junto a mi apoyándome, aconsejándome para poder cumplir este que no era solo mi objetivo y esfuerzo, sino también de toda mi familia, a mis queridos hermanos Jorge Washington y Ruth que me apoyaron en todo momento, dándome ánimo para seguir adelante a pesar de las adversidades, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por toda la instrucción y capacitación, y esto nos permitió adquirir una profesión para ser útil a la sociedad.

**Edison Taday Yupanqui**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Automotriz, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Para todos los docentes que nos han contribuido con sus conocimientos y sabiduría, en especial a nuestro director de tesis y asesor que supieron guiarnos de la mejor manera.

A nuestros compañeros que nos acompañaron en el transcurso de esta etapa de la vida y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito esta meta planteada en nuestras vidas.

**Jean Carlos Arellano Villares**

Agradezco, a mis padres Jorge y Rosa por ser quienes han dado lo mejor de ellos por mi bienestar y brindarme la educación, dando su entera confianza en cada meta a cumplir. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Escuela de Ingeniería Automotriz y a su personal docente que nos capacitaron tanto científica, tecnológicamente y humanitariamente, para lograr este objetivo de ser profesionales útiles a la sociedad.

**Edison Taday Yupanqui**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes .....	19
1.2 Justificación .....	21
1.3 Objetivos .....	22
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	22
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	22
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Formula Student (SAE).....	23
2.2 Diseño y fabricación de suspensiones en la industria automotriz.....	25
2.2.1 <i>Diseño en la industria automotriz</i> .....	27
2.2.2 <i>Fabricación en la industria automotriz</i> .....	29
2.3 Suspensión .....	30
2.3.1 <i>Componentes</i> .....	31
2.3.2 <i>Tipos de suspensión</i> .....	32
2.3.3 <i>Amortiguador</i> .....	34
2.4 Normativa De La Formula SAE.....	36
2.4.1 <i>Requerimientos del vehículo y restricciones</i> .....	36
2.4.2 <i>Requerimientos generales de diseño</i> .....	36
2.4.3 <i>Reglas generales del chasis</i> .....	37
2.4.4 <i>Normativa de diseño de suspensión FSAE</i> .....	38
2.4.5 <i>Wheelbase (distancia entre ejes)</i> .....	38
2.4.6 <i>Track width (ancho de vía)</i> .....	39
2.4.7 <i>Kingpin and scrub radius (kingpin radio de giro)</i> .....	40
2.4.8 <i>Caster and trail (caster)</i> .....	40
2.4.9 <i>Benchmark (puntos de referencia)</i> .....	41
2.5 Especificaciones que establece la formula SAE para la suspensión.....	41
2.5.1 <i>Front suspension design (diseño de la suspensión delantera)</i> .....	41
2.5.2 <i>Control arm pivot axis (brazos de control del eje de pivote)</i> .....	41
2.5.3 <i>Tie rod location and Ackermann geometry</i> .....	42
2.5.4 <i>Rear suspension design (diseño de la suspensión posterior)</i> .....	43

2.5.5	<i>Model building (construcción del diseño)</i> .....	43
2.5.6	<i>Front suspension modelling (modelado de la suspensión delantera)</i> .....	43
2.5.7	<i>Rear suspension modelling (modelado de la suspensión posterior)</i> .....	44
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE LA SUSPENSION</b>	
3.1	Introducción .....	45
3.2	Definición del modelo de suspensión. ....	45
3.3	Sistema de suspensión push-rod .....	46
3.3.1	<i>Bosquejos iniciales para el modelado.</i> .....	46
3.3.2	<i>Proceso de modelado en el software</i> .....	47
3.3.3	<i>Consideraciones de ubicación de la suspensión</i> .....	47
3.3.4	<i>Fases de modelación de la suspensión</i> .....	49
3.3.5	<i>Brazos de la suspensión.</i> .....	51
3.3.6	<i>Barra push</i> .....	52
3.3.7	<i>Rocker</i> .....	52
3.3.8	<i>Amortiguador y muelle</i> .....	53
3.3.9	<i>Mangueta</i> .....	53
3.3.10	<i>Rótula</i> .....	53
3.3.11	<i>Barra estabilizadora</i> .....	54
3.4	Cálculos.....	55
3.4.1	<i>Ubicación del centro de gravedad</i> .....	55
3.4.2	<i>Distancia entre ejes</i> .....	56
3.4.3	<i>Distribución de masas en el vehículo</i> .....	57
3.4.4	<i>Porcentaje de peso en los ejes delantero y posterior</i> .....	59
3.4.5	<i>Cálculo antivuelco</i> .....	60
3.4.6	<i>Cálculo del balancín</i> .....	61
3.4.7	<i>Relación de movimiento</i> .....	63
3.4.8	<i>Análisis dinámico del sistema de suspensión</i> .....	64
3.4.9	<i>Transferencia de masa longitudinal</i> .....	66
3.4.10	<i>Aceleración Lateral</i> .....	69
3.4.11	<i>Cálculo de fuerzas que actúan en un obstáculo</i> .....	70
3.5	Simulaciones de la suspensión.....	71
3.5.1	<i>Simulación de los elementos de la suspensión push-rod en Ansys</i> .....	71
3.6	Análisis de la suspensión .....	80
3.6.1	<i>Esfuerzos obtenidos</i> .....	80

3.6.2	<i>Factor de seguridad</i> .....	80
3.6.3	<i>Resultados de la simulación</i> .....	82
<b>4.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA SUSPENSION</b>	
4.1	Modelación.....	83
4.2	Dimensionamiento .....	83
4.3	Selección de materiales .....	84
4.3.1	<i>Materiales para los elementos tubulares</i> .....	84
4.3.2	<i>Materiales para los rockers y bases</i> .....	86
4.3.3	<i>Amortiguador</i> .....	87
4.4	Anclaje de la suspensión al chasis .....	89
4.5	Diagramas de proceso .....	89
4.5.1	<i>Proceso 1</i> .....	90
4.5.2	<i>Proceso 2</i> .....	91
4.5.3	<i>Proceso 3</i> .....	92
4.6	Pruebas realizadas .....	93
4.7	Análisis de resultados.....	93
4.7.1	<i>Resumen de datos obtenidos</i> .....	94
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b>	
5.1	Costos directos .....	95
5.2	Costos indirectos .....	96
5.3	Costo total .....	97
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones .....	98
6.2	Recomendaciones.....	98

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1	Ponderación FSAE ..... 25
2	Esfuerzos máximos de trabajo ..... 80
3	Factores de seguridad ..... 81
4	Características del amortiguador ..... 88
5	Construcción de los rockers..... 90
6	Construcción de los brazos de suspensión..... 91
7	Diagrama de procesos del soporte del motor..... 92
8	Resultados obtenidos ..... 93
9	Costos directos..... 95
10	Costos por utilización de equipos ..... 96
11	Costos por mano de obra ..... 96
12	Costos indirectos..... 97
13	Costo total..... 97

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

1	Suspensión Push-rod.....	20
2	Suspensión Pull-rod.....	20
3	Ángulo convergencia y divergencia .....	26
4	Ángulo de avance .....	26
5	Ángulo de caída .....	27
6	Radio de pivotamiento.....	27
7	Sistema Suspensión .....	33
8	Movimiento de expansión en el amortiguador .....	35
9	Movimiento de compresión en el amortiguador .....	35
10	Vista longitudinal de la transferencia de cargas .....	39
11	Geometría de los neumáticos.....	40
12	Brazos de control de pivote .....	42
13	Geometría Ackermann.....	42
14	Modelado de la suspensión delantera .....	44
15	Modelado de la suspensión posterior.....	44
16	Bosquejo del sistema de suspensión push-rod.....	47
17	Suspensión delantera .....	48
18	Suspensión posterior.....	48
19	Centro instantáneo delantero .....	50
20	Centro instantáneo posterior .....	50
21	Brazos de la suspensión .....	52
22	Barra Push.....	52
23	Rocker.....	52
24	Amortiguador y muelle.....	53
25	Mangueta .....	53
26	Rótula.....	54
27	Barra estabilizadora .....	54
28	Ensamble de la suspensión push-rod.....	55
29	Anclaje de la suspensión al chasis .....	55
30	Longitudes de la batalla y el centro de gravedad.....	57
31	Vehículo inclinado.....	60
32	Amortiguador.....	62
33	Balancín .....	64
34	Transferencia de masa lateral .....	65
35	Longitud al centro de masa.....	67
36	Fuerza centrífuga del vehículo .....	69
37	Obstáculo .....	70
38	Tensión de Von Mises del rocker .....	72
39	Deformación total del rocker .....	72
40	Factor de seguridad del rocker.....	73

41	Tensión de Von Mises en la mangueta.....	73
42	Deformación máxima en la mangueta.....	74
43	Factor de seguridad en la mangueta.....	74
44	Esfuerzo De Von Mises en la barra push.....	75
45	Deformación máxima en la barra push.....	75
46	Factor de seguridad en la barra push.....	76
47	Esfuerzo de Von Mises en la mesa sin anclaje.....	76
48	Deformación máxima en la mesa sin anclaje.....	77
49	Factor de seguridad en la mesa sin anclaje.....	77
50	Esfuerzo de Von Mises en la mesa con anclaje.....	78
51	Deformación máxima en la mesa con anclaje.....	78
52	Factor de seguridad en la mesa con anclaje.....	78
53	Esfuerzo de Von Mises en la barra estabilizadora.....	79
54	Deformación máxima en la barra estabilizadora.....	79
55	Factor de seguridad en la barra estabilizadora.....	80
56	Vista frontal y posterior del chasis.....	84
57	Propiedades mecánicas del acero A500.....	84
58	Brazos de suspensión.....	85
59	Cabezas de articulación.....	85
60	Suelda MIG.....	86
61	Especificaciones de la plancha de acero ASTM A 36.....	86
62	Trazado de los rockers en la plancha de acero.....	87
63	Soporte de los anclajes en el chasis.....	87
64	Amortiguador DNM performance.....	88
65	Muelle del amortiguador.....	88
66	Suspensión anclada al chasis.....	89

## SIMBOLOGÍA

h	Altura	Mm
b	Batalla	Mm
l	Distancia entre ejes	Mm
W	Peso	Kg
T	Ancho de vía	Mm
$\beta$	Inclinación máxima	Grados
MR	Relación de movimiento	Adimensional
ST	Recorrido de la suspensión	Adimensional
WT	Recorrido del Neumático	Adimensional
K	Fuerza amortiguador	N/m
- $a$	Desaceleración	$m/s^2$
t	Tiempo	S
V	Velocidad	m/s
r	Radio de giro	M

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

FSAE	Fórmula SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices)
MIG	Metal gas inerte (Metal Inert Gas)
ASTM	Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales.

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Plano del ensamble del sistema de suspensión
- B** Planos de las partes del sistema de suspensión

## RESUMEN

Esta tesis fue elaborada con el propósito de diseñar y construir un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula SAE, la cual permitirá a la ESPOCH, específicamente a la escuela de Ingeniería Automotriz, avanzar un paso más para completar el prototipo FSAE, y poder competir con su vehículo tanto a nivel nacional e internacionalmente en importantes competencias de la FSAE. Para lograr esto se hizo un estudio del reglamento de la Fórmula SAE, también se analizó los diferentes sistemas de suspensión y su comportamiento, lo cual permitió mayor seguridad, confiabilidad, fácil mantenimiento, confort y ergonomía, esto nos dio la pauta para elegir el sistema de suspensión adecuado para el prototipo. Al tener en cuenta todos los aspectos que debe cumplir la suspensión se procedió a diseñar la misma, para ello se utilizó un software de elementos finitos, este software nos permite elegir el material adecuado, realizar cálculos de esfuerzos con las diferentes cargas a las cuales está sometido el prototipo, esto va permitir tener una suspensión confiable y segura. Posteriormente se procedió a obtener los materiales y elementos para la construcción de la suspensión de acuerdo con el diseño, luego continuamos con los procedimientos adecuados para la construcción y el anclaje de la suspensión al chasis, se procedió a verificar su correcto funcionamiento y confiabilidad que se basa en el diseño. Al final de la investigación se determinó que todos los elementos resistirán a todos los esfuerzos ocasionados en el funcionamiento del prototipo en la pista para lo cual recomendamos realizar los análisis correspondientes en casos críticos para una mejor confiabilidad.

PALABRAS CLAVE: <SISTEMA DE SUSPENSIÓN>, <SOCIEDAD DE INGENIEROS AUTOMOTRICES (SAE)>, <FORMULA SOCIEDAD DE INGENIEROS AUTOMOTRICES (FSAE)>, <PULL-ROD>, <CAMBER>, <SOLIDWORKS (SOFTWARE)>, <SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS>, <CASTER>

## **ABSTRACT**

This thesis was elaborated with the aim to design and build a suspension system for a vehicle type formula SAE, which will allow ESPOCH, specifically to the School of Automotive Engineering, to go forward completing the prototype FSAE. To reach this was made a regulation study of the SAE formula, also the different suspension systems and their behavior, which allowed a bigger safety, reliability, easy maintenance, comfort, and ergonomics. This provides the guidelines to elect the adequate suspension system for the prototype. Keeping in mind all the aspects that must accomplish to design the same, for this was used finite element software, which permitted electing the adequate material to make effort calculus with the different charges, which the prototype is subjected to. This will allow having a reliability and safe suspension. Afterwards, the procedure to obtain the materials and elements for the construction of the suspension, according to the design, then with the adequate procedure for the construction and the assembling from the suspension to the chassis, its correct functioning and reliability are based on the design. At the end of the investigation was determined that all the elements will resist to all the efforts caused in the functioning of the prototype in the track for which is recommended to make the corresponding analysis in critical cases for a better reliability.

**KEY WORDS:** <SUSPENSION SYSTEM>, <SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE)>, <FORMULA SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (FSAE)>, <PULL-ROD>, <CAMBER>, <SOLID WORKS (SOFTWARE)>, <FINITE ELEMENTS SOFTWARE>, <CASTER>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

El automóvil ha sido uno de los principales inventos creados por el hombre, unos de los principales sistemas para que un vehículo sea cómodo y a la vez estable es el sistema de suspensión.

Esta tesis se centra en la conexión entre la llanta y el cuerpo de auto por medio del sistema de suspensión para que nos permita tener un elevado nivel de control en cualquier tipo de aceleraciones y fuerzas generadas durante los diferentes movimientos a los cuales en vehículo está sometido durante la competencia.

Para lograr que el auto tenga un funcionamiento adecuado se consideró varios aspectos; los cuales se van detallando en el desarrollo de esta tesis e irán plasmados en este documento para saber los parámetros más importantes a considerar para la elaboración de este sistema de suspensión y los efectos generados de dichos parámetros.

Mediante el siguiente proyecto de investigación se establecerá documentación referente a vehículos para competencias FSAE, dentro de las cuales se pueden continuar innovando y desarrollando nuevos y diferentes sistemas de automoción con el propósito de desarrollar y despertar el instinto investigativo dentro de nuestro país. Como referente a los desarrollos tecnológicos que se han generado hasta la actualidad se han desempeñado mecanismos y sistemas muy acordes a las necesidades requeridas y mediante este nuevo sistema de suspensión se establecen parámetros más altos de calidad de acuerdo a los estudios realizados.

### 1.1 Antecedentes

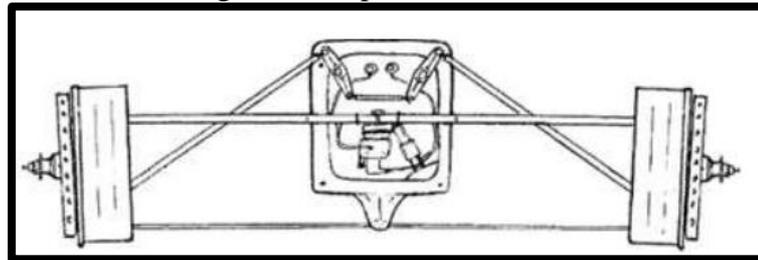
Dentro del mundo automovilístico se han generado diferentes avances desde mecanismos únicamente manuales, hasta la avanzada tecnología de suspensiones electro neumático, desarrollado para prototipos de vehículos.

Referente a FSAE, vale recalcar que existen dos tipos de suspensiones que son

utilizadas en países como Brasil, Italia, Japón, Alemania, Inglaterra, Estados Unidos etc., las cuales son:

- Push-rod es una suspensión independiente consta principalmente de los 2 triángulos de suspensión, una barra diagonal que trabaja a compresión y que empuja a su vez un balancín que acciona el conjunto muelle-amortiguador.

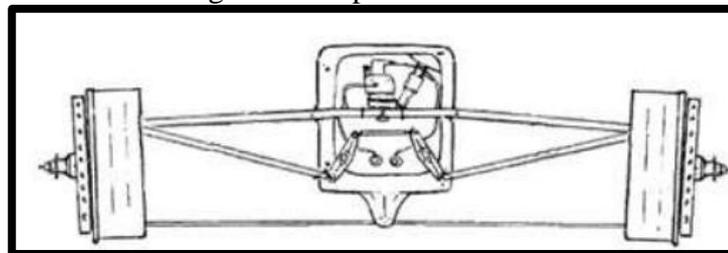
Figura 1. Suspensión Push-rod



Fuente: (Córdova, 2012)

- Pull-rod, consta también de dos triángulos pero el tirante en donde el diagonal está colocado al revés, uniendo el amortiguador con el balancín y moviendo el conjunto a tracción en vez de a compresión (Suspensiones en F1. Objetivo y partes., 2011).

Figura 2. Suspensión Pull-rod



Fuente: (Córdova, 2012)

En nuestro país existen universidades creando autos de competencia con la colaboración de estudiantes y docentes siendo la Escuela Politécnica del Ejército y la Universidad Politécnica Salesiana representantes de Ecuador en la Fórmula SAE las mismas que participaron en. Hokenjai y Silverston Estas universidades diseñan las suspensiones de sus autos en base a las dos suspensiones ya mencionadas la Pull-rod y la Push-rod para las competencias.

Esto ha hecho que la ESPOCH conjuntamente con la Escuela de Ingeniería Automotriz se enfoque a la construcción de un prototipo tipo Fórmula para poder ser partícipes de tan prestigiosa competición, para lo cual el diseño de nuestra suspensión se basará en el análisis de las dos suspensiones ya mencionadas y en el diseño de las otras partes del prototipo para realizar una suspensión óptima para competencias y su funcionamiento sea el máximo en conjunto con el prototipo.

## **1.2 Justificación**

Tomando en cuenta que la FSAE promueve la excelencia en el diseño, desarrollo y manufactura de autos a nivel mundial, esta competencia constituye para la ESPOCH un referente de la excelencia académica que brinda a sus estudiantes, y le permite formar parte del sistema motivador para ingenieros mecánicos de la sociedad automotriz y académica. Nuestra escuela de Ingeniería Automotriz respecto a este proyecto de tesis ha visto la necesidad de contar con un equipo para incursionar y realizar la mejora continua de un Fórmula SAE.

Esta tesis se centra en diseñar y construir una suspensión óptima para competencia por medio de programas de computación y con la aplicación del método de elementos finitos, para que permitan determinar los esfuerzos que soporta la suspensión de un vehículo de competencia en cada una de sus partes, y así para obtener resultados realistas para direccionar a la práctica.

En la realización de este proyecto de tesis que corresponde al diseño y construcción de una suspensión del prototipo Fórmula SAE se debe considerar parámetros principales de diseño y construcción que se toman en cuenta para los diferentes tipos de carreras, la cual se conforma de un conjunto de conocimientos, habilidades, capacidades, destrezas y aptitudes, las mismas que aportan a la mejora de nuestra vida profesional.

Por lo tanto es muy importante aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, que nos ayudarán a ser competitivos, aportando de esta manera a la ESPOCH y a la sociedad con información y tecnología, promoviendo un mercado tanto en publicidad, turismo, espacios de distracción al alcance de todos, puesto que todos los materiales requeridos en este proyecto los encontramos en el mercado nacional,

fomentando así el desarrollo de la provincia y del País referente al tema de automovilismo.

### **1.3       Objetivos**

**1.3.1       Objetivo general.** Diseñar y construir un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz.

**1.3.2       Objetivos específicos:**

- Determinar los puntos más vulnerables en el diseño de una suspensión automotriz, que se limite bajo regímenes y normas establecidas en el reglamento FSAE.
- Diseñar una suspensión óptima utilizando software de simulación proporcionando un eficiente funcionamiento del vehículo.
- Analizar la suspensión propuesta para diferentes valores de carga tanto estáticas y dinámicas, para un correcto desenvolvimiento aplicativo al momento de su implementación en el prototipo FSAE.
- Determinar mediante el software los materiales más óptimos para ser seleccionados y montados sobre el diseño establecido.
- Construir la suspensión utilizando materiales y procedimientos adecuados para que garanticen un correcto desempeño del monoplaza dentro de una pista.
- Analizar y verificar el correcto funcionamiento de la suspensión mediante pruebas en pistas, asegurando la fiabilidad del prototipo.
- Implementar de una manera eficiente y adecuada para realizar la operación del prototipo para FSAE.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Formula Student (SAE)

Formula Student (SAE) es una programación competitiva de talento humano diseñados por estudiantes afines al tema desarrollada por Society of Automotive Engineers, como sus siglas (SAE) lo señalan. Este programa consiste en un concurso entre Universidades y/o Institutos educativos que cumplan con previos requisitos para enlistarse; dentro de los cuales se pueden evidenciar dentro de las reglas elaboradas y publicadas por SAE Intenational. El primer concurso llamado “Mini Baja” o “Mini Indy” comenzó en el año 1978, organizado por Mark Marshek, y la Universidad Houston (Texas) en contacto con el Departamento de Relaciones Educativas SAE; dentro de la cual se buscada poner en competencia el intelecto humano reflejado en los vehículos a competir, al concluir este evento varios espectadores al observar el potencial de éste concurso, deciden en conjunto con sus organizadores, implementar nuevas reglas y omitir tantas restricciones para desarrollar un programa de mayor exigencias para poder implementar nuevos sistemas y tecnologías dentro del área automotriz (SAE, 2014).

En conjunto el Dr. Mathews con el Departamento de Relaciones Educativas, desarrollaron el próximo concurso con las variantes analizadas, pero para poder darle el enfoque que buscaban deciden modificar su nombre para relacionar con las pretensiones que se tenía; dentro de la cual la llamaron Fórmula SAE. Este programa se basa en el desarrollo de un vehículo prototipo a desarrollarse por un equipo de estudiantes, para superar las prestaciones de los vehículos existentes, para garantizar las operaciones del evento y promover la resolución de problemas de una manera eficaz e inteligente.

Los voluntarios para los jueces de diseño incluyen algunos ingenieros y consultores más importantes de la industria de carreras, incluyendo el fallecido Carroll Smith, Bill Mitchell, Doug Milliken, Claude Rouelle, Jack Auld, y Bryan Kubala. (SAE, 2014)

Formula SAE promueve carreras y la excelencia en ingeniería, ya que abarca todos los aspectos de la industria del automóvil, incluyendo la investigación, diseño, fabricación, pruebas, desarrollo, comercialización, administración y finanzas; así como también conlleva a poner en práctica los conocimientos adquiridos teóricamente de los estudiantes dentro de un salón de clase para llevar a formar parte de experiencias reales de trabajo. Dentro de las categorías que existen patentadas por Formula SAE, existen:

- Fórmula SAE Australasia
- Fórmula SAE Brasil
- Fórmula SAE Italia
- Formula Student (Reino Unido)
- Formula Student Austria
- Formula Student Alemania
- Fórmula SAE Japón

Así pues se desarrolla en conjunto innovaciones automotrices, como se evidencia el trabajo realizado por La universidad de Dartmouth ( asociado con SAE International ), la cual creó el combustible alternativo direccionado para el evento Fórmula híbrido utilizando Fórmula SAE con plantas de energía híbrido de gasolina y electricidad . (SAE, 2014)

Dentro de un ámbito general, aunque con variantes para cada año los valores o calificaciones ponderadas están establecidas de la siguiente manera:

Tabla 1. Ponderación FSAE

<b>Parámetro a evaluar:</b>	<b>Ponderación:</b>
Diseño	150
Análisis de costo y producción	100
Presentación	75
Aceleración	75
Skidpad	50
Autocross	150
Economía combustible	100
Resistencia al evento	300
Total puntos:	1000

Fuente: Autores

Además, otra de las ventajas que tiene este evento es que cada equipo tiene patrocinadores, los cuales ofrecen premios por logros.

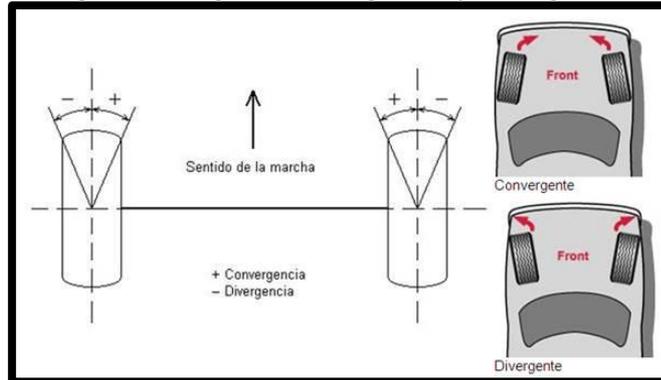
En la actualidad se creó la Formula Hybrid, que fue inaugurado en el 2007. Es similar a la Fórmula SAE, excepto todos los coches deben tener plantas de energía híbrido de gasolina y electricidad. La competencia se lleva a cabo en el New Hampshire International Speedway.

## **2.2 Diseño y fabricación de suspensiones en la industria automotriz.**

Para comprender e introducir al tema de diseño, hay que entender con mayor detalle los diferentes sistemas que existen de suspensión automotriz para establecer parámetros de influencia en el diseño automotriz, se hace necesaria una definición detallada de las variables que definen el comportamiento de una suspensión; dentro de lo que se enfoca a sus funciones los ángulos de movilidad bajo los que está dispuesto este tipo de sistema, tales como son:

- **Ángulo de convergencia y ángulo de divergencia:** Es el ángulo definido entre cada una de las ruedas y el eje longitudinal del vehículo, siempre en su proyección horizontal. (Learning, 2002)

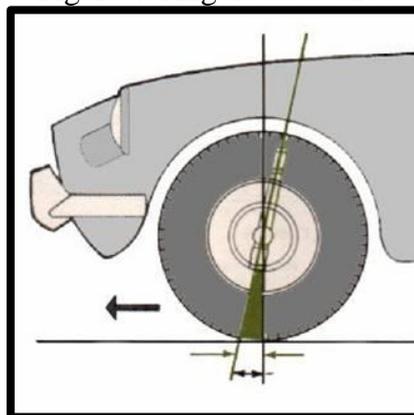
Figura 3. Ángulo convergencia y divergencia



Fuente: (Aguilar, 2015)

- Ángulo de avance: Es el que provoca la auto alineación de las ruedas, dotando al vehículo de un elevado grado de estabilidad.

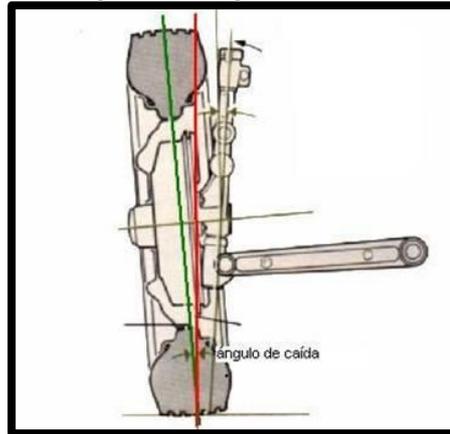
Figura 4. Ángulo de avance



Fuente: (Aguilar, 2015)

- Ángulo de caída: Es un ángulo que queda definido entre el plano de una rueda y la vertical al suelo. En la figura podemos ver que la caída es positiva pues la parte más alta de la rueda sobresale más que cualquier otra parte del neumático. También existe la caída negativa cuando la parte de contacto con el suelo sobresale más que cualquier otra parte del neumático. Este segundo caso suele darse en coches de gran potencia o de competición. (Learning, 2002)

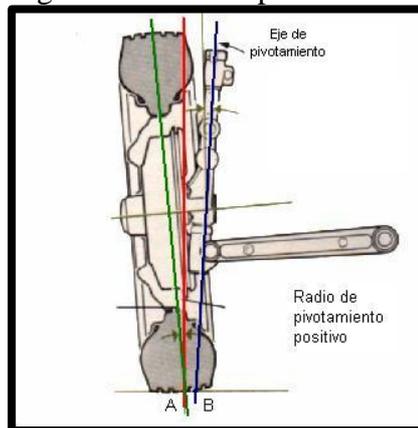
Figura 5. Ángulo de caída



Fuente: (Aguilar, 2015)

- Radio de pivotamiento: Conocido como la distancia lateral entre el punto donde corta la prolongación del eje de pivotamiento al suelo y el punto central del dibujo del neumático. Si el eje de pivotamiento corta el suelo en la parte interior del dibujo de rodadura del neumático se dice que el radio de pivotamiento es positivo. Si por el contrario, el eje de pivotamiento cruza la vertical del neumático y el corte con el plano del suelo se produce más allá de la banda de rodadura del neumático decimos que el radio de pivotamiento es negativo. (QUISPE, 2013)

Figura 6. Radio de pivotamiento



Fuente: (Aguilar, 2015)

**2.2.1** *Diseño en la industria automotriz.* Para desarrollar el diseño de un tipo de suspensión cualquiera para implementarse dentro de un vehículo o prototipo automotriz se debe tomar muy en cuenta los siguientes aspectos:

- Geometría del vehículo.
- Cargas a establecer dentro y fuera del vehículo.
- Funcionalidad de la suspensión de acuerdo al trabajo para el cual es propuesto el vehículo.
- Necesidades a satisfacer.
- Entorno de aplicación (Pista y clima).
- Procesos de fabricación.
- Materiales a utilizar para la fabricación.
- Ensayos no destructivos.
- Condiciones a ser sometido.

El proceso de diseño y construcción de una suspensión automotriz, debe tomar en cuenta el siguiente algoritmo:

- Seleccionar objetivos de nivel del vehículo apropiados
- Seleccionar una geometría del sistema
- Elegir la ubicación de los "puntos duros", los centros teóricos de cada junta de rótula o buje
- Seleccionar la tasa de bujes
- Analizar las cargas en la suspensión
- Seleccionar las tasas de muelle de acuerdo al diseño
- Seleccionar los amortiguadores según las características
- Diseñar la estructura de cada componente para que sea fuerte, rígido, ligero y barato

- Analizar la dinámica del vehículo con el diseño resultante

Una vez que la geometría básica está establecida, no se pasan a estimar las cargas en cada parte de la suspensión y el tren delantero. Esto puede ser tan simple como decidir qué máximo probable de carga existe en la superficie de contacto con el suelo y entonces dibujar un diagrama de cuerpo libre de cada parte para analizar las fuerzas, o tan difícil como simular el comportamiento de la suspensión sobre una carretera desigual, y calcular las cargas originadas. (Jonathan Noble, 2004)

Se debe tomar muy en cuenta que un sistema de suspensión de lo diseña mediante bocetos, con una previa investigación de la funcionalidad y los objetivos a satisfacer dentro de la operación del vehículo, para lo cual una vez establecido la geometría; procede con la geometría y ubicación dentro del diseño del vehículo para lograr garantizar la correcta funcionalidad de la misa. El siguiente paso el realizar los cálculos pertinentes que en este caso dentro de la actualidad la tecnología ha ido avanzando rápidamente y se tiene una gran facilidad para lograr generar datos necesarios mediante diferentes softwares a escoger en el mercado. Con la simulación se evidencia la viabilidad y factibilidad del proyecto ya que estos softwares arrojan los valores necesarios, así como también permiten visualizar el comportamiento del mismo, bajo las diferentes condiciones de carga. (CEAC, 2005)

**2.2.2** *Fabricación en la industria automotriz.* Para la fabricación de un sistema de suspensión se debe realizar un estudio particular de cada elemento: ya que no se puede lograr una generalización de todo el sistema, para lo cual se realiza recopilación de información particular para cada elemento. El corazón de una suspensión es el amortiguador, para lo cual se tiene claro que debe ser de un material resistente a las diferentes condiciones climatológicas que enfrentara dicho elemento al operar en el vehículo. Para darle mayor resistencia la cobertura del amortiguador debe tener una aleación de carbono para hacer un material resistente al impacto; especialmente las orejas de conexión a los puntos fijos del bastidor propuesto, así como también se realiza un proceso de pintura para evitar la oxidación prematura.

El resorte debido a la flexibilidad que debe tener de acuerdo a las condiciones y necesidades el proceso de fabricación varia, priorizando la elasticidad del mismo para lo

cual se buscan materiales no rígidos. Sus elementos de acople sin importar su diseño deben ser materiales rígidos para permitir el desplazamiento del amortiguador en una trayectoria concreta establecida, con un previo análisis para evitar movimiento en los neumáticos y de esta manera garantizar la adherencia del neumático al piso. (CEAC, 2005)

### **2.3 Suspensión**

Una preocupación para el diseño y producción de vehículos ha sido tratar de hacer más cómodos para sus usuarios. Debido que tenemos una variedad de rutas y caminos tanto en vías urbanas como rurales; el vehículo no siempre se encuentra enfocado para una sola condición de movilización, y se evidencia en su gran mayoría inconformidad en los usuarios al transitar en un camino lleno de irregularidades (adoquinado, empedrado, etc) debido que se encuentra en constante accionamiento el sistema de la suspensión, deteriorando rápidamente el mecanismo al provocar esfuerzos constantes en el sistema.

Se han realizado varios enfoques para reducir impactos, acolchando los asientos o implementando resortes para amortiguar las vibraciones, pero el problema aún no se resolvía hasta que se propuso la idea de colgar la cabina del carruaje, con unas correas de cuero, desde unos soportes de metal acerado que venían de los ejes, de modo que aquella quedaba suspendida por un conjunto de cuatro soportes y correas (un conjunto por cada neumático). De aquí nace el concepto de suspensión, de acuerdo a la evolución de un sistema elástico con el fin de reducir oscilaciones y desarrollar confort a sus usuarios.

En la medida en que las suspensiones evolucionaron y fueron haciéndose más eficientes, las ruedas disminuyeron su tamaño. Debido que las ruedas de gran diámetro reducían el efecto de las irregularidades del camino; las ruedas pequeñas las registran con mayor intensidad debido a que entran en los hoyos en mayor proporción. (Delmar, 1998)

Una suspensión convencional cuenta básicamente con dos elementos: un resorte (o muelle) y un amortiguador; dentro del cual se define al resorte con la función principal de absorber las irregularidades del camino para que no se transmitan a la carrocería, y a

su vez el amortiguador, tiene la función de controlar las oscilaciones de la carrocería, para reducir los constantes movimientos por flexión. Mediante la interacción de estos elementos principalmente se ha desarrollado constantes innovaciones en la suspensión automotriz, con el fin de reducir las oscilaciones de la carrocería y garantizar la adherencia constante de los neumáticos a la pista, permitiendo un mejor desempeño del motor y del vehículo en general.

**2.3.1 Componentes.** El sistema de suspensión está compuesto por un conjunto de elementos flexibles (muelle o resorte, barra de torsión, muelle y amortiguador), el cual debe neutralizar las oscilaciones de carga ocasionadas por el elemento flexible al adaptarse a las irregularidades del terreno.

Estos elementos, tienen excelentes propiedades elásticas con la desventaja de una baja capacidad de absorción de energía mecánica, por lo que no pueden ser aplicados particularmente en la suspensión; necesitan de un elemento que frene las oscilaciones producidas en su deformación. Por tal motivo los resortes se proponen siempre con un amortiguador de doble efecto que estabilice tanto su compresión como expansión. (Alonso, 2007)

- Resortes o muelles. - Consisten en un enrollamiento helicoidal de acero elástico formado con hilo de diámetro variable, en función de la carga que se aplicará y realizando en sus asientos hilos planos para facilitar el soporte y acople a las bases
- Ballestas. - Es un sistema de amortiguación empleado especialmente por vehículos sometidos a carga. Se podría resumir su función como un diseño deformable para cada hoja con el efecto de reducir vibraciones y evitar un movimiento aleatorio.
- Barras estabilizadoras.- Consiste en una barra de acero elástico o aleaciones cuyos extremos se fijan a los soportes o bases de la suspensión; logrando que se contrapongan los movimientos de un neumático en relación al otro, y así lograr que el vehículo tenga un mejor agarre al momento de presenciar una fuerza centrífuga en el vehículo como por ejemplo una curva a gran velocidad. (Pablo Luque, 2007)

- Rótulas. - Elemento fijación de la suspensión y dirección, permitiendo un giro y manteniendo la geometría de las ruedas.
- Manguetas. - Es una pieza fabricada con acero o aleaciones que unen el buje del neumático y los elementos axiales. El diseño de la mangueta depende específicamente de la geometría y diseño del vehículo.
- Bujes. - Es una pieza o elemento de una máquina donde se apoya y gira un eje, logrando mejorar las características generales de la máquina y evitar ruido y oscilaciones.
- Trapecios de suspensión. - Son articulaciones fabricadas y elaboradas en fundición de acero para garantizar el soporte de la carrocería. Unen la mangueta y su buje mediante elementos elásticos y elementos de guiado al vehículo soportando los esfuerzos generados por éste. (Pablo Luque, 2007)

**2.3.2** *Tipos de suspensión.* Actualmente los vehículos turismo utilizan variedad de diseños referentes a suspensión de acuerdo a las necesidades o al enfoque para el cual fue diseñado el vehículo.

Generalmente se distinguen por dos conceptos, las cuales son suspensiones de eje rígido y suspensiones independientes; por medio de las cuales se diferencian debido que la suspensión independiente posee un sistema para cada neumático sin afectar al funcionamiento del otro neumático, por el contrario la suspensión de eje rígido lo que sucede en un neumático se transmite directamente al otro neumático, funcionando simultáneamente; es decir, un sistema común para los neumáticos de un mismo eje. (Martín, 1997)

- Eje delantero. - En la mayoría de vehículos turismos el eje delantero es independiente, desde hace varios años debido que permite una mayor adherencia de los neumáticos con el suelo al moverse. La suspensión más utilizada en el eje delantero es la de tipo MacPherson y sus variantes modernas basadas en ella. Así mismo en los vehículos de alta gama se emplea la suspensión de doble trapecio, costosa de construcción y con una serie de ventajas haciendo referencia a la estabilidad; antiguamente era la única que se conocía.

- Eje posterior. - Posee una variedad de diseños debido que los neumáticos suelen tener una dirección fija. Estos tipos de suspensión, en principio, no tienen buen comportamiento como las independientes, pero su buen compromiso entre costo y comportamiento hace que sean ampliamente utilizadas (Erjavec, 2010).

Figura 7. Sistema Suspensión



Fuente: (Tauro tecnología automotriz, 2016)

Las soluciones empleadas en los ejes delantero y trasero suelen ser diferentes debido a que sólo las ruedas delanteras tienen direccionalidad. También depende de si la transmisión se realiza a las ruedas delanteras, traseras o a las cuatro ruedas. La ausencia de direccionalidad en las ruedas traseras, además de que normalmente no intervienen en la transmisión, hace que las soluciones empleadas en el eje trasero puedan ser más sencillas que las del delantero.

Los primeros vehículos fueron diseñados para transmisión a las ruedas traseras, y el eje consistía en una unión rígida entre neumáticos. Antiguamente empleaban ballestas para amortiguar el movimiento del eje, un sistema sencillo y robusto que actualmente se usa en los vehículos industriales y todo terreno por su robustez, y capacidad de carga. (Erjavec, 2010)

Por el contrario, la tracción delantera presenta una gran cantidad de variantes y soluciones con relación al eje trasero. La solución más sencilla y evidente es mantener un eje rígido, pero sin soportar la suspensión. En algunos casos el muelle no es el típico helicoidal o espiral, sino por barras de torsión, sistema aún más sencillo y económico, que además deja mucho espacio de carga.

En los vehículos modernos de gama media y alta se montan suspensiones totalmente independientes. Una de las soluciones más sencillas de las de este tipo, muy utilizada

todavía en la actualidad, aunque con pequeñas variaciones según el diseño, es la de tipo MacPherson. Este tipo de suspensión es mucho más efectiva que las anteriormente mencionadas porque el movimiento de una rueda no afecta a las demás. Sin embargo, la suspensión MacPherson tiene el inconveniente de que no mantiene exactamente la geometría en todo el momento porque describe un movimiento ligeramente circular. (CEAC, 2005)

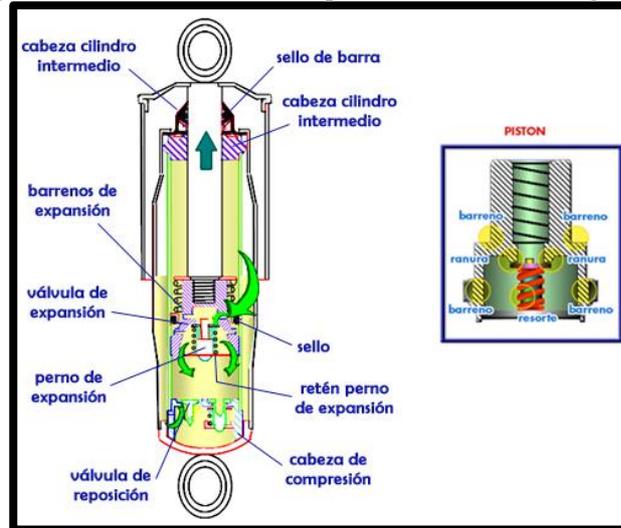
**2.3.3 Amortiguador.** Un amortiguador es un dispositivo que se encarga de absorber energía, golpes e impactos, por lo tanto, se utiliza para disminuir las oscilaciones de un movimiento periódico. Los amortiguadores son un elemento esencial en la seguridad vehicular, el cual conforma parte esencial del sistema de suspensión en general; ya que a pesar de los avances tecnológicos en la actualidad el amortiguador sigue siendo un componente esencial en el conjunto de la suspensión; debido que es el encargo de evitar las constantes oscilaciones de la carrocería y permite mayor confort para los usuarios.

**2.3.3.1 Funcionamiento.** El funcionamiento del amortiguador se basa en la circulación de aceite entre los dispositivos internos a través de un conjunto de válvulas que generan una resistencia al paso del mismo entre las cámaras del amortiguador. De esta forma se controlan las oscilaciones de la suspensión.

El amortiguador durante su operación genera dos movimientos, los cuales son de compresión y expansión; detalladamente se estudiará cada uno de los movimientos con precisión:

- **Expansión.** - Este movimiento se produce con el desplazamiento del pistón, siempre y cuando el aceite se encuentre en la parte superior del amortiguador para reducir el movimiento y reducir las vibraciones del mismo. El aceite pasara de la cámara superior a la cámara inferior, siempre y cuando los conductos y válvulas internas del amortiguador controlan el paso; sin ser un desplazamiento ni lento ni brusco para estabilizar el comportamiento y lograr el confort en el vehículo. (Remling, 1978)

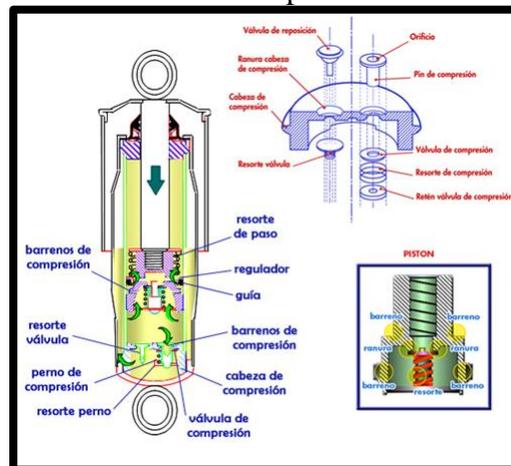
Figura 8. Movimiento de expansión en el amortiguador



Fuente: (Gabriel amortiguadores y struts, 2016)

- Compresión. -En este movimiento el pistón baja y esto se logra siempre y cuando el aceite que se encuentra en la cámara inferior del amortiguador fluye por los conductos y válvulas, hacia la cámara superior para lograr el desplazamiento del sistema.

Figura 9. Movimiento de compresión en el amortiguador



Fuente: (Gabriel amortiguadores y struts, 2016)

En general los amortiguadores son utilizados en los automóviles para poder ayudar a que los neumáticos se mantengan adheridos al suelo. En este caso, los amortiguadores se encargan de frenar las oscilaciones que provoca el brusco descendimiento en un desnivel que provoca que el vehículo rebote levemente, evitando así que la suspensión neumática se pueda dañar. (Pablo Luque, 2007)

## **2.4 Normativa De La Formula SAE**

Debido a las exigencias que se establecen en un concurso, y más aún para este tipo de competición; se establece un reglamento a cumplir por cada uno de los equipos que ingresan a la inscripción de cada periodo.

### **2.4.1 *Requerimientos del vehículo y restricciones***

- T1.2.2 Las modificaciones permitidas por el inspector una vez homologado el vehículo son:
  - Ajuste de la suspensión donde no se requiera la sustitución de una parte (excepto los resortes, barras estabilizadoras y espaciadores podrían ser cambiados).
  - Ajuste de la presión del neumático.
  - El cambio de los aros y neumáticos en condiciones de mojado a seco es permitido en la parte D de las reglas FSAE – Reglamento de los eventos dinámicos.
- T1.2.3 El vehículo debe mantener las especificaciones requeridas, por ejemplo: altura de manejo, recorrido de la suspensión, capacidad de frenado (material de la pastilla/composición), nivel de sonido y ubicación del alerón a través de toda la competencia.
- T1.2.4 Una vez que el vehículo está aprobado para la competencia, cualquier daño en el vehículo que requiera una reparación, por ejemplo, daños por choques, eléctricos o daños mecánicos, se anulará la aprobación de la inspección, al finalizar la reparación y para volver a entrar en una competencia dinámica el vehículo debe volver a presentarse a la inspección técnica.

### **2.4.2 *Requerimientos generales de diseño***

- T2.3 Distancia entre ejes. - El vehículo debe tener una distancia entre ejes de al menos 1525 mm (60 pulgadas). La distancia entre ejes se mide desde el centro de

contacto con el suelo de las ruedas delanteras y traseras con las ruedas derechas.

### 2.4.3 *Reglas generales del chasis*

- T6.1.1 El vehículo debe estar equipado con un sistema de suspensión totalmente operativo con amortiguadores delanteros y posteriores, con un recorrido de la rueda utilizable de al menos 50.8 mm (2 pulgadas), 25.4 mm (1 pulgada) de bote y 25.4 mm (1 pulgada) de rebote, con el conductor sentado. Los jueces se reservan el derecho de descalificar a los vehículos que no posean un sistema de suspensión operacional o demuestren inadecuada maniobrabilidad para un circuito de auto Cross.
- T6.1.2 Todos los puntos de anclaje de los elementos de la suspensión deben ser visibles para la inspección técnica, ya sea por apreciación directa o mediante el retiro de cubiertas.
  - Los 180 grados de las ruedas / neumáticos deben estar sin obstrucciones cuando se ve 68.6mm (2,7 pulgadas) por encima del plano formado por las copas de los neumáticos delanteros y traseros.
  - Las ruedas/neumáticos deben estar sin obstrucciones en vista lateral.
- T6.2 Distancia al suelo. - La distancia al suelo debe ser suficiente para prevenir que cualquier parte del vehículo, aparte de los neumáticos, entre en contacto con el piso durante los eventos en pista. Intencional o excesivo contacto con el piso de cualquier parte del vehículo a parte de los neumáticos recaerá en la pérdida de una carrera o un evento dinámico completo.
- T6.3 Ruedas. - Las ruedas del vehículo deben tener un diámetro de al menos 203.2 mm (8 pulgadas) o más.
- T6.4 Neumáticos. - Los vehículos deben tener dos tipos de neumáticos de la siguiente manera.
  - Neumáticos secos: los neumáticos del vehículo cuando este es presentado a la inspección técnica se definen como “neumáticos secos”. Los neumáticos secos

pueden ser de cualquier tamaño o tipo. Pueden ser slicks o ranurado.

- Neumáticos de lluvia: los neumáticos de lluvia pueden ser de cualquier tamaño o tipo de labrado o ranurado.
- T6.7.1 El ancho de vía y el centro de gravedad del vehículo se deben combinar para proveer una estabilidad de vuelco adecuada.
- T6.7.2 La estabilidad de vuelco será evaluada en la tabla basculante usando una prueba de pasa/no pasa. El vehículo no debería volcarse a un ángulo de inclinación de sesenta grados ( $60^\circ$ ) respecto a la horizontal, lo cual corresponde a 1.7 G's. La prueba de inclinación se llevará a cabo con el conductor más alto en posición de conducción normal.
- T11.2.4 Las rótulas ajustables deben tener una contratuerca para evitar que se aflojen.

Esta es la parte del reglamento que debe ser considerada para realizar el diseño del sistema de suspensión del vehículo monoplaza, con la finalidad de aprobar el escrutinio y la seguridad de las pruebas estáticas.

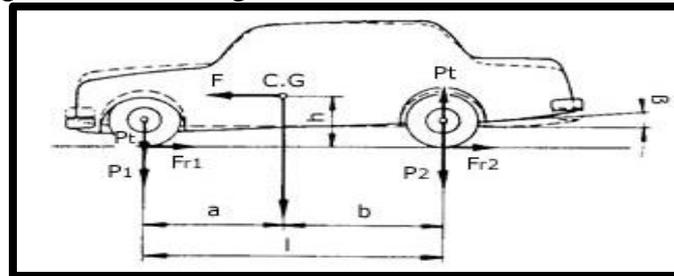
**2.4.4** *Normativa de diseño de suspensión FSAE.* La propuesta de la suspensión será siempre realizar un trabajo fácil y estable de los neumáticos debido al recorrido o trayectoria que tome el vehículo, para establecer el control y adherencia del vehículo a la pista, sin necesidad de llevar al límite de su capacidad al trabajo realizado por los neumáticos. Al diseñar la suspensión se debe numerar los factores de influencia en el comportamiento de la suspensión. Se debe realizar un compromiso por parte de los equipos y los organizadores para interactuar en conjunto y garantizar el correcto desempeño del sistema para obtener una competencia adecuada y acorde a lo establecido.

La normativa FSAE se basa en varios parámetros inherentes al diseño de cada uno de los sistemas, dentro de los cuales se puede (SAE, 2014).

**2.4.5** *Wheelbase (distancia entre ejes).* La distancia entre ejes "l" es la distancia entre el centro del eje frontal y el centro del eje posterior. La distancia entre ejes tiene

una gran influencia sobre el eje de cargas distribuidas. A lo largo de la distancia de ejes se encuentra una transferencia menor de cargas entre el eje delantero y el eje posterior mientras permanece en reposo, a diferencia que tendrá el comportamiento de las cargas producidas al momento de la aceleración y frenado producido por el desplazamiento del vehículo.

Figura 10. Vista longitudinal de la transferencia de cargas

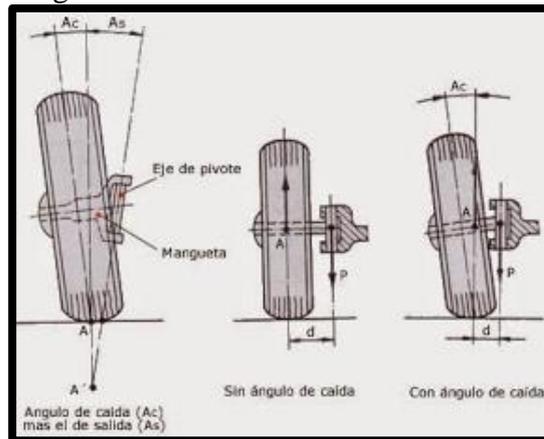


Fuente: (Aficionados a la mecánica, 2014)

**2.4.6** *Track width (ancho de vía)*. El ancho de vía es uno de los aspectos de gran importancia para el diseño del vehículo. Este parámetro presenta una gran influencia durante el comportamiento del vehículo en curvas y la tendencia a rodar. La distancia del ancho de vía debe ser menor que la transferencia de carga lateral producido en las curvas; y viceversa. Una mayor distancia en el ancho de vía, presenta una desventaja y es que se necesitara mayor movimiento lateral del vehículo para evitar obstáculos.

La distancia de la carrocería no debe ser mayor de 3.5m, y se debe tomar en cuenta estar dentro de los diseños establecidos para lograr mayor estabilidad y seguridad durante el desplazamiento del vehículo. Se debe tomar en cuenta en caso de desear colocar barras estabilizadoras, que afectaran directamente lo que es la transferencia de cargas. La geometría de los neumáticos es un aspecto importante en el diseño e implementación del vehículo en general. (SAE, 2014)

Figura 11. Geometría de los neumáticos



Fuente: (Díaz, 2015)

**2.4.7** *Kingpin and scrub radius (kingpin radio de giro).* Es el ángulo formado por el eje del pivote de dirección y la línea perpendicular a la superficie de la pista cuando el eje del pivote de dirección es visto desde el frente. Este ángulo tiene una relación profunda con el camber previamente mencionado. La distancia entre los puntos donde las líneas extendidas de ambos hacen contactos con la tierra es llamada desviación kingpin. Haciendo esta desviación kingpin lo más pequeña, se reduce la fuerza requerida de dirección. Además, debido al ángulo kingpin, las fuerzas que actúan en las ruedas delanteras tienden a jalar a ellas de regreso a la posición de línea recta.

Kingpin es llamado al Angulo que presenta el neumático en vista frontal, mientras que el radio de giro es el conocido por la distancia entre el centro del neumático al centro del eje. El Kingpin influye indirectamente en el camber, que es el ángulo o caída del neumático; es uno de los factores más influyentes en el momento del manejo, ya que durante la conducción o frenado se produce una diferencia de fuerzas entre el neumático izquierdo y el derecho, con lo que de acuerdo al ángulo Kingpin se producirá un torque proporcional para cada uno de los neumáticos estableciendo su conducción.

**2.4.8** *Caster and trail (caster).* Identifica la inclinación hacia delante o atrás de una línea vertical que pasa por la parte de arriba hacia abajo del pivote de dirección al ver el vehículo de costado. El ángulo caster se expresa en grados, y es medido comparando una línea que pasa por la parte de arriba y abajo del pivote de dirección (usualmente un diseño de suspensión con rótula ball joint, superior o inferior de una brazo tipo A u horquilla; o la rótula inferior ball joint y la torre del puntal—

amortiguador/strut— montada en un diseño de puntal amortiguador/strut McPherson) con una línea perpendicular a la carretera. El ángulo caster es positivo cuando la parte arriba de la línea se inclina hacia la parte trasera del vehículo y negativo cuando se inclina hacia al frente. (SAE, 2014)

**2.4.9** *Benchmark (puntos de referencia).* En el 2003, se presentó la primera competencia FSAE, de donde de acuerdo a lo observado y experimentado; se realizó un estudio y un consenso para lo cual de acuerdo a las personas inherentes al tema y con conocimientos amplios, se establece como guía para el diseño, lo siguiente:

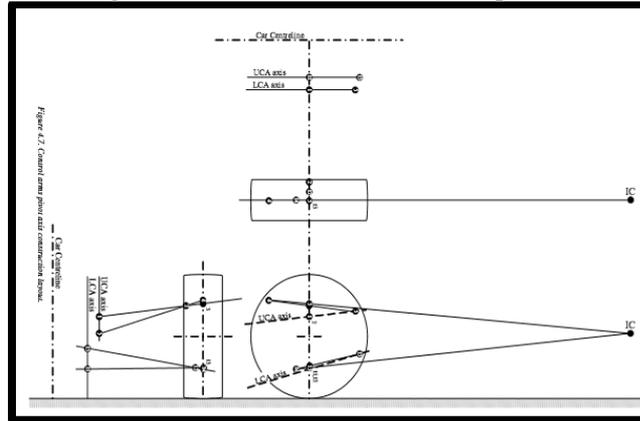
- Kingpin entre 0 a 18 grados.
- Caster entre 3 a 7 grados.
- Camber entre 0 a -4 grados.
- Máximo Angulo de rodaje 2 grados.

## **2.5 Especificaciones que establece la formula SAE para la suspensión**

**2.5.1** *Front suspension design (diseño de la suspensión delantera).* El diseño de la suspensión delantera es primaria basada en su corteza. Ancho de vía, tamaño de la rueda, el tamaño de los neumáticos, los frenos, los amortiguadores, etc. Se debe tomar en cuenta a la hora de determinar los lugares disponibles para la rótula inferior, el tipo de suspensión delantera diseñada de acuerdo a la longitud de sus brazos (SLA). SLA significa brazo corto-largo y se refiere a la diferencia de longitud de los brazos de control superior e inferior de la suspensión.

**2.5.2** *Control arm pivot axis (brazos de control del eje de pivote).* Las ubicaciones para las rótulas situadas en el bastidor, están también diseñadas geométricamente. El método utilizado es el descrito en el Race Car Vehicle Dynamics. El método es una técnica de proyección que puede ser utilizado para SLA y otros tipos de suspensión.

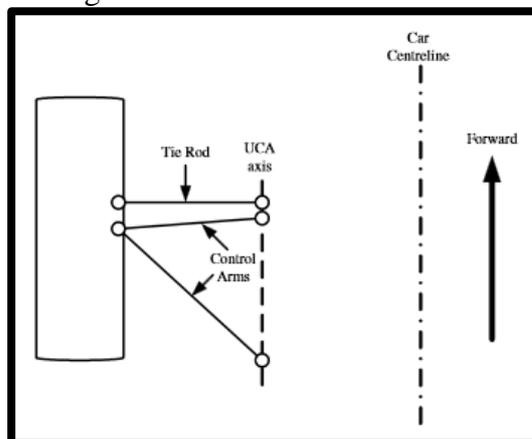
Figura 12. Brazos de control de pivote



Fuente: (Milliken, y otros, 1995)

**2.5.3** *Tie rod location and Ackermann geometry (localización de rotulas y geometría de Ackermann).* Para minimizar la espacios y salientes la colocación de las varillas de unión son puntos y espacios críticos para establecer. Fueron varias cuestiones de ensamblaje a considerar. La colocación de la dirección tiene la altura de los puntos de giro interiores para las varillas de unión, puesto que la cremallera de dirección era para ser montada en la parte superior del prototipo, la solución era tener las varillas de unión en el mismo plano que los brazos de control superior. Teóricamente esta solución dará cero inconvenientes si los tensores están exactamente montados con las armas de control superior. Se desea tener una geometría ajustable y moldeable de Ackermann para optimizar el vehículo en los diferentes eventos de conducción. Pero si el tensor fuese localizado detrás de los brazos de control superior puede provocar también menos capacidad de ajuste a la geometría de Ackermann.

Figura 13. Geometría Ackermann



Fuente: (Milliken, y otros, 1995)

**2.5.4** *Rear suspension design (diseño de la suspensión posterior).* El diseño de la geometría para la suspensión trasera se realiza en forma similar a la suspensión delantera. Es posible utilizar el mismo diseño para el eje trasero de la suspensión, con la diferencia que al costado izquierdo se colocará en el diseño de la suspensión delantera y al lado derecho será la ubicación para el eje posterior y viceversa. Para simplificar el diseño aún más las uniones del sistema se pueden conectar a los brazos de control en lugar del bastidor. Esto se puede hacer desde el punto de pivote exterior del enlace con la altura que el de la rótula exterior.

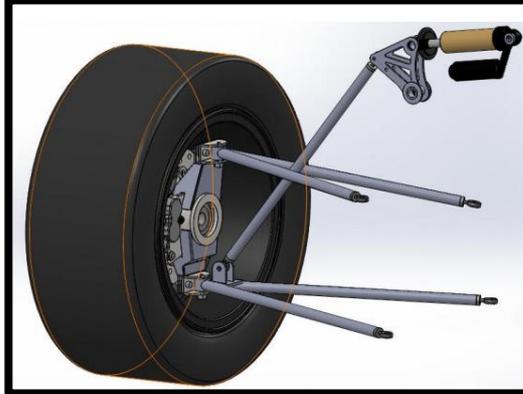
**2.5.5** *Model building (construcción del diseño).* Para proceder a evaluar el sistema de suspensión según el diseño a implementar se realiza un modelado que permite realizar una simulación dinámica del vehículo y el comportamiento bajo diferentes condiciones. Toda simulación del vehículo debe ser llevada a cabo en ADAMS. ADAMS es un software de simulación para dinamismo y simulación de sistemas mecanismos. Existen varios programas ADAMS/Car, especializados en el diseño y aplicado dentro del área automotriz. También presenta la ventaja de simplificar y optimizar los cambios a realizar en los sistemas y elementos simulados. La simulación debe incluir cada uno de los sistemas hasta generar y visualizar el vehículo por completo, así como las herramientas a utilizar en el mismo. Dentro de los sistemas a simular y visualizar se encuentran:

- Sistema de suspensión delantera.
- Sistema de suspensión posterior
- Sistema de dirección
- Neumáticos.
- Carrocería y cuerpo del vehículo.

**2.5.6** *Front suspension modelling (modelado de la suspensión delantera).* Al igual que el modelado en general del vehículo se debe realizar para cada subsistema que se encuentra conformando el prototipo. Para lo cual se desarrolla, visualiza y realiza una simulación del dinamismo que se ejecuta en cada subsistema antes de ser

montado con el vehículo; con el fin de garantizar un estable y seguro comportamiento del vehículo y cada subsistema en general.

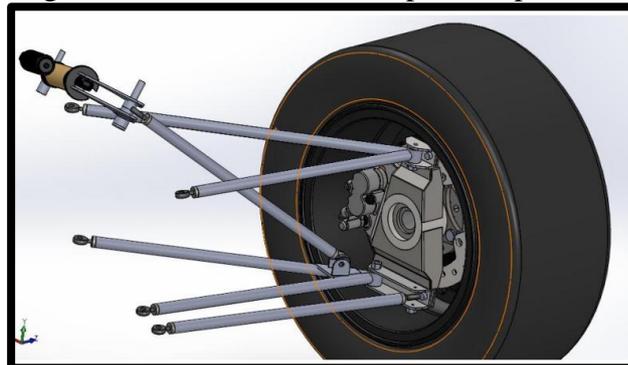
Figura 14. Modelado de la suspensión delantera



Fuente: (Caraguay C., y otros, 2015)

**2.5.7** *Rear suspension modelling (modelado de la suspensión posterior).* De la misma manera que se procede a evaluar el sistema de suspensión delantera se establece para el sistema de suspensión posterior, mediante software ADAMS, con el presente de poder efectuar el movimiento y las cargas que se presentan en el vehículo y garantizar un acorde funcionamiento al momento de implementar en el vehículo en general. (SAE, 2014)

Figura 15. Modelado de la suspensión posterior



Fuente: (Caraguay C., y otros, 2015)

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE LA SUSPENSION

#### 3.1 Introducción

Diseñar es encontrar soluciones sencillas y efectivas para la elaboración de un elemento o sistema que nos permita satisfacer una necesidad o cumplir una demanda aplicando conocimientos de las ciencias exactas como las matemáticas y la física.

En el presente capítulo se describen los parámetros necesarios para el diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo FSAE aplicando fórmulas, análisis y conocimientos mediante los cuales obtendremos un diseño efectivo tanto en su funcionamiento como en su resistencia para que pueda ser construido con materiales de fácil adquisición. Para el diseño, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Normativas: Aplicar las normas vigentes para el diseño y construcción de la suspensión del vehículo tipo fórmula.
- Construcción y costo: Seleccionar minuciosamente los materiales de los elementos con los que se construirá el sistema de suspensión con la finalidad que cumplan con los requerimientos de funcionamiento y resistencia además de invertir los recursos económicos de una manera óptima evitando pérdidas.
- Mantenimiento: El diseño debe estar realizado de tal manera que facilite un mantenimiento preventivo y correctivo de la suspensión y sus componentes.
- Confiabilidad: La suspensión del vehículo debe funcionar correctamente para que el vehículo no sufra accidentes y conservar la seguridad del piloto.

#### 3.2 Definición del modelo de suspensión.

Debido a las características geométricas y mecánicas del vehículo, se implementó el sistema de suspensión push-rod en los dos ejes ya que es más robusto y le da fiabilidad

al vehículo a diferencia del sistema pull-rod que es más delicado por los grandes esfuerzos en determinados puntos del sistema de tracción. Cabe señalar que el sistema pull-rod tiene un mecanismo de accionamiento entre el cuerpo de la rueda y el amortiguador más complejo.

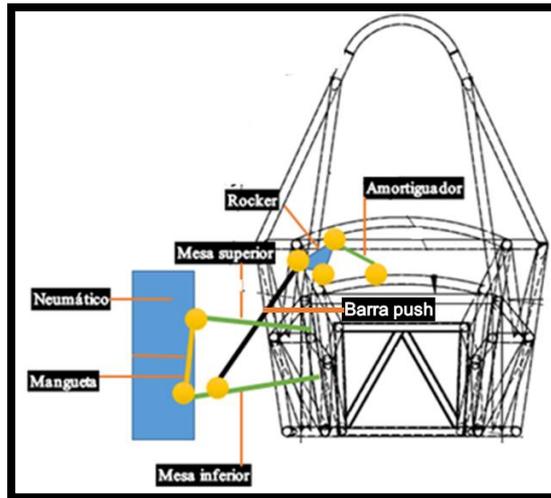
### **3.3 Sistema de suspensión push-rod**

Los componentes principales del sistema de suspensión push-rod son los siguientes:

- Amortiguador
- Barra push
- Rocker
- Mesa superior
- Mesa inferior
- Barra estabilizadora
- Mangueta

**3.3.1** *Bosquejos iniciales para el modelado.* Previo al diseño en el software, es necesario tener una idea clara de la disposición de los elementos que conforman el sistema de suspensión push-rod por eso se ha realizado un bosquejo básico de este sistema con cada una de sus partes.

Figura 16. Bosquejo del sistema de suspensión push-rod



Fuente: Autores

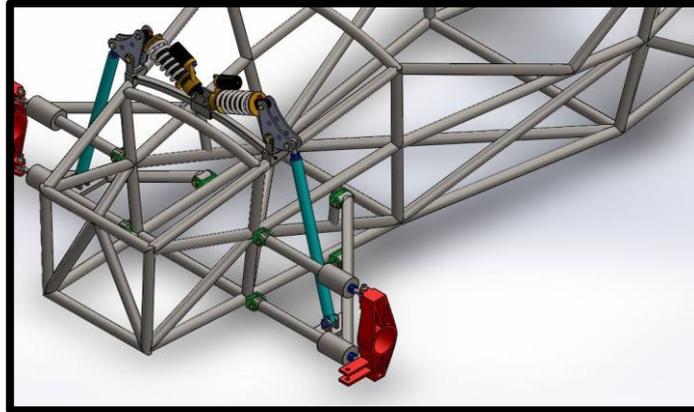
**3.3.2** *Proceso de modelado en el software.* Para diseñar y conocer el comportamiento de los componentes del sistema de suspensión se emplean programas de diseño que facilitarán el análisis de elementos mecánicos sometidos a cargas y esfuerzos en el funcionamiento del vehículo.

Primero se dimensionan los elementos para posteriormente crear los sólidos en el software, se asigna el tipo de material y se realizan las simulaciones para determinar si el diseño es el idóneo. En las siguientes páginas se describen a los elementos del sistema de suspensión push-rod para un vehículo tipo fórmula y sus respectivos análisis mediante simulaciones y fórmulas matemáticas.

**3.3.3** *Consideraciones de ubicación de la suspensión.* Para la ubicación de los elementos del sistema de suspensión se debe considerar varios aspectos geométricos como por ejemplo la altura de las manguetas, los anclajes la posición de los brazos de la suspensión o mesas debido a que determinan importantes factores en el diseño tomando en cuenta la geometría del chasis y las manguetas.

Para la ubicación de la suspensión frontal hemos tomado en cuenta el espacio adecuado para ubicación de la dirección y los frenos, así como también la altura de la mangueta y la posición de los amortiguadores, para esto trabajamos conjuntamente con el equipo de dirección y frenos.

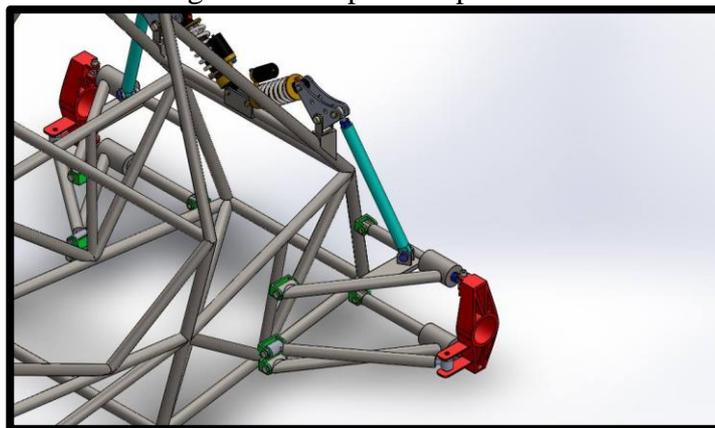
Figura 17. Suspensión delantera



Fuente: Autores

Para la ubicación de la suspensión posterior hemos tomado en cuenta el espacio del motor y el alerón para la ubicación de los balancines, la ubicación del diferencial la altura de la mangueta para un correcto funcionamiento.

Figura 18. Suspensión posterior



Fuente: Autores

Todo el sistema de suspensión debe ser diseñada con la finalidad que el chasis nunca tenga contacto con el piso

Después de observar la ubicación de los componentes de un sistema push-rod se deben considerar varias consideraciones para diseñarla:

- La geometría del chasis para ubicar los extremos de los brazos de suspensión, el eje donde se alojará el rocker y el amortiguador.
- El ancho de vía para determinar las dimensiones de los brazos de suspensión, la

inclinación de la barra push.

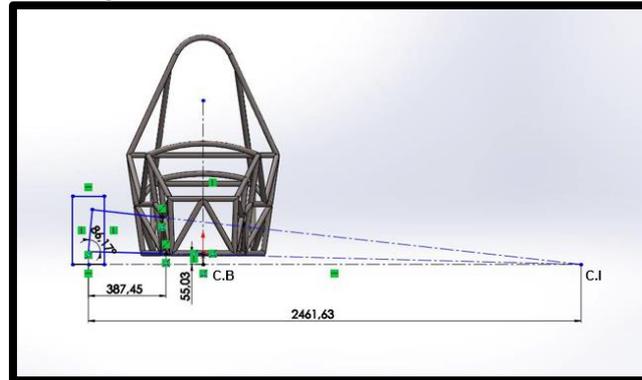
- El diámetro del neumático para ubicar su centro y saber la altura del centro de la mangueta.
- La mangueta para determinar la ubicación de los terminales de los brazos de suspensión.
- La altura a la que se debe encontrar el chasis del suelo para dimensionar los brazos.
- Las dimensiones del amortiguador para diseñar los rocker delanteros y posteriores.
- La distancia entre ejes para ubicar la suspensión en cada neumático y evitar que tenga contacto con los componentes de la dirección.
- La masa del vehículo para distribuirla a los 4 neumáticos.
- La ubicación del centro de gravedad, velocidad del vehículo y radio de giro para realizar los cálculos.

**3.3.4** *Fases de modelación de la suspensión.* La primera fase de modelación del sistema de suspensión push rod consiste en dimensionar los elementos que la conforman, para esto se realiza un plano en vista frontal con las medidas respectivas.

Partiendo de la longitud del ancho de vía y de las dimensiones del neumático con la mangueta, se determina la distancia al centro instantáneo.

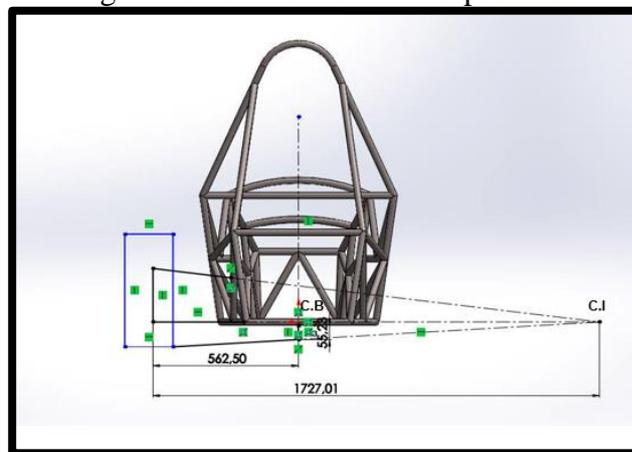
Para la determinar la posición de los brazos de suspensión se trabajó en conjunto con el equipo de chasis y dirección, para ello se parte de los puntos de anclaje de la mangueta y el chasis.

Figura 19. Centro instantáneo delantero



Fuente: Autores

Figura 20. Centro instantáneo posterior



Fuente: Autores

Se determina los centros instantáneos de la parte frontal y posterior son 2461,63 mm y 1727,01 mm respectivamente, así como la altura sobre el suelo de los centros de balanceo son de 9,37 mm y 27,15 mm respectivamente.

Con los datos obtenidos calculamos la tasa de cambio de camber en las ruedas de los ejes mediante:

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = \tan^{-1} \frac{1}{Distancia\ al\ centro\ instantáneo} \quad (1)$$

Para el eje delantero:

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = \tan^{-1} \frac{1}{2461,63}$$

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = 0,02327^\circ/mm$$

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = 0,6^\circ/in$$

La tasa de cambio de camber en eje delantero es de  $0,02327^\circ/mm$  lo que significa que en los 50,8 mm de recorrido vertical de la llanta utilizable tendremos  $1,18^\circ$ , esto quiere decir que a partir de  $-1,2$  grados de camber estático permita que nuestra llanta no genere camber positivo.

Para el eje posterior:

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = \text{tang}^{-1} \frac{1}{1727,01}$$

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = 0,033^\circ/mm$$

$$Tasa\ de\ cambio\ de\ camber = 0,83^\circ/in$$

La tasa de cambio de camber en eje posterior es de  $0,033^\circ/mm$  lo que significa que en los 50,8 mm de recorrido vertical de la llanta utilizable tendremos el cambio en la rueda será  $1,67^\circ$ , esto quiere decir que a partir de  $-1,7$  grados de camber estático permita que nuestra llanta no genere camber positivo.

La suspensión tipo push-rod consta de varios elementos que previamente a la fase de construcción se deben diseñar y realizar las respectivas simulaciones con la finalidad de determinar si soportarán las cargas ejercidas cuando se encuentren en funcionamiento. A continuación, se describen cada uno de ellos.

**3.3.5 Brazos de la suspensión.** Los brazos de la suspensión son los elementos que acoplan a la mangueta con el chasis a través de pasadores. Tanto en la suspensión delantera como en la posterior existen un brazo superior y un inferior por cada neumático, sobre el brazo inferior de encuentra alojada la barra push que empuja al rocker para accionar el amortiguador y que pueda absorber las irregularidades en la pista.

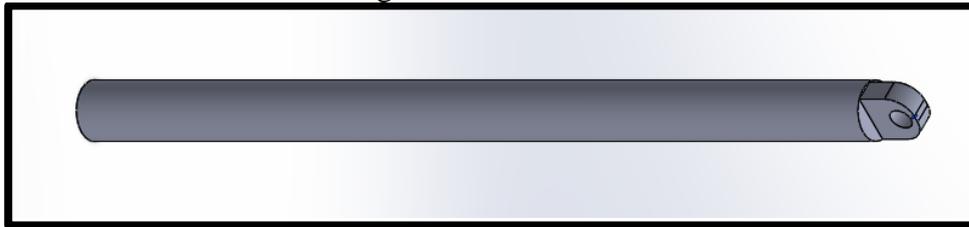
Figura 21. Brazos de la suspensión



Fuente: Autores

**3.3.6** *Barra push.* Es una barra que se encuentra a 50 grados del brazo de suspensión inferior para activar al conjunto amortiguador-muelle a través del rocker. Las dimensiones de las barras push delanteras varían en su tamaño con las posteriores por la geometría del chasis.

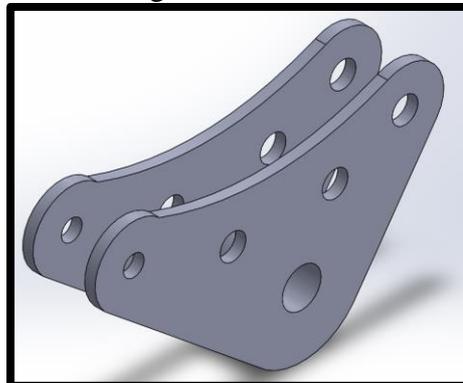
Figura 22. Barra Push



Fuente: Autores

**3.3.7** *Rocker.* El rocker es un balancín que se encuentra alojado en el chasis, la barra push y el amortiguador con la finalidad de transmitir las irregularidades de la pista y que el amortiguador las absorba.

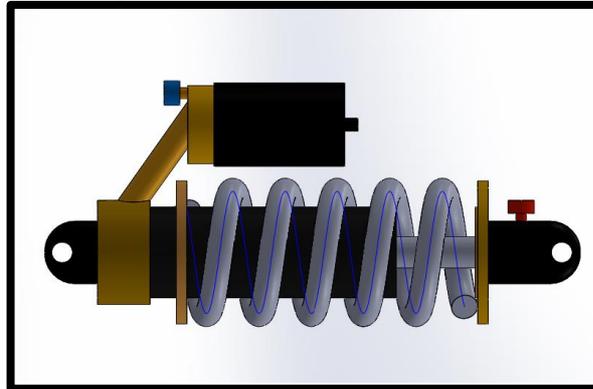
Figura 23. Rocker



Fuente: Autores

**3.3.8** *Amortiguador y muelle.* El conjunto amortiguador-muelle se encarga de absorber las irregularidades del camino. En el vehículo son 4 los que se encuentran presentes, uno por cada neumático.

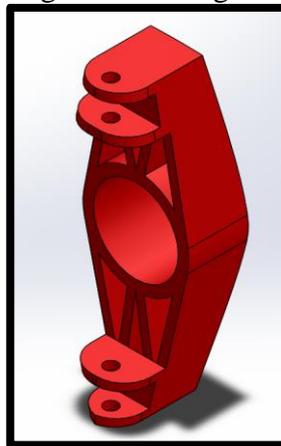
Figura 24. Amortiguador y muelle



Fuente: Autores

**3.3.9** *Mangueta.* La mangueta es un elemento de masa no suspendida, la mangueta es parte del sistema de suspensión ya que en la misma van montadas las mesas de la suspensión, parte del sistema de frenos, dirección y los neumáticos.

Figura 25. Mangueta



Fuente: Autores

**3.3.10** *Rótula.* La rótula permite un relativo movimiento en cierto ángulo en todos los planos que pasan por una línea, lo que permite evitar grandes esfuerzos y que exista falla por flexión. A la rótula también se la denomina articulación, en el prototipo se utilizó la rótula SKF SAKAC 10M.

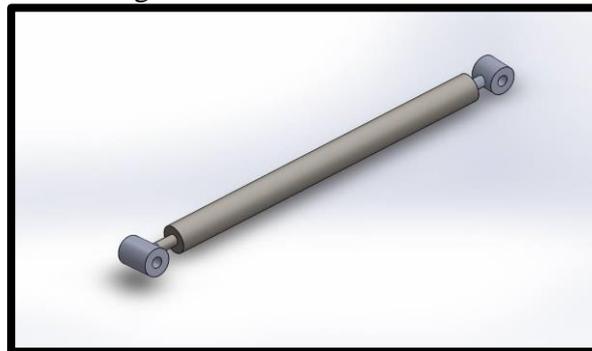
Figura 26. Rótula



Fuente: Autores

**3.3.11** *Barra estabilizadora.* Es un elemento elástico, genera un par de oposición al balanceo, ayuda a la estabilidad en curva y en el prototipo de colocó dos, una en cada lado de la suspensión posterior.

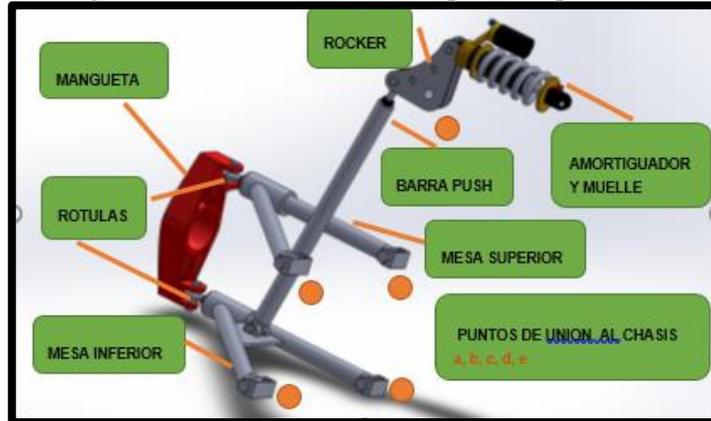
Figura 27. Barra estabilizadora



Fuente: Autores

Una vez ensamblados estos elementos, se podrá obtener el sistema de suspensión push-rod como se observa en la siguiente figura donde se indica la ubicación de cada componente.

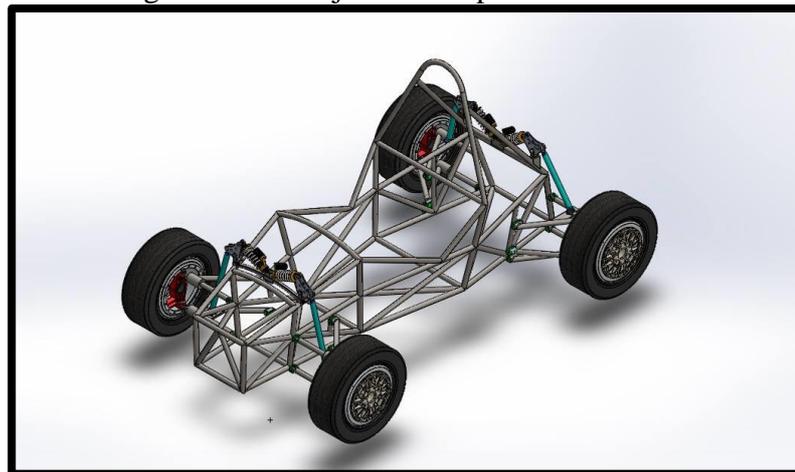
Figura 28. Ensamble de la suspensión push-rod



Fuente: Autores

Una vez modelado todos los componentes se hace un ensamble total para verificar que no exista ninguna interferencia entre los mismos para su buen desempeño.

Figura 29. Anclaje de la suspensión al chasis



Fuente: Autores

### 3.4 Cálculos

Para realizar las simulaciones de una manera muy precisa se requieren conocer las fuerzas presentes en el sistema de suspensión por esa razón se realiza un análisis detallado con la finalidad de conocer los valores de dichas cargas.

**3.4.1** *Ubicación del centro de gravedad.* Trabajando conjuntamente con los compañeros que diseñaron el chasis se determinó que el centro de gravedad es el siguiente.

Altura del centro de gravedad desde la base del chasis.

$$h = 244,70 \text{ mm}$$

Altura del centro de gravedad con los neumáticos.

$$h = 300 \text{ mm}$$

Ubicación longitudinal del centro de gravedad.

$$dx = 186,74 \text{ mm}$$

**3.4.2** *Distancia entre ejes.* Para calcular la distancia entre ejes o batalla, es necesario conocer la ubicación del centro de gravedad. Se conoce como que la distancia del centro de gravedad hacia el eje delantero es 663,26 mm y hacia el eje posterior es 1036,74 mm.

La siguiente fórmula determina la longitud de la batalla:

$$b = l_1 + l_2 \quad (2)$$

De donde:

b= Batalla

$l_1$  =Longitud del centro de gravedad hacia el eje delantero

$l_2$ = Longitud del centro de gravedad hacia el eje posterior

Despejando la fórmula:

$$b = 663,26 \text{ mm} + 1036,74 \text{ mm}$$

$$b = 1700 \text{ mm}$$

La distancia entre ejes será de 1700 mm

**3.4.3** *Distribución de masas en el vehículo.* Es fundamental conocer cómo se distribuyen las masas en los ejes del vehículo para realizar las simulaciones en el software, por esta razón se realizan los cálculos con las siguientes fórmulas:

$$\sum MA = 0 \quad \curvearrowright \quad (3)$$

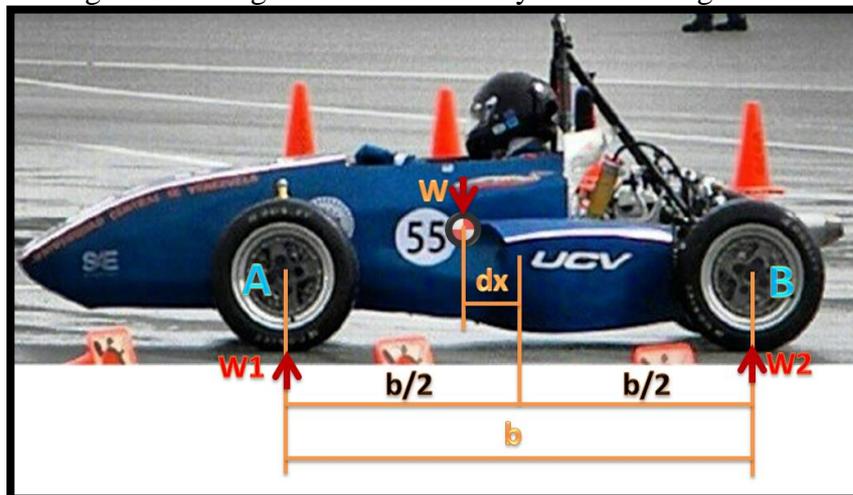
$$W_2 * b - W \left( \frac{b}{2} - dx \right) = 0$$

$$\sum MB = 0 \quad \curvearrowright$$

$$-W_1 * b + W \left( \frac{b}{2} + dx \right) = 0$$

Se realiza una sumatoria de momentos en el punto A y B, que corresponden a los ejes delantero y posterior respectivamente para despejar  $W_1$  y  $W_2$

Figura 30. Longitudes de la batalla y el centro de gravedad



Fuente: Autores

El valor de  $dx$  corresponde a la distancia desde el punto medio entre la batalla y el centro de gravedad.

$$dx = \frac{b}{2} - l_1 \quad (4)$$

$$dx = \frac{1700 \text{ mm}}{2} - 663,26 \text{ mm}$$

$$dx = 186,74 \text{ mm}$$

Al despejar  $W_1$  y  $W_2$  se obtiene:

$$W_1 = \frac{W}{2} + \frac{W * dx}{b}$$

$$W_2 = \frac{W}{2} - \frac{W * dx}{b}$$

De donde:

$MA =$  Momento en A

$MB =$  Momento en B

$W_1 =$  Distribución de peso en el eje delantero

$W_2 =$  Distribución de peso en el eje posterior

$W =$  Peso total

El peso del vehículo será 340 kg, al reemplazar en la fórmula se obtiene:

$$W_1 = \frac{340}{2} - \frac{340 * 186,74}{1700}$$

$$W_1 = 132,65 \text{ kg}$$

$$W_2 = \frac{340}{2} + \frac{340 * 0,18674}{1,7}$$

$$W_2 = 207,34 \text{ kg}$$

**3.4.4** *Porcentaje de peso en los ejes delantero y posterior.* Es la razón que existe entre el peso en cada eje con el peso total del vehículo.

$$\%W_1 = \frac{W_1}{W} * 100 \quad (5)$$

$$\%W_1 = \frac{132,65}{340} * 100$$

$$\%W_1 = 39,01\%$$

$$\%W_2 = \frac{W_2}{W} * 100$$

$$\%W_2 = \frac{207,34}{340} * 100$$

$$\%W_2 = 60,98\%$$

El peso del vehículo está distribuido en 39,01% en el eje delantero y 60,98% en el eje posterior.

El peso del vehículo es de 340 kg, se añade el peso del piloto de 70 kg ya que se encuentra muy cercano al centro de gravedad se los distribuye junto a la masa del vehículo en los cálculos. La distribución de pesos calculada anteriormente es de 39,01% para el eje delantero y 60,98% para el eje posterior.

$$W_{total} = W_{vehículo} + W_{piloto} \quad (6)$$

$$W_{total} = 340 + 70 = 410kg$$

Para el eje frontal:

$$W_{td} = 410 * 0,3901$$

$$W_{td} = 159,941 kg$$

Para cada neumático delantero se divide esta masa para 2.

$$W_{td} = \frac{159,941}{2} = 79,97 \text{ kg}$$

El peso que soporta cada neumático delantero es 79,97 kg. A continuación, el cálculo para los neumáticos posteriores:

$$W_{tp} = 410 * 0,6098$$

$$W_{tp} = 250.018 \text{ kg}$$

$$W_{tp} = \frac{250.018}{2} = 125,09 \text{ kg}$$

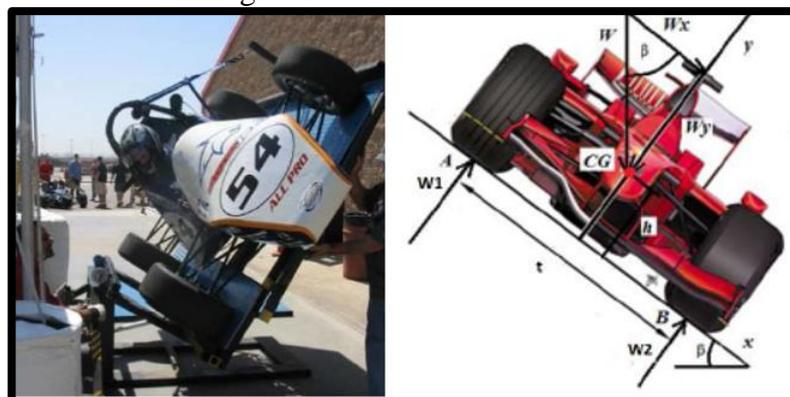
Cada neumático posterior soportará 125,09 kg.

**3.4.5** *Cálculo antivuelco.* Para que el vehículo pueda competir es sometido a un ensayo de antivuelco usando la prueba pasa/no pasa, la cual el vehículo no debería volcarse a una inclinación de 60 grados con respecto al piso.

Para llevar a cabo esta prueba se coloca el vehículo en una plataforma a 60 grados con respecto del piso, lo cual simula una aceleración lateral de 1,7 g.

Esta prueba permite garantizar la estabilidad del vehículo en una curva y permite corregir la distribución de masas en caso de que sea necesario, para ello se realiza el cálculo estático.

Figura 31. Vehículo inclinado



Fuente: Autores

$$\sum MB = 0 \quad +\curvearrowright \quad (7)$$

$$Wy * \frac{T}{2} - Wx * h - W1 * T = 0$$

$$W * \cos\beta * \frac{T}{2} - W * \sin\beta * h - W1 * T = 0$$

Para que exista vuelco W1 debe ser igual a cero, despejando  $\beta$  tenemos.

$$\beta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{T}{2 * h}\right) \quad (8)$$

En donde:

$T = \text{Ancho de vía}$

$h = \text{Altura del CG}$

$\beta = \text{Inclinación Max}$

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$\beta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{1200}{2 * 300}\right)$$

$$\beta = 63,43^\circ$$

Podemos observar que el vehículo resiste los  $63,43^\circ$  antes de volcar por cual la masas distribución de masas en el vehículo es la correcta y pasaría la prueba del reglamento de la formula SAE satisfactoriamente.

**3.4.6** *Cálculo del balancín.* El balancín es un elemento muy importante ya que es el encargado de transmitir la carga desde la barra push hacia los amortiguadores y así cumplir una relación de movimiento entre la rueda y los amortiguadores para su buen funcionamiento.

En el reglamento SAE especifica que el recorrido de la llanta debe ser mínimo de 50,8 mm (2 pulgadas), para nuestro diseño implementamos el amortiguador DNM performance suspensión de 190 mm que tiene un recorrido de  $51 \pm 2$ .

Calculamos la relación de movimiento.

$$MR = ST/WT \quad (9)$$

En donde:

WT = Recorrido del neumático

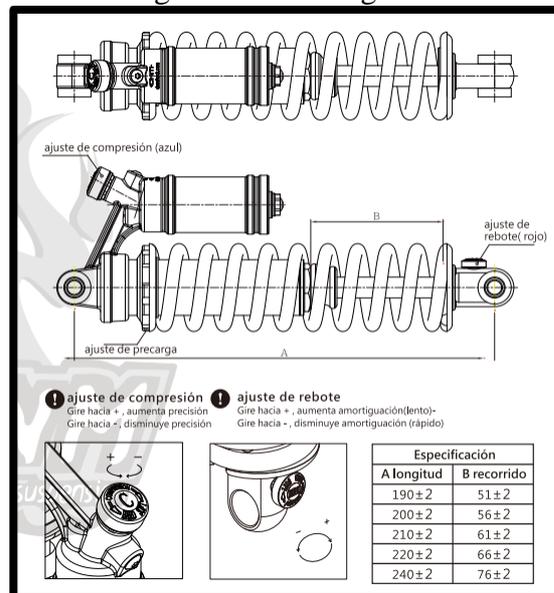
ST = Recorrido de suspensión

MR = Relación de Movimiento

$$MR = 53/50,8$$

$$MR = 1,04$$

Figura 32. Amortiguador



Fuente: (Ebay, 2015)

Para diseñar el balancín se debe tomar en cuenta tanto el peso en el eje delantero como posterior ya calculadas anteriormente.

Distancia que recorre el resorte con el peso del vehículo

$$s(m) = \frac{W(N)}{K\left(\frac{N}{m}\right)} \quad (10)$$

En donde:

$S =$  Distancia recorrida

$W =$  Peso (N)

$K =$  Fuerza Amortiguador (N/m)

Se utiliza resortes de 225 lbs/in en la parte trasera como en la posterior.

Recorrido del resorte con el peso del eje delantero.

$$s(m) = \frac{79,97kg * 9,8m/s^2}{225(lbs/in) * \frac{4,45 N}{1 lb} * \frac{1 in}{0,03 m}}$$
$$s(m) = 23,48mm$$

Recorrido del resorte con el peso del eje posterior.

$$s(m) = \frac{125,09kg * 9,8m/s^2}{225(lbs/in) * \frac{4,45 N}{1 lb} * \frac{1 in}{0,03 m}}$$
$$s(m) = 36,73mm$$

**3.4.7** *Relación de movimiento.* Es la relación que existe entre el recorrido del neumático y la distancia que recorre el amortiguador con el peso del vehículo más el peso del piloto para cada neumático.

Relación de movimiento en el eje delantero.

$$RM = \frac{\text{Recorrido minimo del Neumatico}}{\text{Recorrido del resorte}} \quad (11)$$

$$RM = \frac{37 \text{ mm}}{23,48}$$

$$RM = 1,57$$

Relación de movimiento en el eje posterior.

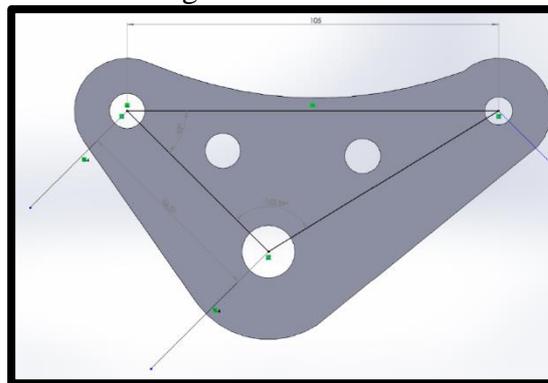
$$RM = \frac{\text{Recorrido minimo del Neumatico}}{\text{Recorrido del resorte}}$$

$$RM = \frac{37 \text{ mm}}{36,73}$$

$$RM = 1$$

En el monoplaza se requiere una relación de movimiento de 1,57 en el eje delantero y de 1 en el eje posterior para que el recorrido de la rueda sea el adecuado para su funcionamiento.

Figura 33. Balancín



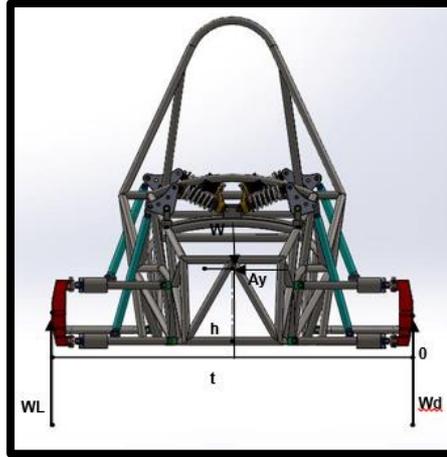
Fuente: Autores

### 3.4.8 Análisis dinámico del sistema de suspensión.

**3.4.8.1 Transferencia de masa lateral.** Es importante calcular la transferencia de masa lateral de un vehículo ya que cuando un vehículo pasa por una curva se presenta una fuerza centrífuga o fuerza lateral en el monoplaza que va del interior de la curva al exterior

La transferencia de masas se calcula incluida la masa del piloto y en el eje delantero.

Figura 34. Transferencia de masa lateral



Fuente: Autores

$$\sum M_0 = 0 \quad +\curvearrowright \quad (12)$$

$$WL * T = Wd \frac{T}{2} + Wd * Ay * h = 0$$

$$WL = \frac{Wd}{2} + \frac{Wd * Ay * h}{t}$$

Donde:

$t = \text{Ancho de vía} = 1200 \text{ mm}$

$h = \text{Altura de CG} = 300 \text{ mm}$

$WL = \text{Peso en el eje exterior}$

$Wd = \text{Peso en el eje delantero} = 159,94 \text{ kg}$

$Ay = \text{Aceleración Lateral} = 1,75 \text{ g}$

Reemplazando:

$$WL = \frac{159,94}{2} + \frac{159,94 * 1,75 * 300}{1200}$$

$$WL = 149,94 \text{ kg}$$

El peso en la rueda exterior es de 149,94 kg para la aceleración de 1,75 g

**3.4.9** *Transferencia de masa longitudinal.* El vehículo está sometido a frenadas y aceleraciones bruscas lo que provoca transferencia de masa hacia el eje posterior cuando acelera y que se transfiera la masa al eje delantero cuando el vehículo frene, es de vital importancia saber cuál es la masa transmitida hacia los ejes para la construcción de los elementos.

Los cálculos se realizan con el peso del vehículo y el piloto y la distribución se realiza hacia el eje delantero y posterior, para realizar el cálculo se toma los valores de una aceleración negativa la cual equivale a detener un vehículo de 100 km/h en 3 segundos.

$$-a = \frac{v_f - v_o}{t} \quad (13)$$

a = Desaceleración

Vf = Velocidad final = 0 m/s

Vo = Velocidad Inicial = 100Km/h = 27,77 m/s

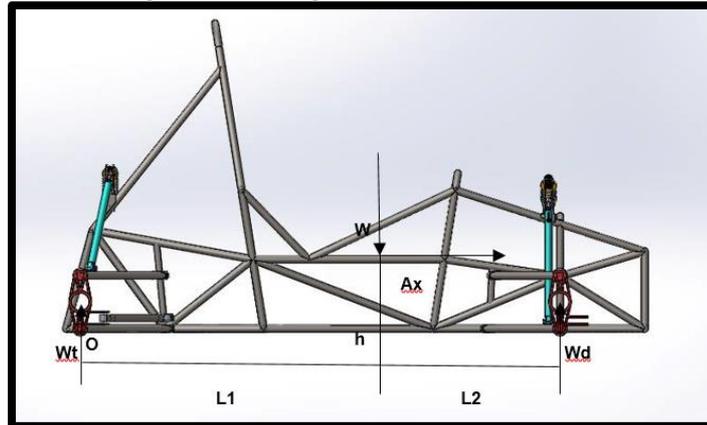
t = tiempo = 3 s

Reemplazando se obtiene:

$$-a = \frac{0 - 27,77}{3} = 9,25 \frac{m}{s^2} \times \frac{1g}{9,8 m/s^2}$$

$$-a = 0,94 g$$

Figura 35. Longitud al centro de masa



Fuente: Autores

$$\sum M_0 = 0 \quad +\curvearrowright \quad (14)$$

$$dW_d * l = W * Ax * h$$

$$dW_d = \frac{W * Ax * h}{l}$$

En donde:

$l =$  Distancia entre ejes

$h =$  Altura del CG

$Ax =$  Aceleración lateral

$dW_d =$  Incremento de peso en el eje delantero = 0.94 g

$$dW_d = \frac{410 * 0,94 * 300}{1700}$$

$$dW_d = 68,01 \text{ Kg}$$

El peso transferido del eje posterior al delantero al momento de frenar es de 68,01 Kg, siendo un total de 227,951 kg en el eje delantero y 113,97 kg para cada neumático.

Para calcular la transferencia de masa del eje delantero al posterior por la aceleración, existe una prueba en la fórmula SAE, consiste en que el vehículo debe recorrer una longitud de 75 metros en línea recta en 4,19 segundos de tiempo promedio. El eje

posterior es el que sufre mayores esfuerzos, debido a este motivo se calcula el peso que se debe aumentar a la masa del eje posterior en estática para las simulaciones.

Primero se procede a calcular la velocidad media con los datos conocidos.

$$V = \frac{d_r}{t} \quad (19)$$

$$V = \frac{75}{4,19} = 17,89 \text{ m/s}$$

Con el valor de la velocidad se calcula la aceleración.

$$a = \frac{v}{t} \quad (20)$$

$$a = \frac{17,89 \text{ m/s}}{4,19 \text{ s}} = 4,26 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a = 4,26 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ g}}{9,8 \text{ m/s}}$$

$$a = 0,43 \text{ g}$$

Realizando los cálculos tenemos:

$$\sum M1 = 0 \quad + \curvearrowright \quad (21)$$

$$dW_t * l = W * a * h$$

$$dW_t = \frac{W * a * h}{l}$$

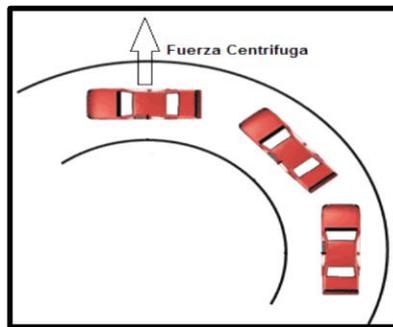
$$dW_t = \frac{410 * 0,43 * 300}{1700}$$

$$dW_t = 31,11 \text{ kg}$$

La masa trasferida del eje delantero al posterior en la prueba de recorrido de la formula SAE es de 31,11 kg, la masa total en el eje posterior es 281,128 kg, siendo 140,56 kg distribuida para cada neumático.

### 3.4.10 Aceleración Lateral.

Figura 36. Fuerza centrífuga del vehículo



Fuente: Autores

El vehículo al pasar por una curva genera una fuerza lateral en la rueda que debe de ser calculada para el análisis de cargas en el sistema.

Para calcular la fuerza centrífuga del monoplaza de considera una velocidad de 50 km/h y un radio de curva de 13,5 m.

$$F_{Lateral} = m \frac{v^2}{r} \quad (22)$$

De donde:

$$F_{Lateral} = \text{Fuerza lateral}$$

$m = \text{masa del vehículo}$

$v = \text{Velocidad}$

$r = \text{Radio de giro}$

Se conoce que la velocidad es de 50 km/h esto es igual a 13,88 m/s, la masa del vehículo es de 410 kg y el radio de curvatura es de 13,6 m, se emplean estos datos para reemplazar en la fórmula y de obtiene:

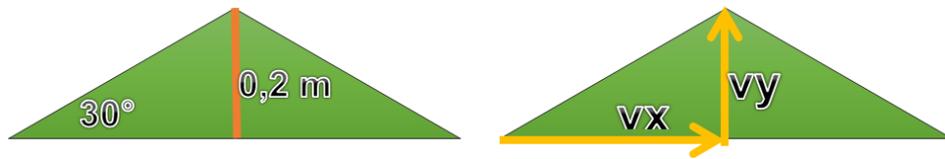
$$F_{Lateral} = 410 \text{ kg} \frac{(13,88 \text{ m/s})^2}{13,5 \text{ m}}$$

$$F_{Lateral} = 5850,98 N$$

Obtenemos una fuerza lateral en la rueda de 5850,98 N.

**3.4.11** *Cálculo de fuerzas que actúan en un obstáculo.* Para conocer las fuerzas que actúan en la suspensión cuando atraviesa un obstáculo ocasionado por las irregularidades de los caminos por donde circula se realiza un cálculo considerando una velocidad de 25 km/h, una altura de 0,2 metros y una pendiente de 30°.

Figura 37. Obstáculo



Fuente: Autores

Los cambios de velocidad de un vehículo se producen cuando pasa por un obstáculo, se origina una aceleración en sentido vertical y una fuerza que debe ser absorbida por el sistema de suspensión. Primero se transforma la velocidad de km/h a m/s, el valor tomado en cuenta será de 25 km/h.

$$v_x = \frac{25 \text{ km}}{h} * \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 6,94 \text{ m/s} \quad (23)$$

$$v_y = v_x * \tan\theta$$

$$v_y = 6,94 * \tan 30$$

$$v_y = 4 \text{ m/s}$$

Formula para determinar la aceleracion vertical:

$$a_y = \frac{(v_y)^2}{2h} \quad (24)$$

Reemplazando:

$$a_y = \frac{(4)^2}{2 * 0,2}$$

$$a_y = 40 \frac{m}{s^2}$$

La fuerza generada en los neumaticos seria:

$$F_{eje} = \frac{M_{eje}}{4} \times a_y \quad (25)$$

$$F_{eje} = \frac{159,941}{4} \times 40$$

$$F_{eje} = 1599,41 \text{ N}$$

La fuerza de un neumatico al pasar por un obstaculo seria 1599,41 N.

### 3.5 Simulaciones de la suspensión

Los softwares de ingeniería mecánica permiten obtener resultados acerca del comportamiento de los elementos mecánicos de un sistema. Es necesario tener conocimientos de ciertas áreas como diseño de elementos, resistencia de materiales y matemáticas para obtener datos precisos, obviamente también dominar el manejo de los programas de diseño mecánico porque se necesita un proceso para tener los análisis y resultados.

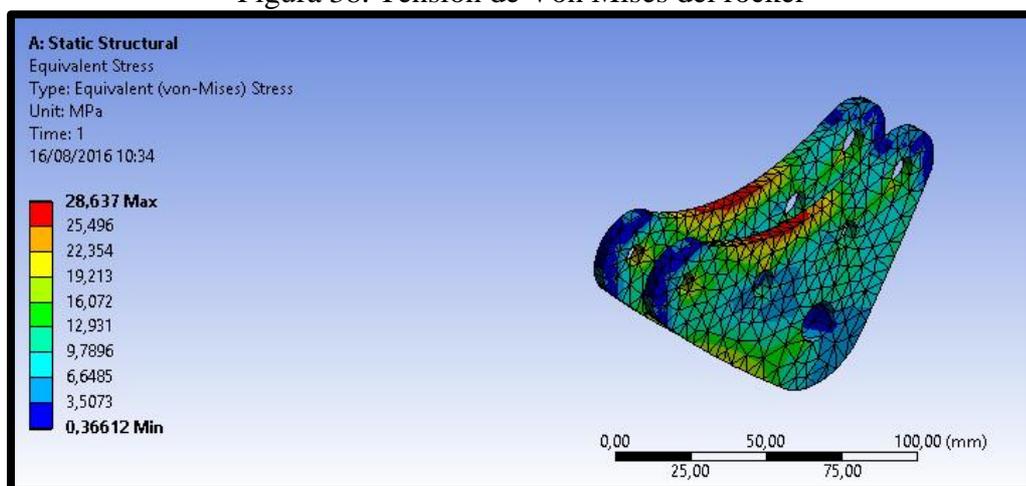
Posterior al dimensionamiento de los elementos del sistema de suspensión, se le asigna un material, se ubican los puntos donde se va a fijar y los esfuerzos externos que serán aplicadas. Estos esfuerzos pueden ser de compresión, flexión y tensión.

**3.5.1** *Simulación de los elementos de la suspensión push-rod en Ansys.* La simulación en el software ANSYS permite observar cómo influyen los esfuerzos anteriormente descritos en cada elemento de la suspensión, a continuación, se demuestra cómo se comportan los componentes de un sistema push-rod en su funcionamiento. Se

debe tomar en cuenta que los valores introducidos para la simulación son pertenecientes a las cargas en situaciones críticas para que el diseño sea seguro.

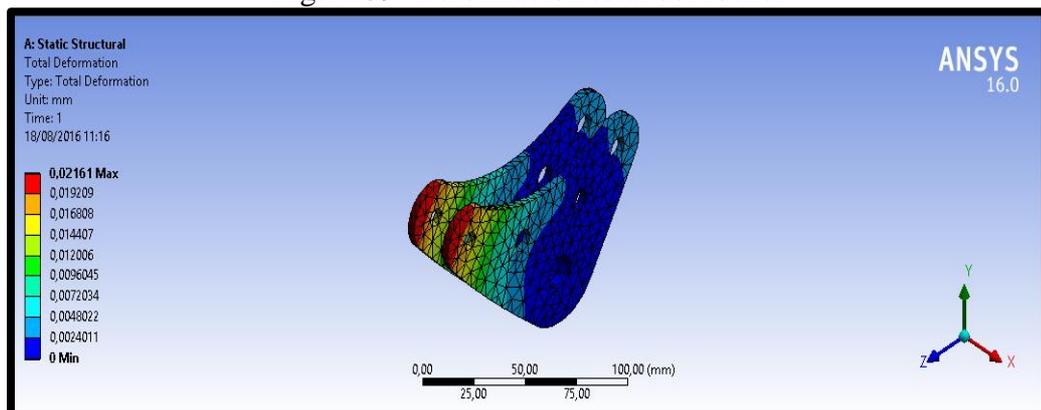
**3.5.1.1 Rocker.** Cada rocker recibe el impulso de la barra push con una fuerza de 1655,8 N para accionar el funcionamiento del amortiguador y el muelle siendo  $F_y = 1599,4$  N y  $F_z = 428,56$  N, y una contra fuerza que es la del amortiguador de 2446,5 N siendo  $F_y = 1310,2$  N y  $F_z = 917,38$  N. En la simulación se observa cómo se deforma el rocker además el esfuerzo de Von Mises y el factor de seguridad.

Figura 38. Tensión de Von Mises del rocker



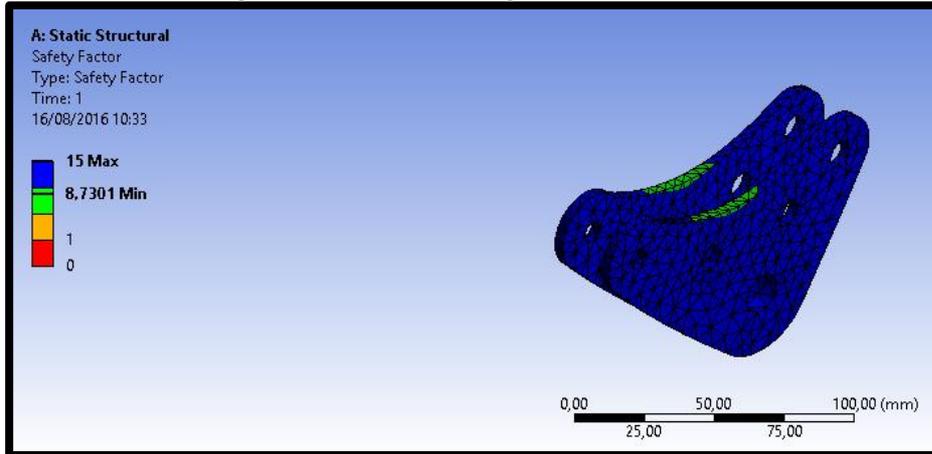
Fuente: Autores

Figura 39. Deformación total del rocker



Fuente: Autores

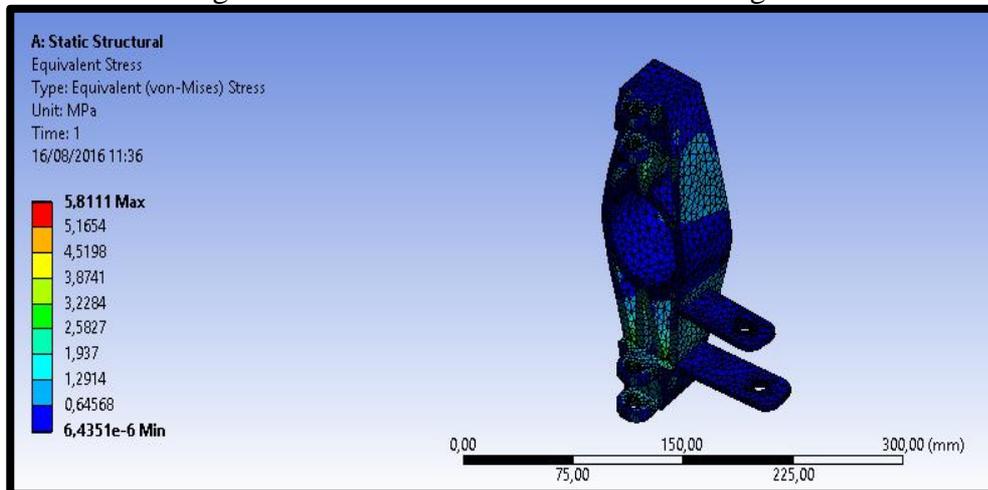
Figura 40. Factor de seguridad del rocker



Fuente: Autores

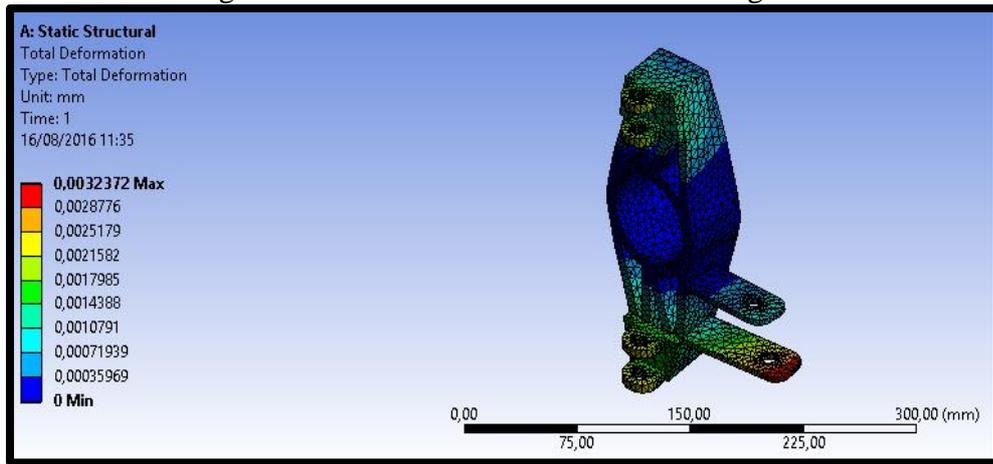
**3.5.1.2 Mangueta.** Mediante análisis estructurales se determinó que cada mangueta recibe fuerzas de impacto producidas cuando el vehículo pasa por un obstáculo siendo esta de 1599,4 N, soporta la fuerza centrífuga de 5850,98 N, la fuerza de frenado de 1116,90 N y la fuerza de aceleración de 1377,48 N. Las siguientes figuras demuestran el comportamiento de la mangueta sometidas a estas fuerzas.

Figura 41. Tensión de Von Mises en la mangueta



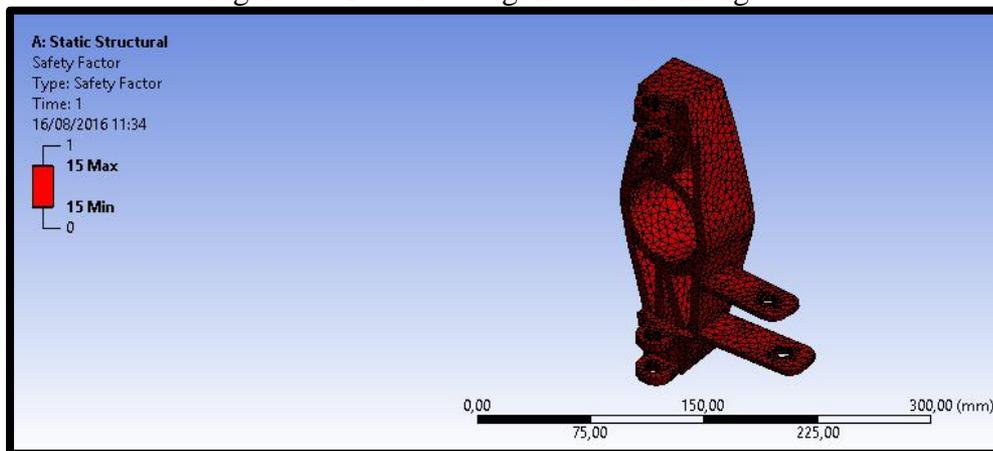
Fuente: Autores

Figura 42. Deformación máxima en la mangueta



Fuente: Autores

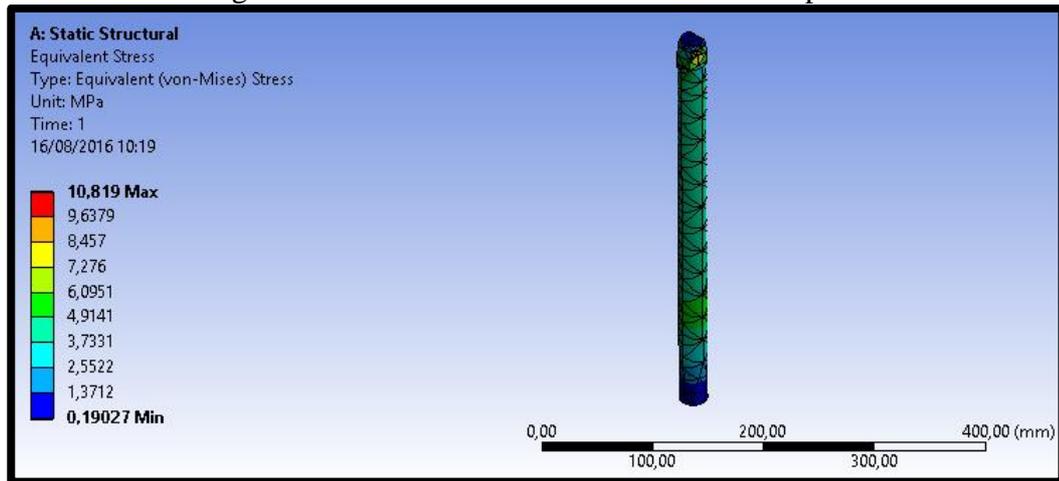
Figura 43. Factor de seguridad en la mangueta



Fuente: Autores

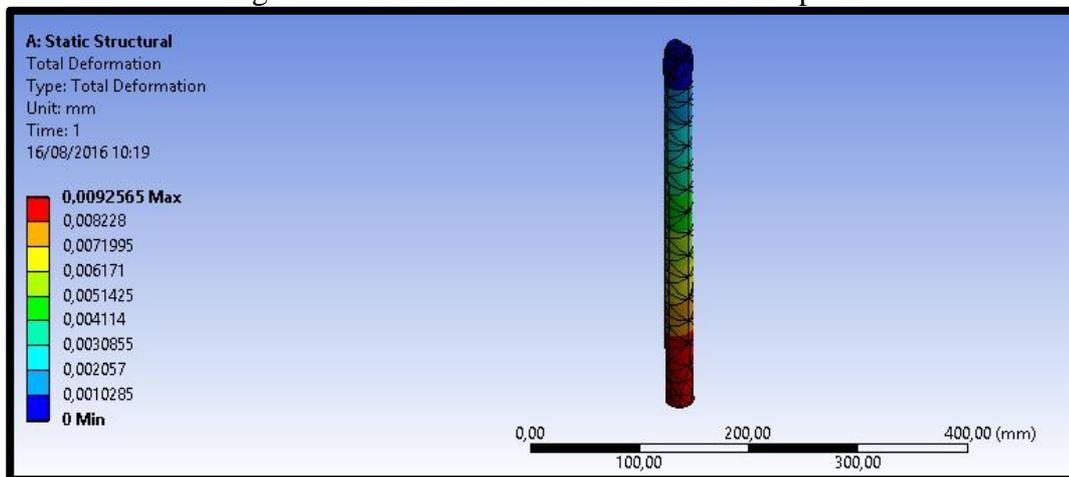
**3.5.1.3 Barra push.** La barra push es la pieza encargada de impulsar al rocker, está sometida a esfuerzos de compresión las cuales son la resistencia del amortiguador y la fuerza recibida en un obstáculo siendo estas 2446,5 N y 1655,8 N con un Angulo de 45° y 75° respectivamente. Mediante el análisis en ANSYS, se determinó el comportamiento de la barra push cuando está sometida a los esfuerzos de trabajo.

Figura 44. Esfuerzo De Von Mises en la barra push



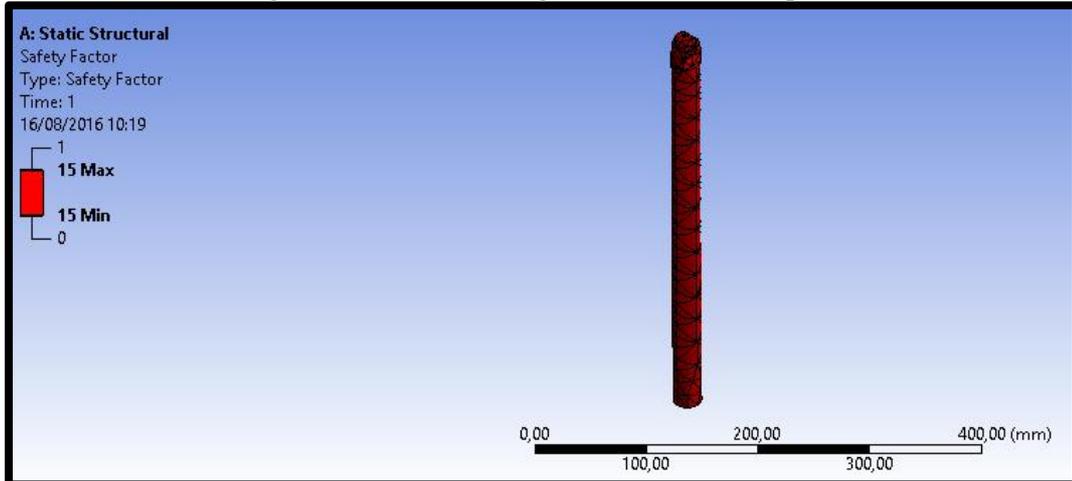
Fuente: Autores

Figura 45. Deformación máxima en la barra push



Fuente: Autores

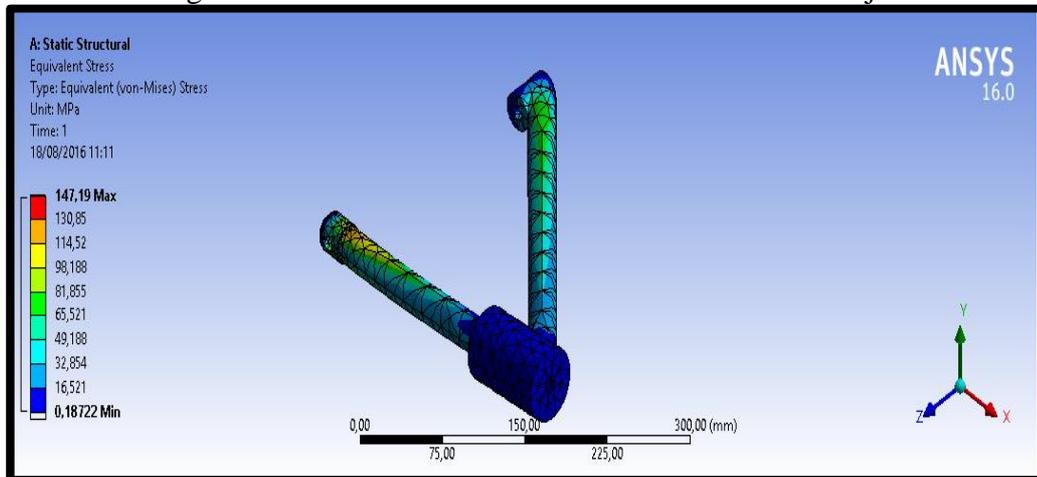
Figura 46. Factor de seguridad en la barra push



Fuente: Autores

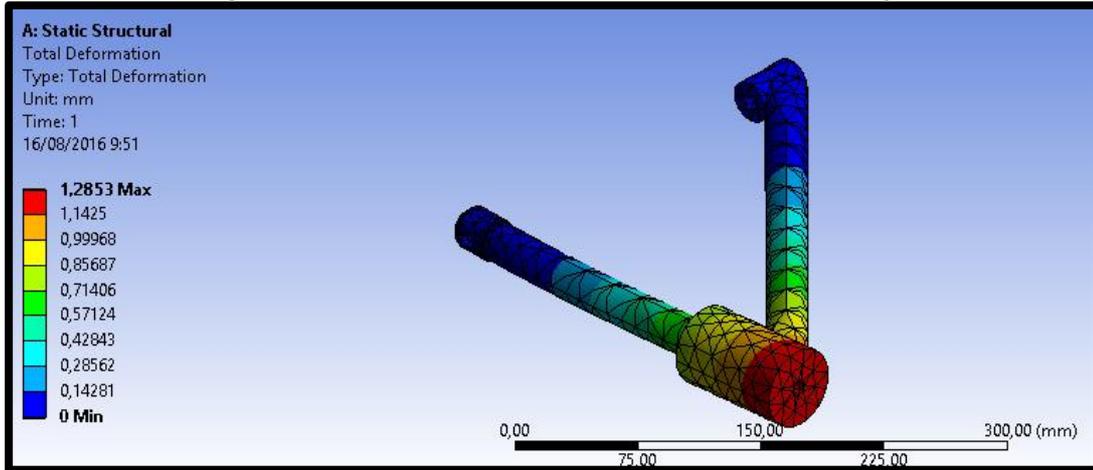
**3.5.1.4 Mesa sin anclaje.** Esta mesa es la encargada de mantener paralela la mangueta y resistir la fuerza generada por los obstáculos, la fuerza centrífuga en una curva y la fuerza de frenada siendo estas 1599,4 N, 5850 N y 558,45 N respectivamente. A continuación, se observa el comportamiento de la mesa sometido a estas fuerzas.

Figura 47. Esfuerzo de Von Mises en la mesa sin anclaje



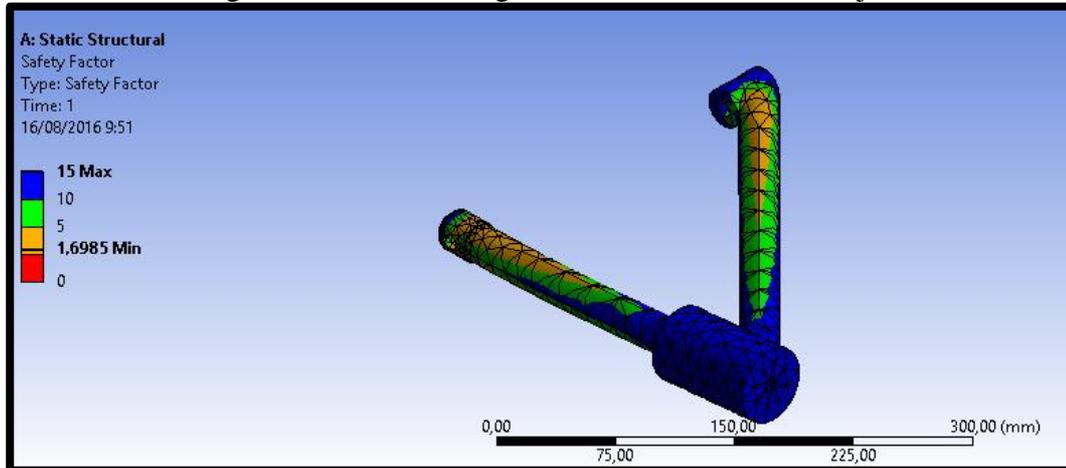
Fuente: Autores

Figura 48. Deformación máxima en la mesa sin anclaje



Fuente: Autores

Figura 49. Factor de seguridad en la mesa sin anclaje

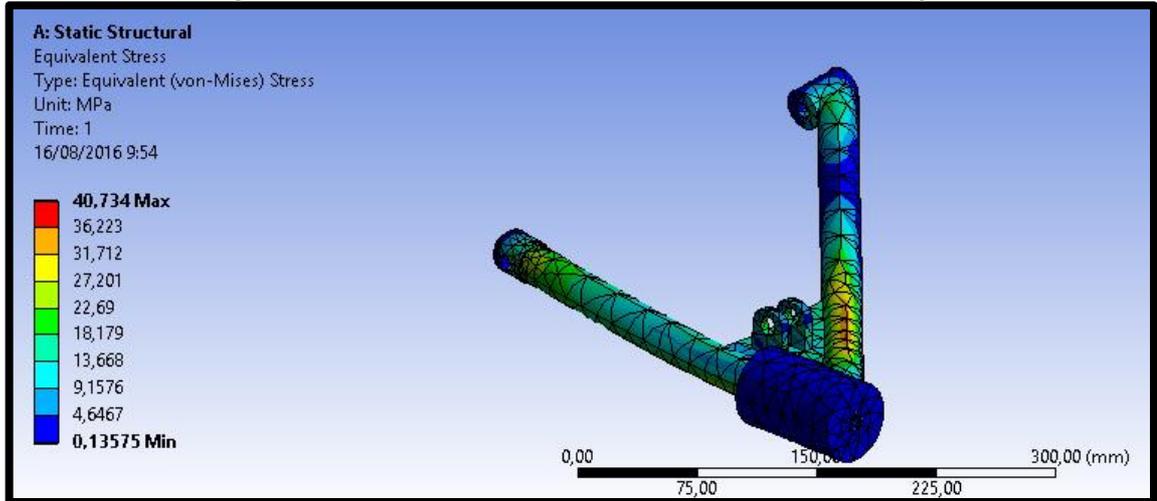


Fuente: Autores

**3.5.1.5 Mesa con anclaje.** Para simular el comportamiento de los brazos de la suspensión con anclaje se toman en cuenta las mismas fuerzas descritas anteriormente, pero aumenta la fuerza generada en el apoyo de la barra push que la fuerza de resistencia al movimiento generada por un obstáculo esta fuerza es la del amortiguador siendo 2446,5 N.

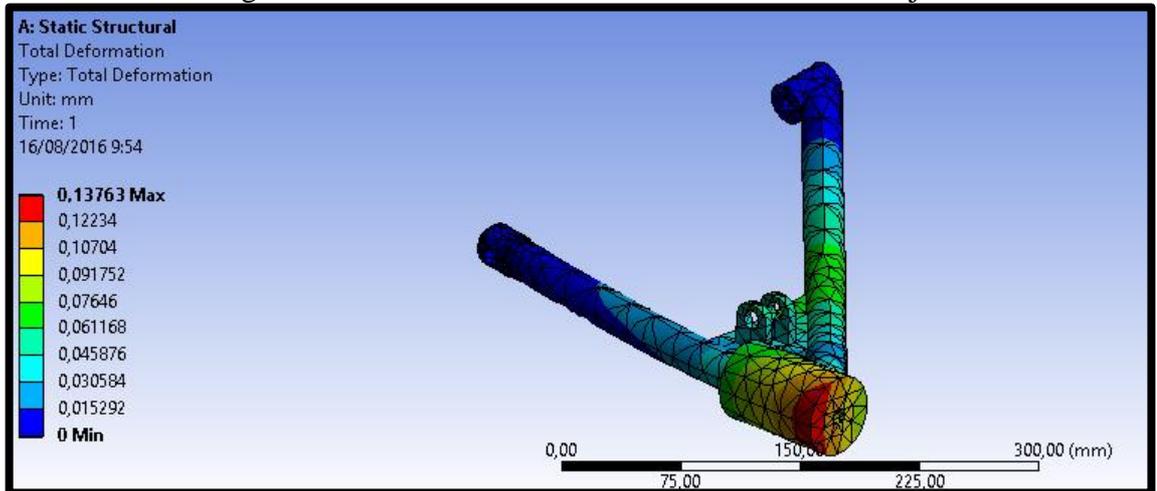
A continuación, se observa los gráficos de las simulaciones de esfuerzo, deformación máxima y factor de seguridad:

Figura 50. Esfuerzo de Von Mises en la mesa con anclaje



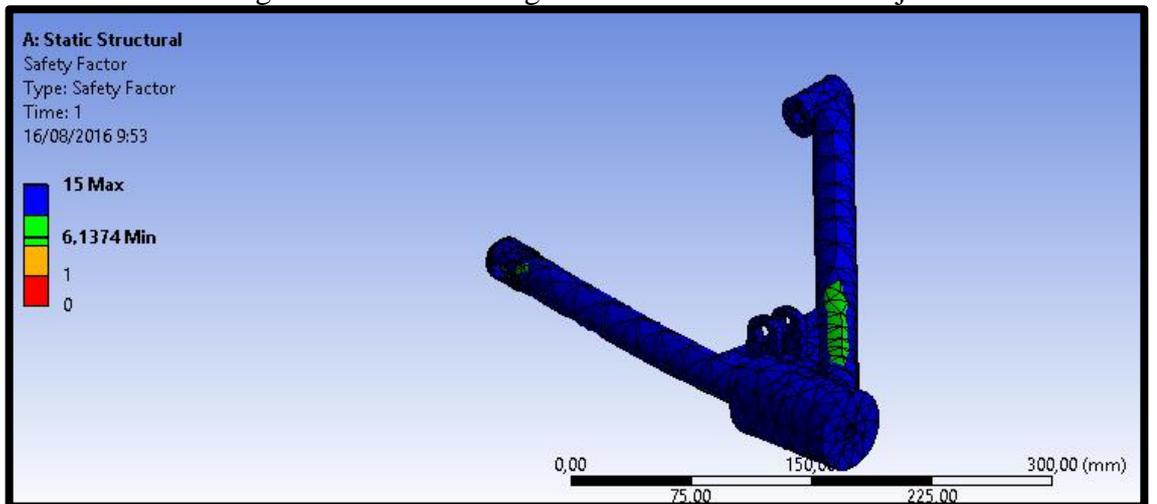
Fuente: Autores

Figura 51. Deformación máxima en la mesa con anclaje



Fuente: Autores

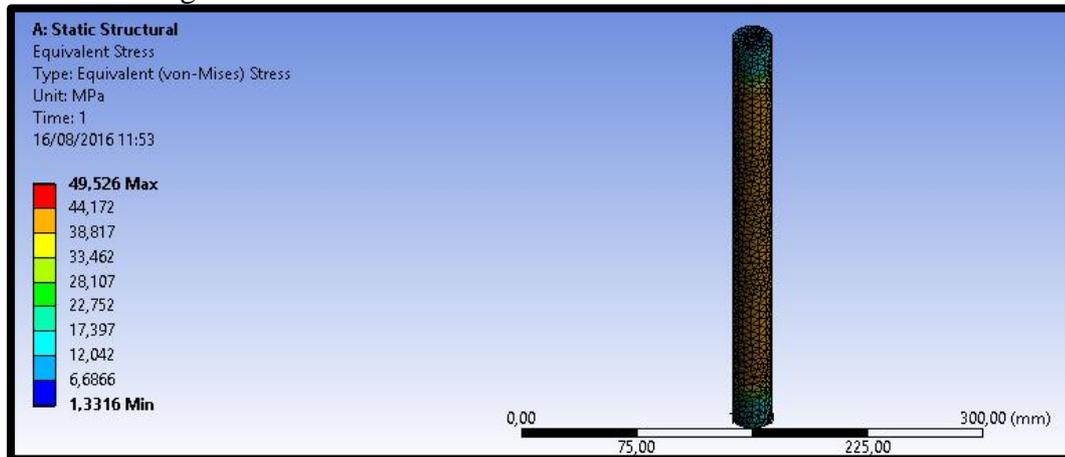
Figura 52. Factor de seguridad en la mesa con anclaje



Fuente: Autores

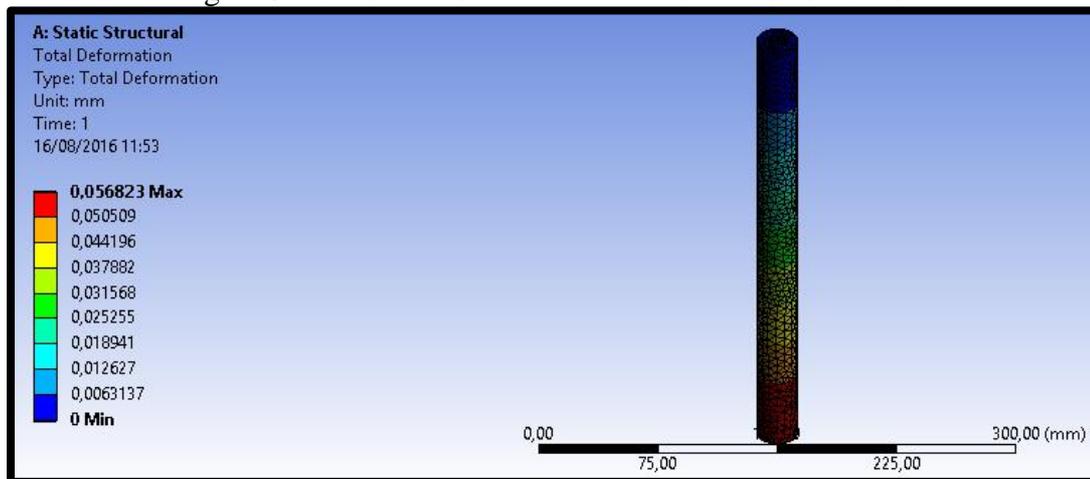
**3.5.1.6 Barra estabilizadora.** La barra estabilizadora permite que la mangueta no gire cuando el vehículo da una vuelta por lo tanto está sometido a tracción por efecto de fuerza centrífuga siendo esta de 5850 N.

Figura 53. Esfuerzo de Von Mises en la barra estabilizadora



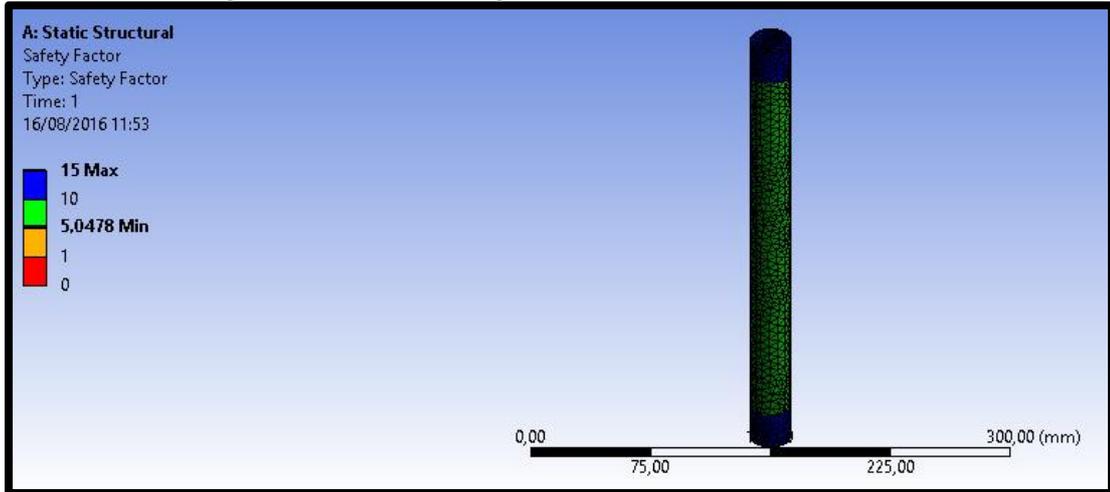
Fuente: Autores

Figura 54. Deformación máxima en la barra estabilizadora



Fuente: Autores

Figura 55. Factor de seguridad en la barra estabilizadora



Fuente: Autores

### 3.6 Análisis de la suspensión

Después de realizar las simulaciones, en la tabla se observa a cada componente de la suspensión con los datos arrojados del software.

**3.6.1 Esfuerzos obtenidos.** Los esfuerzos de trabajo principales que actúan en cada elemento se pueden demostrar a través la tensión de Von Mises, que es una teoría muy empleada para la selección de materiales en un análisis.

Tabla 2. Esfuerzos máximos de trabajo

ELEMENTO	ESFUERZO MÁXIMO DE TRABAJO (MPa)
Rocket	28,63
Mangueta	5,8
Barra push	10,8
Mesa sin anclaje	147,19
Mesa con anclaje	40,73
Barra estabilizadora	49,52

Fuente: Autores

**3.6.2 Factor de seguridad.** Es el cociente obtenido entre la carga de falla obtenida sometiendo al material a ensayos de resistencia de materiales y el esfuerzo máximo en

el diseño. Si dicho valor es mayor a 1, entonces el elemento resistirá a los esfuerzos y cargas aplicadas. El análisis de Von Mises permite conocer el valor del esfuerzo máximo al que está sometido el material.

La fórmula para determinar el factor de seguridad es:

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{Perm}} \quad (26)$$

Donde:

$F_s$  = Factor de seguridad

$S_y$  = Resistencia a la cedencia (Mpa)

$\sigma_{Perm}$  = Esfuerzo de trabajo (Mpa)

En la tabla podemos observar el factor de seguridad de los elementos del sistema de suspensión push-rod para el vehículo:

Tabla 3. Factores de seguridad

ELEMENTO	FACTOR DE SEGURIDAD
Rocket	8,73
Mangueta	15
Barra push	15
Mesa sin anclaje	1,6
Mesa con anclaje	6,13
Barra estabilizadora	5,04

Fuente: Autores

**3.6.3** *Resultados de la simulación.* Después de la fase de diseño y simulación de los elementos en el software ANSYS, se determina que todos los componentes de la suspensión push-rod soportarán los esfuerzos de trabajo por diversas razones:

- El factor de seguridad de cada elemento es superior a 1
- Los valores introducidos en el software de los esfuerzos son en situaciones críticas, es decir, cuando el vehículo atraviesa un obstáculo y con la fuerza lateral en una curva.
- El ensamble del sistema de suspensión encaja correctamente con la geometría del chasis.
- Los valores de las fuerzas de reacción en los rockers concuerdan correctamente con el amortiguador seleccionado, descrito en el capítulo 4.
- Las deformaciones de los elementos son mínimas y no interfieren con los componentes de los otros sistemas del vehículo.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. CONSTRUCCIÓN DE LA SUSPENSIÓN**

#### **4.1 Modelación**

El proceso de modelación de los elementos de la suspensión se realiza empleando las herramientas de software descritas en el capítulo III. El programa SolidWorks nos permite obtener los planos de construcción y cotas que sirven para realizar las mediciones en los tubos, pletinas y amortiguadores y maquinarlos. La precisión al momento de maquinar los materiales para un sistema mecánico debe ser la mayor posible para un óptimo ensamblaje. Depende mucho de las herramientas y equipos a utilizar, así como de la apreciación de la persona que esté construyendo un elemento.

En el presente capítulo, se describe el proceso de selección de los materiales que conforman el sistema de suspensión push-rod, los procedimientos realizados detalladamente en su construcción, las pruebas efectuadas en el sistema y los resultados obtenidos.

#### **4.2 Dimensionamiento**

Después de obtener los planos de los componentes de la suspensión push-rod, se realiza el dimensionamiento de los materiales para que se adapten con precisión entre ellos y trabajen adecuadamente. El dimensionamiento se realiza con instrumentos de precisión como el calibrador, el flexómetro, escuadras y nivel para verificar un buen maquinado, por ejemplo, para dimensionar y ubicar los brazos de la suspensión, se realiza la medición a partir del chasis hacia las manguetas en una superficie plana y firme como se observa en la figura y con las dimensiones que muestran los planos de construcción.

Figura 56. Vista frontal y posterior del chasis



Fuente: Autores

### 4.3 Selección de materiales

Para el proceso de selección de materiales se ha tomado en cuenta varios factores con la finalidad de tener un diseño resistente sin un costo excesivo. Además, se consideran los resultados obtenidos en las simulaciones con el software ANSYS.

Para la construcción de la suspensión hemos escogido el acero estructural tubular ASTM A500 ya que tiene las siguientes propiedades mecánicas.

Figura 57. Propiedades mecánicas del acero A500

PROPIEDADES MECANICAS REQUERIDAS POR ASTM A-500		
Esfuerzos	Redondos	Cuadrados y Rectangulares
Fluencia $F_y$	3,241 kg/cm <sup>2</sup>	3,522 kg/cm <sup>2</sup>
Ultimo $F_u$	4,368 kg/cm <sup>2</sup>	4,368 kg/cm <sup>2</sup>
Elongacion en 2"	21%	21%

Fuente: (Instituto Distrital de Recreación y Deporte de Bogotá, 1999)

Límite de Fluencia = 317 MPa.

Resistencia a la Tracción = 454 MPa.

**4.3.1** *Materiales para los elementos tubulares.* Los materiales para los brazos y la barra push del sistema de suspensión push-rod son acero estructural ASTM A500 tubular de 1 pulgada de diámetro con 2 milímetros de espesor y de 1 ½ pulgadas con 2 mm de espesor.

Los brazos de la suspensión de 1 pulgada de diámetro se encuentran unidos mediante el tubo de 1 ½ pulgadas en el vértice y en los extremos con pequeños segmentos de tubo de 1 pulgada los mismos que sirven de anclaje al chasis como se observa en la figura.

Figura 58. Brazos de suspensión



Fuente: Autores

Junto al vértice de los brazos de la suspensión se colocan cabezas de articulación como se muestra en la figura, con rodamiento interno para que permitan el libre movimiento de la mangueta.

Figura 59. Cabezas de articulación



Fuente: Autores

La unión de los elementos del sistema de suspensión se realiza mediante el proceso de soldadura MIG con la máquina mostrada en la figura.

Figura 60. Suelda MIG



Fuente: Autores

**4.3.2** *Materiales para los rockers y bases.* Los rockers del sistema de suspensión push-rod presentan varias características de diseño, entre ellas se encuentran la resistencia, la elasticidad y bajo peso para que trabajen con libertad por eso para este vehículo están contruidos de dos láminas de acero ASTM A-36 de 4 mm de espesor con varias perforaciones en su geometría con la finalidad de reducir su peso. También se selecciona el mismo material para los elementos de anclaje de la suspensión al chasis porque se los puede maquinar con facilidad y soldarlos.

Figura 61. Especificaciones de la plancha de acero ASTM A 36

	Ancho	Largo	Espesor	Peso Aprox.
	mm	mm	mm	kg.
	1.220	2.440	1,50	35,05
	1.220	2.440	2,00	46,74
	1.220	2.440	3,00	70,10
	1.220	2.440	4,00	93,47
	1.220	2.440	5,00	116,84
	1.220	2.440	6,00	140,21
	1.220	2.440	8,00	186,94

Recubrimiento:  
Negro  
Norma de Fabricación:  
NTE INEN 115 / ASTM A 6  
Norma de Calidad:  
ASTM A 36 / ASTM A 588 Gr. A / ASTM A 131 Gr. A /  
ASTM A 516 Gr. 70 / ASTM A 572 Gr. 50  
Observaciones:  
Dimensiones y largos especiales, previa consulta

Fuente: (IPAC, 2014)

Una vez adquirido el material para los rockers, se procede a marcar los contornos para después cortarlos como se observa en la figura.

Figura 62. Trazado de los rockers en la plancha de acero



Fuente: Autores

Las bases del amortiguador y los rockers se maquinan y se perforan para después unirlos al chasis a través de soldadura como se observa en la figura.

Figura 63. Soporte de los anclajes en el chasis



Fuente: Autores

**4.3.3** *Amortiguador.* El amortiguador seleccionado para el vehículo de F-SAE será un DNM performance con depósito de lubricante para que absorba con mayor eficiencia el impacto y muelle helicoidal de acero resistente hasta 550 Lbs.

Figura 64. Amortiguador DNM performance



Fuente: (Ebay, 2015)

Las características del amortiguador se muestran en la tabla 6.

Tabla 4. Características del amortiguador

DESCRIPCIÓN	
Ojo a ojo largo × peso	190mm × 740g (7.48in × 63 libras)
Amortiguación	4-sistema
OD del cuerpo	: 28mm (1.10in)
Damper shaft	Acero
Choque cromado duro 12mm (0.47in) eje. Choque cromado duro 10mm (0.39in) eje de 165mm ~ 180mm (6.5in ~ 7.9in). Disponible con tuerca de refrigeración por aire.	

Fuente: (DNM, 2013)

El amortiguador es el mismo para cada rueda, después de adquirirlo, se verifican las dimensiones de las especificaciones técnicas y se inspecciona visualmente. El amortiguador se observa en la figura.

Figura 65. Muelle del amortiguador



Fuente: Autores

#### 4.4 Anclaje de la suspensión al chasis

El sistema de suspensión push-rod tiene ventajas desde el punto de vista de estabilidad y confort ya que reduce a mayor escala las oscilaciones al chasis por ser independiente.

La suspensión se acopla con el chasis a través de alojamientos soldados a través del proceso MIG para obtener una unión de calidad tanto en funcionalidad como estéticamente y acoplados mediante pasadores.

Se debe tomar en cuenta que el ensamble de los elementos debe realizarse con libertad, sin forzar los elementos ni que se encuentren obstaculizados por el chasis u otro componente. En la figura se observa la suspensión delantera en el proceso de ensamble.

Figura 66. Suspensión anclada al chasis



Fuente: Autores

#### 4.5 Diagramas de proceso

Para llevar a cabo un proceso productivo, existen herramientas que permiten medir y registrar cuanto se tarda en realizar una actividad con la finalidad de ejecutarla organizadamente y en un tiempo prudente.

A continuación, se describen los procesos realizados en la construcción del sistema de suspensión push-rod con el tiempo que tarda cada actividad

#### 4.5.1 Proceso 1

Tabla 5. Construcción de los rockers

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PUSH-ROD PARA VEHÍCULO F-SAE										
<input type="checkbox"/>	MÉTODO ACTUAL	<input type="checkbox"/>	MÉTODO PROPUESTO	FECHA:						
DESCRIPCIÓN DE LA PARTE: <b>ROCKERS</b>										
DESCRIPCIÓN OPERACIÓN : <b>CONSTRUCCIÓN</b>										
		ACTUAL		PROPUESTO		DIFERENCIA		ANÁLISIS		
		TIEMPO	NÚM	TIEMPO	NÚM	TIEMPO	NÚM			
	<b>OPERACIONES</b>	18,00	80,00							
	<b>TRANSPORTE</b>	190,00	2,00							
	<b>INSPECCIONES</b>	14,00	78,00							
	<b>RETRAZOS</b>	0,00	00,00							
	<b>ALMACENAMIENTO</b>	0,00	00,00							
<b>DIST. RECORRIDA (KM)</b>		5,014								
PASO	DETALLES DEL PROCESO	MÉTODO	OPERACIÓN	TRANSPORTE	INSPECCIÓN	RETRASO	ALMACENAMIENTO	DIST. (m)	CANTIDAD	TIEMPO (HORAS)
1	ADQUISIÓN DE MATERIALES	VEHÍCULO						5000	2	4
2	MEDICIÓN DE PLANCHA DE ACERO	FLEXÓMETRO						2	8	0.5
3	MAQUINADO DE PLANCHA DE ACERO	CORTE POR PLASMA						3	8	6
4	MEDICION PARA ORIFICIOS	FLEXÓMETRO						2	20	0.5
5	PERFORACION DE PLANCHA	TALADRO						2	20	1
6	SOLDADURA DE LAS CARAS	MIG						3	12	1
7	PULIDO	AMOLADORA						2	10	1

ESTUDIADO POR:  
Arellano C.  
Taday E.

Fuente: Autores

4.5.2 Proceso 2

Tabla 6. Construcción de los brazos de suspensión

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PUSH-ROD PARA VEHÍCULO F-SAE

<input type="checkbox"/>	MÉTODO ACTUAL	<input type="checkbox"/>	MÉTODO PROPUESTO	FECHA:			
DESCRIPCIÓN DE LA PARTE:		<b>BRAZOS DE LA SUSPENSIÓN</b>					
DESCRIPCIÓN OPERACIÓN		<b>CONSTRUCCIÓN</b>					
		<b>ACTUAL</b>	<b>PROPUESTO</b>	<b>DIFERENCIA</b>	<b>ANÁLISIS</b>		
		TIEMPO	NÚM	TIEMPO	NÚM	TIEMPO	NÚM
○	<b>OPERACIONES</b>	14,00	189,00				
→	<b>TRANSPORTE</b>	3,00	3,00				
□	<b>INSPECCIONES</b>	1,00	186,00				
D	<b>RETRAZOS</b>	0,00	00,00				
▽	<b>ALMACENAMIENTO</b>	0,00	2,00				
<b>DIST. RECORRIDA (KM)</b>		5,017					

ESTUDIADO POR:  
Arellano C.  
Taday E

PASO	DETALLES DEL PROCESO	MÉTODO	OPERACIÓN	TRANSPORTE	INSPECCIÓN	RETRASO	ALMACENAMIENTO	DIST. (m)	CANTIDAD	TIEMPO (HORAS)
1	ADQUISIÓN DE MATERIALES	VEHÍCULO	●	→	□	D	▽	5000	3	3
2	MEDICIÓN DE LA TUBERÍA	FLEXÓMETRO	●	→	■	D	▽	1	20	1
3	MEDICIÓN DE LAS PLACAS DE ACERO Y TERMINALES	FLEXÓMETRO	●	→	■	D	▽	3	32	2
4	CORTE DE TUBERÍAS	SIERRA	●	→	■	D	▽	2	20	4
5	MAQUINADO DE TERMINALES	FRESADORA	●	→	■	D	▽	2	28	2
6	CORTE DE PLACAS	SIERRA	●	→	■	D	▽	3	14	1
7	SOLDADURA DE ELEMENTOS	MIG	●	→	■	D	▽	4	36	4
8	PULIDO	AMOLADORA	●	→	■	D	▽	2	36	1

Fuente: Autores

4.5.3 Proceso 3

Tabla 7. Diagrama de procesos del soporte del motor

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN PUSH-ROD PARA VEHÍCULO F-SAE

<input type="checkbox"/>	MÉTODO ACTUAL	<input type="checkbox"/>	MÉTODO PROPUESTO	FECHA:	
DESCRIPCIÓN DE LA PARTE:		<b>BARRAS PUSH</b>			
DESCRIPCIÓN OPERACIÓN :		<b>CONSTRUCCIÓN</b>			
		<b>ACTUAL</b>	<b>PROPUESTO</b>	<b>DIFERENCIA</b>	<b>ANÁLISIS</b>
		TIEMPO	NÚM	TIEMPO	NÚM
○	<b>OPERACIONES</b>	4,00	41,00		
→	<b>TRANSPORTE</b>	2,00	3,00		
□	<b>INSPECCIONES</b>	0,50	38,00		
D	<b>RETRAZOS</b>	1,00	1,00		
▽	<b>ALMACENAMIENTO</b>	0,00	00,00		
<b>DIST. RECORRIDA (KM)</b>		4,022			

ESTUDIADO POR:  
Arellano C.  
Taday E.

PASO	DETALLES DEL PROCESO	MÉTODO	OPERACIÓN	TRANSPORTE	INSPECCIÓN	RETRASO	ALMACENAMIENTO	DIST. (m)	CANTIDAD	TIEMPO (HORAS)
1	ADQUISIÓN DE MATERIALES	VEHÍCULO	●	→	□	D	▽	4000	3	3
2	MEDICIÓN DE LOS TUBOS	FLEXÓMETRO	●	→	■	D	▽	2	4	0.5
3	CORTE DE TUBERÍAS	SIERRA DE MANO	●	→	■	D	▽	5	2	0,5
4	MAQUINADO DE TERMINALES	FRESADORA	●	→	■	D	▽	5	8	1
5	PERFORACION DE TERMINALES	TALADRO	●	→	■	D	▽	3	8	1,5
6	SOLDADURA EN LA TUBERÍA	MIG	●	→	■	D	▽	5	8	1
7	PULIDO	AMOLADORA	●	→	■	D	▽	2	8	1

Fuente: Autores

#### 4.6 Pruebas realizadas

Se efectuaron pruebas referentes al diseño de la suspensión aplicando cargas externas y determinando el factor de seguridad de cada elemento con la finalidad de validar o no la selección de los materiales y la geometría de los mismos.

Después de adquirir los materiales y construir los elementos de la suspensión, se realiza la prueba de ensamblaje en el chasis para verificar si el dimensionamiento en el diseño fue correcto y no existan interferencias entre los componentes entre sí y también con el chasis.

La comprobación de los movimientos de los componentes se efectúa con el fin de comprobar los grados de libertad que van a presentar los elementos en el momento que el vehículo atraviese una irregularidad en el camino. En la suspensión push rod, se verifica primero que los brazos inferiores empujen a la barra que transmite el movimiento rotacional a los rockers, después de constatar lo dicho se colocan los amortiguadores.

#### 4.7 Análisis de resultados

Tabla 8. Resultados obtenidos

<b>INVESTIGACIÓN</b>			
<b>Se recopiló la información necesaria</b>			✓
<b>Se estudió el reglamento y parámetros de la Fórmula SAE</b>			✓
<b>DISEÑO</b>			
<b>ELEMENTO</b>	<b>MATERIAL / MARCA</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD/ resistencia</b>	<b>SOPORTA LAS CARGAS</b>
<b>Rocket</b>	ASTM A-36	8,73	✓
<b>Mangueta</b>	ASTM A-36	15	✓
<b>Barra push</b>	ASTM A500	15	✓
<b>Mesa sin anclaje</b>	ASTM A500	1,6	✓
<b>Mesa con anclaje</b>	ASTM A500	6,13	✓
<b>Barra estabilizadora</b>	ASTM A500	5,04	✓
<b>Amortiguador</b>	DNM performance	550 Lbs.	✓
<b>CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE</b>			

<b>ELEMENTO</b>	<b>EXISTEN INTERFERENCIAS CON OTROS ELEMENTOS</b>	<b>LIBERTAD DE MOVIMIENTO</b>
<b>Rocket</b>	-	✓
<b>Mangueta</b>	-	✓
<b>Barra push</b>	-	✓
<b>Mesa sin anclaje</b>	-	✓
<b>Mesa con anclaje</b>	-	✓
<b>Barra estabilizadora</b>	-	✓
<b>Amortiguador</b>	-	✓

Fuente: Autores

**4.7.1** *Resumen de datos obtenidos.* De acuerdo a los factores de seguridad obtenidos de los elementos, se determina que los elementos resistirán si inconvenientes los esfuerzos generados en la suspensión cuando el vehículo se encuentra en su funcionamiento y atraviesa obstáculos en el camino.

El diseño está basado en las condiciones permitidas en el reglamento de la Fórmula SAE. Cabe señalar que, al aplicar las cargas en el software para determinar su resistencia, los valores simulados fueron puestos en una circunstancia crítica, es decir si vehículo va en una curva pasa por obstáculo y frena instantáneamente, sin embargo, el factor de seguridad fue mayor que 1, así es posible determinar la resistencia de cada material elegido.

Las dimensiones de cada componente del sistema, la geometría y el material del que se encuentran constituidos son los adecuados ya que no sufrirán fracturas en el funcionamiento del vehículo.

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE COSTOS

#### 5.1 Costos directos

Los costos directos se asocian con el producto de una forma muy clara para conocer con exactitud la cantidad de dinero que va al producto o servicio. Los más habituales son mano de obra y materia prima.

Tabla 9. Costos directos

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
1	Alambre soldadora	40,00	40,00
2	Discos de corte y desbaste	10,00	20,00
1	Pintura base	10,00	10,00
1	Pintura poliuretano	35,00	35,00
5	Tubo ASTM A500 d= 1 plg x 2 mm	5,00	20,00
2	Tubo ASTM A500 d=1plg ½ x 2mm	8,00	16,00
1	Plancha acero A-36	25,00	25,00
4	Amortiguadores DNM performance	160,00	640,00
20	Pernos	1,50	30,00
12	Rotulas Sakac	20,00	240,00
<b>Total</b>			<b>1076,00</b>

Fuente: Autores

A continuación, se detallan la lista de costos por hora de utilización de equipo.

Tabla 10. Costos por utilización de equipos

<b>Descripción</b>	<b>Costo por hora (USD)</b>	<b>Hora-equipos</b>	<b>Valor (USD)</b>
Torno	5,00	10	50,00
Dobladora de tubos	18,00	1	18,00
Fresadora	5,00	10	50,00
Amoladora	0.50	60	30,00
Soldadora mig/mag	2.00	24	48,00
<b>TOTAL</b>			<b>196,00</b>

Fuente: Autores

Los costos de mano de obra se dan por el proceso de soldadura y la preparación de cortes en los tubos:

Tabla 11. Costos por mano de obra

<b>Descripción</b>	<b>Salario real Hora</b>	<b>Hora-hombre</b>	<b>Valor (USD)</b>
Soldador	10,00	15	150,00
Biselado de piezas	3,00	10	30,00
Maestro	2,00	60	120,00
<b>Total</b>			<b>300,00</b>

Fuente: Autores

## 5.2 Costos indirectos

Son los costos que no influyen directamente al producto, es decir que son intangibles como por ejemplo el costo del tiempo dedicado a una actividad, el costo del combustible o la energía.

Tabla 12. Costos indirectos

<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
Capacitación	\$100,00
Imprevistos	\$50,00
Movilización y estadía	\$200,00
Reproducción del proyecto	\$100,00
Encuadernación	\$50,00
Impresiones y copias	\$50,00
Documentación	\$100,00
<b>Total</b>	<b>\$650,00</b>

Fuente: Autores

### 5.3 Costo total

Tabla 13. Costo total

<b>Costos directos</b>		
	Materiales	\$1076,00
	Equipos	\$196,00
	Mano de obra	\$300,00
Total costos directos:		\$1572,00
<b>Costos indirectos</b>		
	Total costos indirectos	\$650,00
Total costos (USD):		<b>\$2222,00</b>

Fuente: Autores

## **CAPÍTULO VI**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 Conclusiones**

Al realizar el análisis de la suspensión del tipo Push-Rod para el vehículo de Fórmula SAE, se determinó que cada uno de los elementos resistirá a todos los esfuerzos ocasionados en el funcionamiento del prototipo ya que el factor de seguridad mínimo es 1,6 en la mesa sin anclaje y el máximo es 15 en las manguetas y la barra push, considerando que se tomaron en cuenta valores de esfuerzos críticos elevados para obtener un diseño seguro.

La selección de los materiales empleados en la construcción se efectuó tomando en consideración factores como costo, disponibilidad y ubicación. Es así que se realizó la adquisición de acero ASTM A500 para los elementos tubulares y ASTM A36 para los rockers y platinas de anclaje de la suspensión al chasis y 4 amortiguadores con una resistencia de 550 lb en cada neumático constituyendo una suspensión segura y eficiente.

Se realizó una amplia y detallada investigación en fuentes bibliográficas, páginas de internet, manuales y el reglamento de Fórmula SAE adquiriendo un elevado grado de conocimiento en lo referente al sistema de suspensión de un vehículo y realizando un adecuado desarrollo del proyecto.

Todos los elementos del sistema de suspensión se adaptaron sin inconvenientes al chasis, permitiendo así la implementación del resto de sistemas que permitan su funcionamiento.

#### **6.2 Recomendaciones**

La construcción de los sistemas de un prototipo se debería realizar en simultáneo, con la finalidad de rectificar la ubicación de algún componente en caso que interfiera con el libre funcionamiento de otro.

Se recomienda emplear factores críticos en los análisis de esfuerzos en el software empleado con la finalidad de obtener un diseño confiable.

Analizar diversas alternativas en lo que se refiere a adquisición de materiales con la finalidad de obtenerlos en el menor tiempo posible, un costo favorable y lo más importante que cumpla con las características necesarias. Si algún elemento se va a importar, asegurarse de que el proveedor sea confiable.

Utilizar la indumentaria de seguridad industrial necesaria con la finalidad de evitar posibles accidentes en el desarrollo de las actividades de construcción o maquinado en el taller.

## BIBLIOGRAFÍA

**CHRIS LONGHURST.** *The suspension bible* [En línea]. Chris Longhurst, mayo del 2016. [Consulta: 15 de Diciembre del 2015]. Disponible en: [http://www.carbibles.com/suspension\\_bible.html](http://www.carbibles.com/suspension_bible.html).

**AFICIONADOS A LA MECÁNICA.** *Sistema de Frenos*. [En línea] 2014. [Consulta: 26 de Julio del 2015]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/frenos-1.htm>.

**AGUILAR, Julio.** *Verificación y diagnóstico suspensión y dirección del vehículo*. Quito-Ecuador, 2015, pp 58-60.

**ALONSO, J.M.** *Técnicas del automóvil*. Madrid-España: Paraninfo, 2007, pp 97-101.

**BOSCH.** *Manual de la técnica del automóvil*. Barcelona-España: Reverté S.A, 1999, pp 33-35.

**CARAGUAY, Andrés; & CARAGUAY, Javier.** *Diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplaça para la competencia Fórmula Student*. Cuenca-Ecuador, 2015, pp 67-68.

**CEAC.** *Técnica actual del automóvil*. 2005, pp 89-91.

**CÓRDOVA, Jaime.** *Método de diseño del sistema de suspensión de un vehículo de competencia Fórmula SAE*. México, 2012, pp 125-126.

**CROUSE, William.** *Mecánica del Automóvil*. Mexico: Marcombo, 1990, pp 56-57.

**DELMAR; & THOMSON.** *ASE Test Prep Series -- Automobile (A8)*. Automotive Engine Performance, 1998, pp 253-256.

**DÍAZ, Jose.** *Geometría y ángulos en las ruedas*. [En línea] 2015. [Consulta: 2 de Agosto del 2015]. Disponible en: <http://joseantonioidiazcfsd.blogspot.com/2015/05/geometria-y-angulos-en-las-ruedas.html>.

**DNM.** *Amortiguadores para bicicletas BURNER-RCP 2*. [En línea] 2013. [Consulta: 24 de Septiembre del 2015]. Disponible en: [http://www.dnmshock.com/spa/products.php?func=p\\_detail&p\\_id=82&pc\\_parent=5](http://www.dnmshock.com/spa/products.php?func=p_detail&p_id=82&pc_parent=5).

**EBAY.** *Dnm Montaña Downhill Bicicleta Amortiguador Trasero 210mm 550 Libras*. [En línea] 2015. [Consulta: 12 de Octubre del 2015]. Disponible en: [http://www.ebay.com/itm/DNM-Mountain-Downhill-Bike-Rear-Shock-210mm-550-lbs-/361132476395/?\\_ul=EC](http://www.ebay.com/itm/DNM-Mountain-Downhill-Bike-Rear-Shock-210mm-550-lbs-/361132476395/?_ul=EC).

**ERJAVEC, Jack.** *Today's Technician: Manual Transmissions and Transaxles.* Delmar, 2010, pp 220-225

**FORMULA 1.** *Suspension and steering systems* [En línea] 2016. [Consulta: 17 de Agosto del 2015]. Disponible en: [https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Suspension\\_and\\_steering\\_systems.html](https://www.formula1.com/content/fom-website/en/championship/inside-f1/rules-regs/Suspension_and_steering_systems.html).

**GABRIEL AMORTIGUADORES Y STRUTS.** *Funcionamiento del amortiguador* [En línea] 2016. [Consulta: 2 de septiembre del 2015]. Disponible en: <http://www.gabriel.com.mx/ES/Asesoriatecnica/Paginas/Funcionamientodelamortiguador.aspx>.

**GALVES, Remigio.** *Manual de Seguridad* [En línea] 2002. [Consulta: 10 de Enero del 2016]. Disponible en: [www.esPOCH.edu.com](http://www.esPOCH.edu.com).

**GESUMARÍA, Eduardo.** *Historia del automovilismo de Córdoba.* Cordoba-Argentina: University of Texas, 2007, pp 77-80.

**GP TECHNICAL.** *Toyota TF106B* [En línea] 2006. [Consulta: 6 de Noviembre del 2015]. Disponible en: <http://www.f1technical.net/f1db/cars/911/toyota-tf106b>.

**INSTITUTO DISTRITAL DE RECREACIÓN Y DEPORTE DE BOGOTÁ.** *Manual de especificaciones técnicas de diseño y construcción de parques y escenarios públicos de bogotá d.c. materiales de mobiliario* [En línea] 1999. [Consulta: 13 de Noviembre del 2015]. Disponible en: [http://www.idrd.gov.co/especificaciones/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2291&Itemid=1839](http://www.idrd.gov.co/especificaciones/index.php?option=com_content&view=article&id=2291&Itemid=1839).

**IPAC. 2014.** *Catálogo IPAC productos y servicios* [En línea] 2014. [Consulta: 28 de Septiembre del 2015]. Disponible en: [http://www.ipac-acero.com/revista-digital/IPAC\\_catalogo.html](http://www.ipac-acero.com/revista-digital/IPAC_catalogo.html).

**NOBLE, Jonathan; & HUGHES, Mark.** *Formula One Racing for Dummies.* Jhon Wiley & Sons LTD, 2004, pp. 102-103.

**LEARNING; & DELMAR.** *Automotive Suspension and Steering.* 2002. pp 24-26.

**LUQUE, Pablo; & ÁLVAREZ, Daniel.** *Sistemas y Comportamiento Dinamico.* Madrid-España: Paraninfo, 2012, pp 233-240.

**CALVO, Martín.** *Mecánica del automóvil actua.* Zaragoza-España 1997, pp 55-56.

**MILLIKEN, William; & MILLIKEN, Douglas.** *Race Car Vehicle Dynamics.* 1995, pp 203-205.

**GOMEZ, Tomás.** *Estructuras del vehículo*. Madrid-España: Praninfo, 2011, pp 245-247.

**LUQUE, Pablo; & ALVAREZ Daniel.** *Ingeniería del automóvil*. Madrid-España: Paraninfo, 2007, pp 107-108.

**QUISPE; & DIONICIO GUTIERREZ.** *Monografías* [En línea] 2013. [Consulta: 23 de Julio del 2015]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos95/sistema-suspension-direccion-y-frenos/sistema-suspension-direccion-y-frenos3.shtml>.

**REMLING, John.** *Steering and suspension*. 1978, pp 35-37.

**FORMULA SAE.** *About Formula SAE® Series* [En línea]. Alemania: Formula SAE, 2014. [Consulta: 23 de Junio del 2015]. Disponible en: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/about/>.

**FORMULA SAE.** *Reglamento* [En línea]. Alemania: Formula SAE, 2014. [Consulta: 21 de Junio del 2015]. Disponible en: [http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf).

**MARKCHANG.** "Tertulias de Fórmula 1". *Suspensiones en Formula 1*. n° 135 (2011), pp. 2-5.

**TAURO TECNOLOGÍA AUTOMOTRIZ.** *La importancia de este servicio* [En línea] 2016. [Consulta: 5 de Diciembre del 2015]. Disponible en: [http://tauroautomotriz.com.mx/listings\\_portfolio/amortiguadores-y-suspensiones/](http://tauroautomotriz.com.mx/listings_portfolio/amortiguadores-y-suspensiones/).

**WIKIPEDIA.** *Aparatos Eléctricos* [En línea] 2013. [Consulta: 3 de Febrero del 2016]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Aparato\\_el%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Aparato_el%C3%A9ctrico).

**WIKIPEDIA.** *Formula SAE* [En línea] 2009. [Consulta: 7 de Agosto del 2015]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Formula\\_SAE](https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE).