

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**

Casa abierta al tiempo



Azcapotzalco



CBIA

Licenciatura en Ingeniería Mecánica

Modalidad: Proyecto Tecnológico

Diseño y construcción del sistema de suspensión para el
vehículo 4x4 BAJA SAE UAM 2024.

Alumno: José Alejandro López Azamar

Matrícula: 2202004422

Asesores:

Ing. Romy Pérez Moreno

Dr. Francisco Beltrán Carbajal

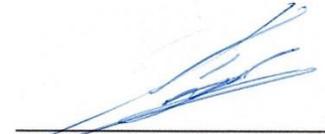
Dr. Iván González Uribe

Trimestre 24-O

Ciudad de México, enero 2025

Declaratoria

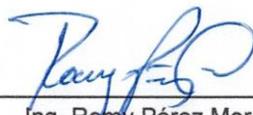
Yo, José Alejandro López Azamar, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



José Alejandro López Azamar

Declaratoria

Yo, Ing. Romy Pérez Moreno, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Ing. Romy Pérez Moreno

Declaratoria

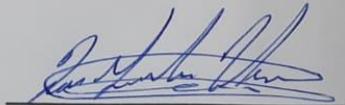
Yo, Dr. Francisco Beltrán Carbajal, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Francisco Beltrán Carbajal

Declaratoria

Yo, Dr. Iván González Uribe, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Iván González Uribe

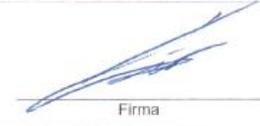
AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: Fecha: PI-A-MEC

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Matricula:
 Correo personal:


Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa:
 No. económico: Adscripción/Departamento/Sección:
 Área de investigación:
 Correo institucional:


Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal:
 No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto:
 Área de investigación/Departamento:
 Correo electrónico:

Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

Proyecto tecnológico Proyecto de investigación Estancia profesional Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: No Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	<input checked="" type="checkbox"/> SI	Inicio <input type="text" value="24P"/>
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II	<input type="checkbox"/>	Término <input type="text" value="24Q"/>
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica	<input type="checkbox"/>	

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

 Ing. Romy Pérez Moreno



Sello de Coordinación de Estudios

Originales: Coordinador de Estudios; Coordinación de Sistemas Escolares.
 Copias: Alumno; Asesor(es).

Revisión: Octubre 2021

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA



PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: Fecha: PI-A-MEC

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Matrícula:

Correo personal:


Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa:

No. económico: Adscripción/Departamento/Sección:

Área de investigación:

Correo institucional:


Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal:

No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto:

Área de investigación/Departamento:

Correo electrónico:


Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

Proyecto tecnológico Proyecto de investigación Estancia profesional Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: No Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	<input type="text" value="SI"/>	Inicio <input type="text"/>
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II	<input type="text"/>	24P <input type="text"/> Término <input type="text"/>
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica	<input type="text"/>	24O <input type="text"/>

<p>Nombre y firma del Coordinador de Estudios</p> <p> Ing. Rofny Pérez Moreno</p>	<p></p> <p>Sello de la Coordinación de Estudios</p>
--	--

Originales: Coordinador de Estudios; Coordinación de Sistemas Escolares.
 Copias: Alumno; Asesor(es).

Revisión: Octubre 2021

Agradecimientos

Este trabajo es dedicado y lleva agradecimiento junto con la carrera a:

Mis padres, José Francisco López Díaz y Andrea del Carmen Azamar de la Rosa y a mi abuela, Emilia Díaz Uscanga quienes desde niño me han apoyado a cumplir mis metas y nunca me han dejado solo.

A mis hermanos, Andrés y Emily, por estar siempre conmigo, por apoyarme en los momentos de la pandemia en donde solo podíamos convivir entre nosotros.

Al resto de mi familia, tíos, primos, abuelos y otros amigos que son parte de mi familia.

A mis amigos de la UAM, Marcos, Christian, Nelly, Sofía, Gabriel y Freddy. Gracias a quienes la etapa de la Universidad a sido más divertida, amena y satisfactoria, les tengo un gran aprecio a todos ustedes.

A mis compañeros y amigos del BAJA SAE, con quienes conviví y trabajé seis meses, en donde hubo apoyo mutuo en todos los sentidos, tanto personal, como laboral y académico para lograr juntos culminar este proyecto.

A los amigos que, hecho a lo largo de mi vida académica, Berenice, Dylan, Víctor, Jesús, Andrea, Angel, Esteban, Alberto y Alec, por haberme apoyado en las distintas etapas escolares y contribuir a ser quien soy.

A mis asesores, el ingeniero Romy Pérez Moreno, el doctor Francisco Beltrán Carbajal y el doctor Iván González Uribe.

Y en general a todas las personas que me han dado su cariño y me han apoyado a seguir cumpliendo mis metas.

A todos, muchas gracias.

Resumen

En este proyecto, se diseñó, modeló, construyó y probó el sistema de suspensión para el vehículo BAJA SAE UAM 2024, una competencia en la que el vehículo se somete a pruebas que explotan el rendimiento de diversos sistemas del vehículo. Los sistemas utilizados fueron doble horquilla adelante y McPherson atrás. Se enfocó en que los componentes del sistema fuesen más ligeros que lo del vehículo antecesor, además de una mayor altura del vehículo, ambas cosas se lograron, con el objetivo de mejorar el desempeño de la suspensión en la competencia. Debido a inconvenientes técnicos como fallas en el motor, el vehículo no se pudo probar en la competencia. Sin embargo, el vehículo se probó dentro de las instalaciones de la UAM Azcapotzalco. Se tuvo un desempeño funcional de la suspensión en las pruebas a las que se le sometió al vehículo.

Índice

1	Introducción.....	18
2	Antecedentes	19
3	Justificación.....	19
4	Objetivos	20
4.1	Objetivo general:	20
4.2	Objetivos particulares:	20
5	Marco teórico	20
5.1	Sistema de Suspensión	20
5.2	Tipos de suspensiones	20
5.2.1	Suspensión rígida	20
5.2.2	Suspensión independiente.....	20
5.3	Sistemas de suspensión.....	21
5.3.1	Suspensión de McPherson	21
5.3.2	Doble horquilla	21
5.3.3	Multilink.....	21
5.4	Elementos de la suspensión	21
5.4.1	Amortiguadores	21
5.4.2	Amortiguadores hidráulicos.....	21
5.4.3	Amortiguadores de doble tubo.	21
5.4.4	Amortiguadores regulables en dureza.....	21
5.4.5	Amortiguadores regulables en suspensión	22
5.4.6	Amortiguadores de frecuencia selectiva.....	22
5.4.7	Resortes	22
5.4.8	Horquillas o brazos de control.....	22
5.4.9	Rótulas	22
5.5	Mecanismos	22
5.5.1	Mecanismo de cuatro barras.....	22
5.5.2	Identidad de Euler.....	23
5.5.3	Condición de Grashof	23
5.6	Tolerancias dimensionales.....	23
5.6.1	Tolerancias dimensionales	23

5.6.2	Dimensión nominal	23
5.6.3	Dimensiones límite.....	23
5.6.4	Intervalo de tolerancias	23
5.6.5	Ajuste.....	23
5.6.6	Ecuaciones de tolerancias	23
5.7	Elementos de la simulación	24
5.8	Vibraciones mecánicas.....	24
5.9	Función de transferencia	24
5.9.1	Respuesta transitoria	25
5.9.2	Respuesta estacionaria.....	25
6	Desarrollo del proyecto	26
6.1	Modelo dinámico de la suspensión del vehículo	26
6.1.1	Simulación del sistema en Matlab.....	29
6.2	Diseño del sistema de suspensión del vehículo.....	30
6.2.1	Suspensión delantera	30
6.2.2	CAD de los elementos de la suspensión delantera	30
6.2.2.1	Horquilla Superior	30
6.2.2.2	Horquilla Inferior.....	32
6.2.2.3	Orejas delanteras.....	33
6.2.2.4	Soportes de amortiguador delanteros	36
6.2.2.5	Simulación de impacto	38
6.2.2.6	Simulación de caída sobre una sola llanta	39
6.3	Mecanismo de la suspensión.....	40
6.3.1	Diseño del mecanismo.....	40
6.3.2	Rango de movimiento en los ángulos de las horquillas θ_2 y θ_3	41
6.3.3	Desplazamiento angular máximo de las horquillas.....	44
6.3.4	Mecanismo gráfico de la suspensión delantera.....	45
6.3.4.1	Mecanismo con amortiguador extendido.....	46
6.3.4.2	Mecanismo con amortiguador comprimido	46
6.3.4.3	Condición de Grashof del mecanismo de cuatro barras	47
6.3.5	Materiales de los elementos del sistema de suspensión delantera	48
6.3.5.1	Presentaciones en los materiales de los elementos	48
6.3.5.2	Dimensiones de los materiales.....	48

6.3.5.3	Materiales	51
6.3.6	Sistema de suspensión trasero	51
6.3.7	CAD de los elementos de la suspensión trasera	51
6.3.7.1	Horquilla trasera.....	52
6.3.7.2	Brazo oscilante	53
6.3.7.3	Orejas traseras	54
6.3.7.4	Soporte trasero del amortiguador.....	56
6.3.8	Simulaciones del sistema de suspensión trasera	57
6.3.8.1	Simulación de impacto	58
6.3.8.2	Simulación de caída sobre una sola llanta	59
6.3.9	Soporte de amortiguador de la suspensión trasera	60
6.3.10	Mecanismo gráfico de la suspensión trasera	62
6.3.10.1	Mecanismo con amortiguador extendido	62
6.3.10.2	Mecanismo con amortiguador comprimido	63
6.3.10.3	Condición de Grashof.....	63
6.3.11	Materiales de los elementos de la suspensión trasera	64
6.3.11.1	Presentación de los materiales.	64
6.3.11.2	Dimensiones de los materiales.....	65
6.3.11.3	Materiales.	65
6.4	Manufactura y selección de los elementos del sistema.....	66
6.4.1	Tolerancias dimensionales	66
6.4.1.1	Grupo de juegos	66
6.4.1.2	Obtención de la tolerancia del árbol-agujero	66
6.4.1.3	Juego máximo, juego mínimo y tolerancia funcional	66
6.4.2	Componentes de la suspensión delantera	67
6.4.2.1	Horquillas delanteras	67
6.4.2.2	Orejas	70
6.4.2.3	Soportes	71
6.4.2.4	Elementos comerciales para seleccionar	71
6.4.3	Componentes de la suspensión trasera	71
6.4.3.1	Horquilla trasera.....	71
6.4.3.2	Brazo oscilante	72
6.4.3.3	Orejas	72

6.4.3.4	Soportes	73
6.4.3.5	Elementos comerciales para seleccionar	73
6.4.4	Componentes comunes en los dos sistemas	73
6.4.4.1	Bujes.....	73
6.5	Implementación del sistema en el vehículo.....	73
6.5.1	Soldadura de soportes y orejas en el vehículo.....	73
6.5.1.1	Alineación de las horquillas y concetricidad de las horquillas delanteras	73
6.5.1.2	Colocación y soldadura de las orejas.....	73
6.5.1.3	Colocación y soldadura de los soportes de amortiguador y brazo oscilante ...	73
6.5.2	Ensamble de los elementos del sistema	74
6.5.2.1	Suspensión delantera	74
6.5.2.2	Suspensión trasera	74
6.6	Validación del sistema y participación en la competencia BAJA SAE MÉXICO 2024.	74
6.7	Planos	76
7	Resultados	82
7.1.1	Función de transferencia.....	82
7.2	Modelo dinámico del sistema.....	82
7.3	Diseño de los elementos	83
7.3.1	Simulaciones de la suspensión delantera	83
7.3.2	Materiales y dimensiones de la suspensión delantera	84
7.3.3	CAD de la suspensión delantera.....	85
7.3.4	Simulaciones de la suspensión trasera.....	87
7.3.5	Simulaciones de soporte de amortiguador trasero	88
7.3.6	Materiales y dimensiones de la suspensión trasera	90
7.3.7	CAD de la suspensión trasera.....	91
7.4	Manufactura y selección de materiales.....	93
7.4.1	Tolerancias dimensionales	93
7.4.2	Resultados del peso de los principales elementos de la suspensión	95
7.4.3	Resultados de la longitud de los elementos de la suspensión.....	95
7.4.4	Elementos de la suspensión delantera.....	96
7.4.5	Elementos de la suspensión trasera	98
7.5	Implementación del sistema en el vehículo.....	101
7.5.1	Ensamble de la suspensión delantera.....	101

7.5.2	Ensamble de la suspensión trasera	102
7.5.3	Resultados de la altura de la suspensión, <i>track</i> con el ensamble real y la simulación.	103
7.5.4	Otros resultados del ensamble.....	103
7.6	Validación del sistema de suspensión del vehículo.....	104
7.6.1	Prueba de vehículo en movimiento	104
7.6.2	Prueba de suspensión del vehículo	104
8	Análisis y discusión de resultados	104
8.1	Comparación entre dimensiones de manufactura reales y simuladas.....	104
8.2	Comparación en dimensiones del vehículo.....	104
8.3	Análisis de las pruebas del vehículo	104
9	Conclusiones.....	105
10	Referencias Bibliográficas	105
11	Apéndices	108
	Apéndice 1 brocas y machuelos UNC.	108
	Apéndice 2.....	108
	Apéndice 3.....	109
	Apéndice 4. Juegos y aprietes [18].....	110
12	Entregables comprometidos en la propuesta.....	110

Índice de Figuras

Figura 1.1	Ángulo de camber.	18
Figura 5.1	Mecanismo de cuatro barras.	22
Figura 5.2	Gráfica de una vibración mecánica	24
Figura 6.1	Esquema de un cuarto de vehículo.	26
Figura 6.2	Diagramas de cuerpo libre.	27
Figura 6.3	Miembro Estructural FBM en la jaula.....	31
Figura 6.4	Dimensiones de la horquilla superior.....	31
Figura 6.5	Vista Isométrica de la horquilla superior.	32
Figura 6.6	CAD con dimensiones de la horquilla inferior.	32
Figura 6.7	Vista Isométrica de la horquilla inferior.	33
Figura 6.8	Dimensión “a” de las orejas delanteras.	33
Figura 6.9	Valor mínimo de “a” para el uso de tornillos de 3/8 in.	34
Figura 6.10	Polígono de orejas para horquilla superior.	34
Figura 6.11	Polígono de orejas para horquilla inferior.....	35
Figura 6.12	Vista isométrica de oreja.	35
Figura 6.13	Dimensiones del soporte.....	36

Figura 6.14 Vista Isométrica del soporte.....	37
Figura 6.15 Simulación de impacto.	38
Figura 6.16 Simulación de caída sobre una llanta.....	39
Figura 6.17 Diagrama del mecanismo de suspensión delantero.	40
Figura 6.18 Diagrama del mecanismo con amortiguador.	41
Figura 6.19 Vectores biela-manivela-corredera.....	42
Figura 6.20 Esquema del mecanismo de suspensión delantera.....	45
Figura 6.21 Mecanismo de suspensión delantero con el amortiguador extendido a 18.24 pulgadas.	46
Figura 6.22 Mecanismo de suspensión delantero con el amortiguador comprimido a 12.9 pulgadas.	46
Figura 6.23 Estado del mecanismo de suspensión delantero en reposo (longitud del amortiguador en 17.9 in).	47
Figura 6.24 Dimensiones del tubo.....	49
Figura 6.25 Dimensiones de la barra sólida.	49
Figura 6.26 Dimensiones PTR.	50
Figura 6.27 Dimensiones de la solera.	50
Figura 6.28 Dimensiones obtenidas para la horquilla trasera.	52
Figura 6.29 Vista isométrica de la horquilla trasera.	53
Figura 6.30 Dimensión del brazo oscilante.....	54
Figura 6.31 Vista isométrica del brazo oscilante.	54
Figura 6.32 Dimensión “a” en las orejas de la suspensión trasera.	55
Figura 6.33 Polígono de orejas traseras.....	55
Figura 6.34 Miembro estructural FAB.....	56
Figura 6.35 Dimensiones para el soporte de amortiguador trasero.	57
Figura 6.36 Vista isométrica del soporte de amortiguador trasero.....	57
Figura 6.37 Cargas, puntos fijos y mallado de la simulación.	58
Figura 6.38 Cargas, puntos fijos y mallado de la simulación.	59
Figura 6.39 Cargas y puntos fijos en la simulación del soporte.	60
Figura 6.40 Esfuerzos de Von Mises en el soporte y tubo.....	61
Figura 6.41 Esquema de suspensión trasera.	62
Figura 6.42 Estado del mecanismo con la máxima elongación del amortiguador.	63
Figura 6.43 Estado del mecanismo con la máxima compresión del amortiguador.....	63
Figura 6.44 Estado del mecanismo cuando se encuentra a 17.9 in el vehículo.....	64
Figura 6.45 Corte de tubo con la sierra cinta.....	67
Figura 6.46 Maquinado en torno.	68
Figura 6.47 Plantillas boca de pescado horquilla delantera inferior.	69
Figura 6.48 Maquinado de bocas de pescado en la fresadora.....	69
Figura 6.49 Moldes de las horquillas delanteras.	70
Figura 6.50 Maquinado de las orejas en el taladro radial.	70
Figura 6.51 Plantilla boca de pescado de horquilla trasera.	71
Figura 6.52 Molde de la horquilla trasera.	72
Figura 6.53 Prueba de suspensión del vehículo.....	75
Figura 7.1 Respuesta transitoria y estable del sistema.	82

Figura 7.2 Simulación de impacto.	83
Figura 7.3 Simulación de caída sobre una sola llanta.	83
Figura 7.4 Vista isométrica del CAD de la suspensión delantera.....	85
Figura 7.5 Vista frontal del CAD de la suspensión delantera.....	85
Figura 7.6 Vista superior del CAD de la suspensión delantera.....	86
Figura 7.7 Vista lateral del CAD de la suspensión delantera.	86
Figura 7.8 Resultados de la simulación de caída sobre una sola llanta.....	87
Figura 7.9 Simulación de impacto sobre la horquilla trasera.	87
Figura 7.10 Resultado de la simulación sin refuerzo.	88
Figura 7.11 Resultado de la simulación con refuerzo superior.....	88
Figura 7.12 Resultado de la simulación con refuerzo superior e inferior.....	89
Figura 7.13 Resultado de la simulación con refuerzo superior, inferior y laterales.....	89
Figura 7.14 Vista isométrica del CAD de la suspensión trasera.	91
Figura 7.15 Vista superior del CAD de la suspensión trasera.....	92
Figura 7.16 Vista lateral derecha del CAD de la suspensión trasera.	92
Figura 7.17 Vista frontal del CAD de la suspensión trasera.....	93
Figura 7.18 Horquilla delantera derecha.	96
Figura 7.19 Horquilla delantera izquierda.....	96
Figura 7.20 Orejas de la suspensión delantera.	97
Figura 7.21 Soporte del amortiguador delantero.	97
Figura 7.22 Rótulas seleccionadas para la suspensión delantera 1/2-20 NF.....	98
Figura 7.23 Horquilla trasera.....	98
Figura 7.24 Brazo oscilante.....	99
Figura 7.25 Orejas traseras.....	99
Figura 7.26 Soporte de amortiguador trasero.....	100
Figura 7.27 Rótulas seleccionadas de la suspensión trasera 3/8-24 NF.	100
Figura 7.28 Sistema de suspensión delantero en el lado izquierdo del vehículo.	101
Figura 7.29 Sistema de suspensión delantero en el lado derecho del vehículo.....	101
Figura 7.30 Sistema de suspensión delantero desde una vista frontal al vehículo.	102
Figura 7.31 Sistema de suspensión delantero en el lado izquierdo del vehículo.	102
Figura 7.32 Sistema de suspensión delantero en el lado derecho del vehículo.	103

Índice de tablas

Tabla 6.1 Valores “a” de las orejas.	35
Tabla 6.2 Presentaciones del material para los elementos del sistema.	48
Tabla 6.3 Dimensiones obtenidas de las simulaciones para cada presentación de los materiales con su letra correspondiente en las Figuras 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27.	48
Tabla 6.4 Propiedades y características mecánicas de los aceros 1020, 1018 y 1518.	51
Tabla 6.5 Dimensiones de las orejas traseras.	56
Tabla 6.6 Presentaciones de los materiales de la suspensión trasera.	65
Tabla 6.7 Figuras correspondientes para las dimensiones de cada presentación.	65
Tabla 7.1 Materiales y sus dimensiones, para la fabricación de las piezas de la suspensión delantera.	84
Tabla 7.2 Dimensiones de las piezas de los elementos del sistema de suspensión.	84
Tabla 7.3 Materiales y sus dimensiones, para la fabricación de las piezas de la suspensión trasera.	90
Tabla 7.4 Dimensiones de las piezas de los elementos del sistema de suspensión.	90
Tabla 7.5 Pesos de los elementos del sistema de suspensión.	95

1 Introducción

En este documento se propone diseñar el sistema de suspensión para el vehículo BAJA SAE 2024, con el objetivo de que este vehículo participe en la competencia BAJA SAE MÉXICO 2024. BAJA SAE es una competencia realizada por la Society of Automotive Engineers (SAE) International, en la cual, equipos universitarios realizan el diseño y construcción de vehículos 4x4. Lo desarrollado es sometido a un conjunto de distintas pruebas en las que se valoran diversos aspectos de este, como su adaptabilidad a distintos terrenos o su manejabilidad [1].

Se buscará desarrollar un sistema de suspensión para las pruebas a realizar en la competencia 2024, realizando cálculos y simulaciones para diseñarlo. En el año 2023, se utilizaron dos sistemas de suspensión para el vehículo: uno de doble horquilla en la suspensión delantera y otro de una horquilla y brazo oscilante en la suspensión trasera. Dicha suspensión tuvo un desempeño satisfactorio, por lo cual se tomará como base para el diseño del nuevo vehículo. Sin embargo, es necesario aumentar la altura de la suspensión para poder evadir rocas de gran tamaño.

Otros de los principales cambios que se realizarán incluyen el diseño de elementos como las horquillas, el cual será con base las modificaciones realizadas en otras secciones del vehículo, en donde se obtendrán dimensiones de *track* y *wheelbase*. También se enfocará el diseño en la reducción del peso del vehículo, ya que esto ayudará al frenado y la aceleración de este.

El giro que puede realizar el vehículo es de gran importancia para las pruebas. La capacidad de giro depende de diversos factores, principalmente relacionados con el sistema de dirección. El ángulo de *camber* es un aspecto crucial, ya que determina la inclinación de las llantas del vehículo respecto a su eje vertical real [2]. Modificar el ángulo de *camber* puede permitir una mayor capacidad de giro al vehículo. Para poder modificar dicho ángulo, se requiere un diseño específico de las horquillas. El ángulo de *camber* se observa en la Figura 1.1.

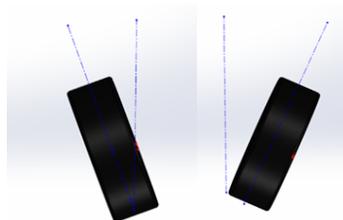


Figura 1.1 Ángulo de camber.

Los recursos necesarios para la construcción provienen de un fondo al que aportan diferentes instancias de la universidad: Rectoría y Secretaría de la Unidad Azcapotzalco, Divisiones de CBI y CyAD, Departamentos de Energía, Electrónica, Ciencias Básicas y Materiales; así como instancias externas (Fundación UAM, empresas privadas, personas físicas).

2 Antecedentes

En 2023, los estudiantes de Ingeniería Mecánica realizaron el diseño y construcción de un sistema de suspensión y dirección para un vehículo BAJA SAE UAM 2023 [3]. La suspensión del vehículo estuvo compuesta por un sistema de doble horquilla en la parte delantera y uno de una horquilla y brazo oscilante en la parte trasera. Se mencionó que el conjunto utilizado para la suspensión dio buenos resultados, así que, será utilizado como punto de referencia para el diseño del vehículo.

En 2022, estudiantes de la Universidad Iberoamericana Puebla publicaron la “Prevención de fallas mecánicas para un vehículo BAJA SAE México 2022” [4], en donde se habla acerca de simulaciones en este tipo de vehículos. Tomando como base el procedimiento de estas simulaciones, se realizarán las necesarias sobre los elementos del sistema de suspensión del vehículo 2024.

En 2014, Armando Sánchez Guzmán y Omar Contreras Nava, en su trabajo acerca del análisis dinámico para la suspensión de un vehículo fórmula SAE [5], se habla de cómo realizar el modelado dinámico del mismo, para obtener las constantes de amortiguamiento y rigidez que se presentan en los elementos del vehículo. Lo obtenido en ese proyecto, será analizado para realizar el modelo dinámico vehículo actual.

3 Justificación

En algunas de las pruebas de la competencia se presentan obstáculos de gran tamaño, lo que ha significado una dificultad para los vehículos anteriores. Aumentar la altura de la suspensión ayudará al vehículo para pasar esos obstáculos con mayor facilidad.

El peso del vehículo influye en su aceleración y frenado, por lo que cambiar los diámetros y longitudes de los elementos del sistema contribuirá a una reducción de peso. Con lo anterior, el vehículo tendrá un mejor desempeño en las pruebas de aceleración y frenado en la competencia.

El ángulo de giro ha sido un problema considerable, ya que el vehículo de 2023 no posee uno adecuado para las pruebas a realizar. Poseer horquillas de longitud adaptable, permitirá modificar el ángulo de *camber* para reducir el radio de giro del vehículo. Esta mejora, contribuirá a obtener un desempeño adecuado del vehículo en la competencia 2024.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general:

Diseñar y construir el sistema de suspensión para el vehículo 4x4 BAJA SAE UAM 2024.

4.2 Objetivos particulares:

Realizar el modelo dinámico de la suspensión que describa el sistema para obtener las constantes de amortiguamiento y rigidez del vehículo.

Realizar mediante cálculos y simulación el diseño de los elementos que componen el sistema de suspensión.

Manufacturar y seleccionar los elementos de la suspensión.

Implementar el sistema de suspensión en el vehículo.

Verificar funcionalidad y de ser necesario modificar el sistema en la competencia BAJA SAE México 2024.

5 Marco teórico

5.1 Sistema de Suspensión

La suspensión es un subsistema que evita el efecto de las irregularidades del camino y amortigua las perturbaciones que sufra el vehículo por medio de las llantas. Con lo anterior, se encarga de mantener la estabilidad de este y el confort del pasajero [9].

También, posee la función de mantener las llantas del vehículo pegadas al pavimento, con el objetivo de que el vehículo tenga un mejor comportamiento dinámico [9].

5.2 Tipos de suspensiones

5.2.1 Suspensión rígida

Este tipo de suspensión es de los más antiguos y simples. Consiste en que las ruedas de cada extremo del eje están físicamente conectadas, lo que conlleva a que el movimiento de una afecte directamente a la otra. Este sistema prioriza soportar cargas, por encima del confort del piloto.

5.2.2 Suspensión independiente

La suspensión independiente permite que cada rueda se mueva de forma independiente, lo que mejora significativamente el manejo y confort en comparación con la suspensión rígida.

Esta suspensión, permite que cada rueda se mueva de forma independiente, lo que genera una conducción más estable en superficies irregulares [10]. El movimiento de las ruedas se guía por brazos y en función del número de ellos. Además, tiene mayor ligereza que la suspensión rígida [11].

5.3 Sistemas de suspensión

5.3.1 Suspensión de McPherson

Es un sistema de suspensión compuesto por un brazo de control u horquilla, el amortiguador y un brazo oscilante. Con este sistema, se logra un buen confort durante la conducción. Otras ventajas que ofrece este sistema son: menor peso de las masas no suspendidas y mayor facilidad en el montaje por ser un sistema compacto. Como desventaja este sistema no puede mantener fijo en ángulo de la rueda. [12]

5.3.2 Doble horquilla

Este sistema se compone de dos brazos de control u horquillas conectadas al chasis por un extremo y al neumático por el otro, y el amortiguador, el cual va conectado a alguna de las horquillas. A diferencia de la suspensión de McPherson, esta sí puede mantener fijo el ángulo de la rueda al que se desee implementar.

5.3.3 Multilink

Es un sistema de suspensión compuesto de varios brazos que se une al chasis y al neumático del vehículo por medio de articulaciones. Este sistema provee de un mayor control sobre los movimientos verticales de la rueda. Logra una mayor estabilidad en el manejo, menor desgaste en los neumáticos y mayor confort en la conducción. [13]

5.4 Elementos de la suspensión

5.4.1 Amortiguadores

Son un componente de la suspensión, el cual se encarga de controlar el movimiento excesivo de la carrocería y las llantas, mantener un frenado y conducción uniforme. Apoyan igualmente a reducir el rebote e inclinación del vehículo las llantas, así como, evitar un rápido desgaste de estas. [14]

5.4.2 Amortiguadores hidráulicos

Son de funcionamiento sencillo, aumentando su eficacia al crecer su presión. Se conforman por un cilindro, que se ubica en el aceite, que contiene un pistón con agujeros, en los cuales pasa el aceite.[15]

5.4.3 Amortiguadores de doble tubo.

Consisten en dos tubos diferentes, siendo: el exterior, el cual forma el cuerpo del amortiguador, y el interior, por el que se mueve el pistón. Las válvulas entre los dos tubos y agujeros en el pistón facilitan flujo de aceite cuando está en funcionamiento. [16]

5.4.4 Amortiguadores regulables en dureza

Permiten un uso más flexible según las necesidades del conductor, ya que disponen de una rosca que permite cambiar el tamaño del agujero por donde pasa el aceite.

Se ajustan a las necesidades del conductor, ya que posee una rosca que modifica el tamaño del agujero por donde pasa el aceite. [15]

5.4.5 Amortiguadores regulables en suspensión

Este amortiguador permite ajustar la distancia entre el camino o carretera y la carrocería del coche. [15]

5.4.6 Amortiguadores de frecuencia selectiva

La suspensión se endurece o ablanda por medio de una válvula que se cierra al ingresar presión. La válvula separa los conductos ubicados dentro del pistón. [15]

5.4.7 Resortes

Son elementos de la suspensión que se encargan de absorber las irregularidades de la carretera y mantener una distancia constante entre las ruedas y el chasis, su funcionamiento es como elemento elástico y también tienen como objetivo mantener las llantas en contacto con la superficie del camino. [19]

5.4.8 Horquillas o brazos de control

Son elementos del sistema de suspensión, que se encargan de conectar la carrocería con los neumáticos del vehículo. Tiene como función controlar la posición de la rueda con respecto al chasis del vehículo. [20]

5.4.9 Rótulas

Son los elementos que unen el portabaleros con los brazos de control, permitiendo el movimiento, arriba, abajo y el giro de las ruedas por la dirección. [21]

5.5 Mecanismos

Son un conjunto de elementos mecánicos relacionados, que trabajan juntos para transmitir y transformar movimiento. [22]

5.5.1 Mecanismo de cuatro barras

Es un mecanismo conformado por cuatro eslabones, uno fijo, un acoplador, un seguidor y uno motriz. En la Figura 1 se muestra el mecanismo de cuatro barras.

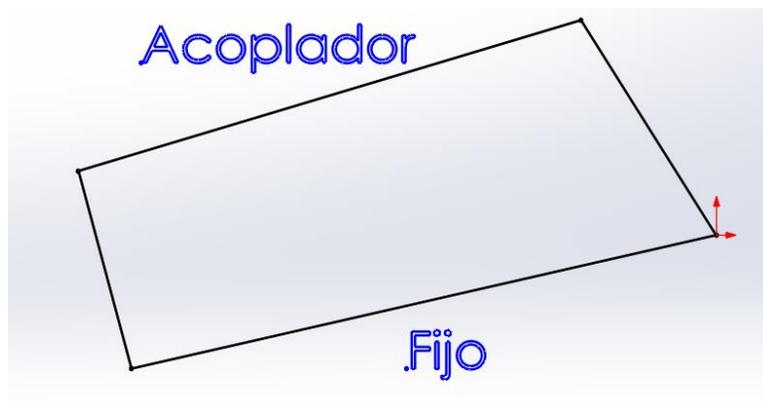


Figura 5.1 Mecanismo de cuatro barras.

5.5.2 Identidad de Euler

La identidad de Euler está dada por la Ecuación 1, esta se utilizará para el análisis del mecanismo de cuatro barras.

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (1)$$

5.5.3 Condición de Grashof

Es una condición en los mecanismos de cuatro barras, para que al menos un elemento, de una revolución completa.

La condición de Grashof está dada por la Ecuación 1

$$S + L \leq P + Q \quad (2)$$

5.6 Tolerancias dimensionales

5.6.1 Tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales, son la cantidad de variación que pueden tener los valores de una dimensión, esto con el objetivo de ensamblar adecuadamente las piezas. [17]

5.6.2 Dimensión nominal

Es el valor que se toma como referencia en la dimensión de la pieza. [18]

5.6.3 Dimensiones límite

Son los valores de las dimensiones externas entre las que se encuentra la dimensión efectiva de la pieza.[18]

5.6.4 Intervalo de tolerancias

Es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de las dimensiones.[18]

5.6.5 Ajuste

El ensamble entre dos piezas que tienen la misma dimensión nominal se conoce como un ajuste. Según la tolerancia, se puede tratar de un apriete o un ajuste. [18]

5.6.6 Ecuaciones de tolerancias

$$J_{max} = d1_{max} - d2_{min} \quad (3)$$

$$J_{min} = d1_{min} - d2_{max} \quad (4)$$

$$TF = J_{max} - J_{min} \quad (5)$$

5.7 Elementos de la simulación

Materiales: Se elige un material y se colocan sus propiedades físicas y mecánicas, como el límite elástico, el límite de tracción, el coeficiente de Poisson o el módulo de Young. [19]

Condiciones: Se colocan en la simulación las cargas, pares torsores, sujeciones o puntos fijos a los que será sometido la pieza de la simulación. [19]

Mallado: Representa la precisión con la que se hará la simulación, esto por el número de elementos sobre los cuales se va a calcular la simulación, entre más fino el mallado, mayor cantidad de cálculos y mayor acercamiento al comportamiento real de la pieza. [19]

Análisis: Es el procedimiento para solucionar la simulación por parte del software, en este proceso es en donde se realizan los cálculos de la simulación. [19]

Resultados: Es en donde se muestra el comportamiento de la pieza o ensamble, se muestran con gráficas de colores, en las cuales se puede observar zonas seguras y críticas de la pieza simulada. [19]

Esfuerzos equivalentes de Von Mises

5.8 Vibraciones mecánicas

Son movimientos oscilatorios que una partícula o cuerpo realiza sobre una posición de equilibrio. Este movimiento es un fenómeno dinámico y resulta de la interacción de fuerzas en un sistema mecánico[24]. En la Figura se muestra la gráfica sinusoidal de una vibración mecánica.

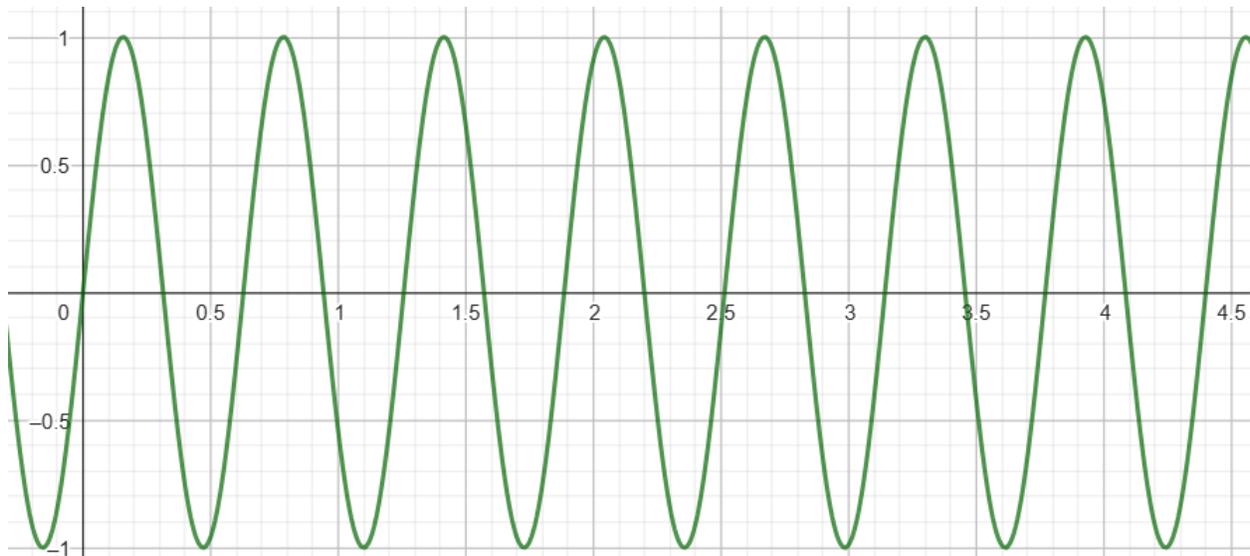


Figura 5.2 Gráfica de una vibración mecánica

5.9 Función de transferencia

Es una función matemática que utiliza la transformada de Laplace, que permite representar el comportamiento dinámico y estacionario de un sistema [25]. En la Figura 5.2, se muestra un ejemplo de una función de transferencia.

5.9.1 Respuesta transitoria

Es la respuesta presentada al ir del estado inicial al estado final del sistema.

5.9.2 Respuesta estacionaria

Es la respuesta del sistema presentada conforme el tiempo va tendiendo a infinito.

6 Desarrollo del proyecto

6.1 Modelo dinámico de la suspensión del vehículo

Utilizando el análisis de un cuarto de vehículo, se representó la suspensión del vehículo.

En la Figura 6.1 se muestra el esquema que muestra los elementos para el desarrollo del modelo.

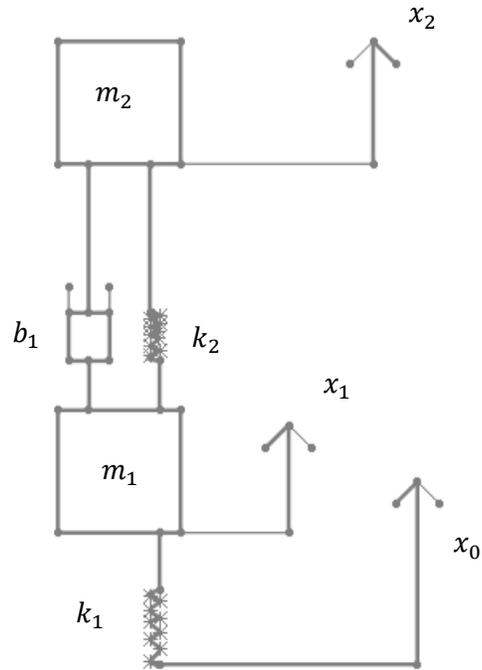


Figura 6.1 Esquema de un cuarto de vehículo.

En donde:

m_1 : Masa no suspendida

m_2 : Masa suspendida

b_1 : Constante de amortiguamiento del amortiguador

k_1 : Constante de rigidéz de la llanta

k_2 : Constante de rigidéz del resorte

x_2 : Posición de la masa suspendida

x_1 : Posición de la masa no suspendida

x_0 : Carretera, calle o camino

En la Figura 6.2, se muestran los diagramas de cuerpo libre

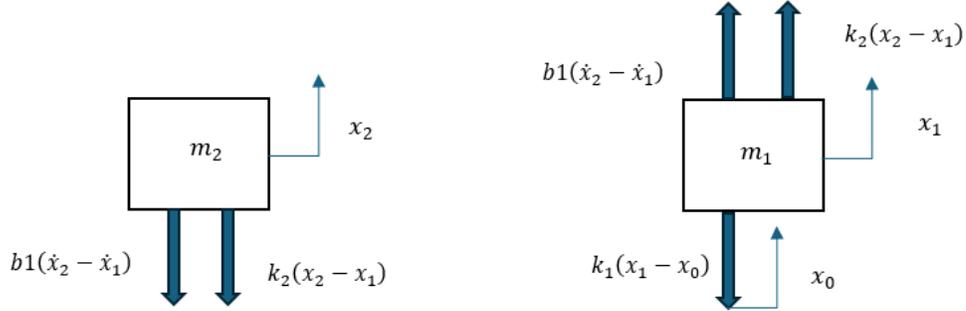


Figura 6.2 Diagramas de cuerpo libre.

De los diagramas de cuerpo libre, se obtienen las ecuaciones 6 y 7.

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - b_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) + b_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1(x_1 - x_0) \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones anteriores a 0, se obtienen las ecuaciones 8 y 9.

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + b_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (8)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 - k_2(x_2 - x_1) - b_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1(x_1 - x_0) = 0 \quad (9)$$

Utilizando la transformada de Laplace con ecuaciones 10, 11 y 12, y sustituyéndolas en 8 y 9, se obtienen las ecuaciones 13 y 14.

$$\ddot{x} = s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0) \quad (10)$$

$$\dot{x} = sX(s) - x(0) \quad (11)$$

$$x = X(s) \quad (12)$$

$$m_2(s^2 X_2(s) - sx_2(0) - \dot{x}_2(0)) + k_2(X_2(s) - X_1(s)) + b_1((sX_2(s) - x_2(0)) - (sX_1(s) - x_1(0))) = 0 \quad (13)$$

$$m_1(s^2X_1(s) - sx_1(0) - \dot{x}_1(0)) - k_2(X_2(s) - X_1(s)) - b_1((sX_2(s) - x_2(0)) - (sX_1(s) - x_1(0))) + k_1(X_1(s) - X_0(s)) = 0 \quad (14)$$

Con las condiciones iniciales, se sustituyen los valores en las ecuaciones 13 y 14, para obtener a las ecuaciones 15 y 16.

$$x_2 = 0$$

$$\dot{x}_2 = 0$$

$$x_1 = 0$$

$$\dot{x}_1 = 0$$

$$x_0 = 0$$

Remplazando en la Ecuación

$$m_2s^2X_2(s) + k_2(X_2(s) - X_1(s)) + b_1((sX_2(s)) - (sX_1(s))) = 0 \quad (15)$$

$$m_1s^2X_1(s) - k_2(X_2(s) - X_1(s)) - b_1((sX_2(s)) - (sX_1(s))) + k_1(X_1(s) - X_0(s)) = 0 \quad (16)$$

Despejando $X_1(s)$ de la Ecuación 15, se obtiene la Ecuación 17.

$$X_1(s) = \frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \quad (17)$$

Sustituyendo $X_1(s)$ por la Ecuación 17 en la Ecuación 16, se obtiene la ecuación 18

$$m_1s^2 \left(\frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) - k_2 \left(X_2(s) - \frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) - b_1 \left((sX_2(s)) - \left(s \left(\frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) \right) \right) + k_1 \left(\frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} - X_0(s) \right) = 0 \quad (18)$$

Agrupando los términos de $X_2(s)$ se obtiene la Ecuación 19.

$$X_2(s) \left(\frac{(m_1s^2(m_2s^2 + b_1s + k_2))}{b_1s + k_2} \right) - k_2 \left(1 - \frac{(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) - b_1 \left(s - \left(\frac{s(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) \right) + k_1 \left(\frac{X_2(s)(m_2s^2 + b_1s + k_2)}{b_1s + k_2} \right) - k_1X_0(s) = 0 \quad (19)$$

Despejando $X_2(s)$ y $X_0(s)$ de en la Ecuación 19, se obtiene la Ecuación 20.

$$\frac{1}{k_1} \left(\left(\frac{(m_1 s^2 (m_2 s^2 + b_1 s + k_2))}{b_1 s + k_2} \right) - k_2 \left(1 - \frac{(m_2 s^2 + b_1 s + k_2)}{b_1 s + k_2} \right) \right) = \frac{X_0(s)}{X_2(s)} \quad (20)$$

Reduciendo los términos de la Ecuación 20, se obtiene la Ecuación 21.

$$\frac{1}{k_1} \left(\frac{(m_1 m_2) s^4 + (m_1 + m_2) s^3 + (k_1 m_2 + k_2 m_1) + (k_1 b_1) s + k_1 k_2}{(b_1 s + k_2)} \right) = \frac{X_0(s)}{X_2(s)} \quad (21)$$

Multiplicando los términos del lado izquierdo en la Ecuación 21 y elevando la ecuación a -1, se obtiene la Ecuación 22.

$$\frac{X_2(s)}{X_0(s)} = \frac{k_1 b_1 s + k_1 k_2}{(m_1 m_2) s^4 + (m_1 + m_2) s^3 + (k_1 m_2 + k_2 m_1) + (k_1 b_1) s + k_1 k_2} \quad (22)$$

Despejando $X_2(s)$ de la Ecuación 22, se obtiene la Ecuación 23, la cual describe el sistema de suspensión por medio del análisis de un cuarto de vehículo.

$$X_2(s) = X_0(s) \left(\frac{k_1 b_1 s + k_1 k_2}{(m_1 m_2) s^4 + (m_1 + m_2) s^3 + (k_1 m_2 + k_2 m_1) + (k_1 b_1) s + k_1 k_2} \right) \quad (23)$$

6.1.1 Simulación del sistema en Matlab

La respuesta del sistema se obtuvo utilizando el software de Matlab utilizando los siguientes parámetros:

$m_1 = 8$ kg

$m_2 = 280$ kg

$k_1 = 1200$ N/m

$k_2 = 3500$ N/m

$b_1 = 1700$ Ns/m

La simulación realizada, se muestra en la sección de resultados.

6.2 Diseño del sistema de suspensión del vehículo

Se decidió utilizar un sistema de doble horquilla para la suspensión delantera del vehículo y de McPherson en la parte trasera, esto, por los buenos resultados de la suspensión del vehículo BAJA SAE UAM 2023.

El diseño de los elementos de las partes delanteras y traseras se realizó considerando primero dimensiones de *track* y *wheelbase* establecidas por la sección de dirección, siendo estas, 1.58 metros y 1.25 metros respectivamente.

6.2.1 Suspensión delantera

En la suspensión delantera se utilizó un sistema de doble horquilla, ya que este sistema ha dado buenos resultados en vehículos anteriores.

El sistema consta de los siguientes elementos (por neumático):

Una Horquilla superior

Una Horquilla inferior

Dos rótulas (una por horquilla)

Un Amortiguador

6.2.2 CAD de los elementos de la suspensión delantera

El CAD de los elementos se realizó considerando las dimensiones de *track* y *wheelbase* establecidas por la sección de dirección, siendo estas, 1.58 metros y 1.25 metros respectivamente. Estas dimensiones debían ser cumplidas por los componentes del sistema de suspensión, para permitir el funcionamiento esperado del sistema de dirección. Por lo mencionado anteriormente, ambas medidas fueron los primeros parámetros para el diseño de los elementos.

Para lograr el *track* y *wheelbase* establecidos por dirección, se realizaron iteraciones en las dimensiones de los elementos del sistema de suspensión, esto, según los cambios en el diseño de la jaula del vehículo.

6.2.2.1 Horquilla Superior

La horquilla superior fue elegida el elemento de sujeción del amortiguador. Así que se tuvo como objetivo que ese punto permita que la sujeción del amortiguador en la jaula fuese el miembro estructural FBM (Figura 6.3). Lo anterior, para reducir peso con respecto al vehículo 2023, ya que en dicho vehículo fue necesario soldar una estructura sobre la nariz de la jaula para el soporte del amortiguador.

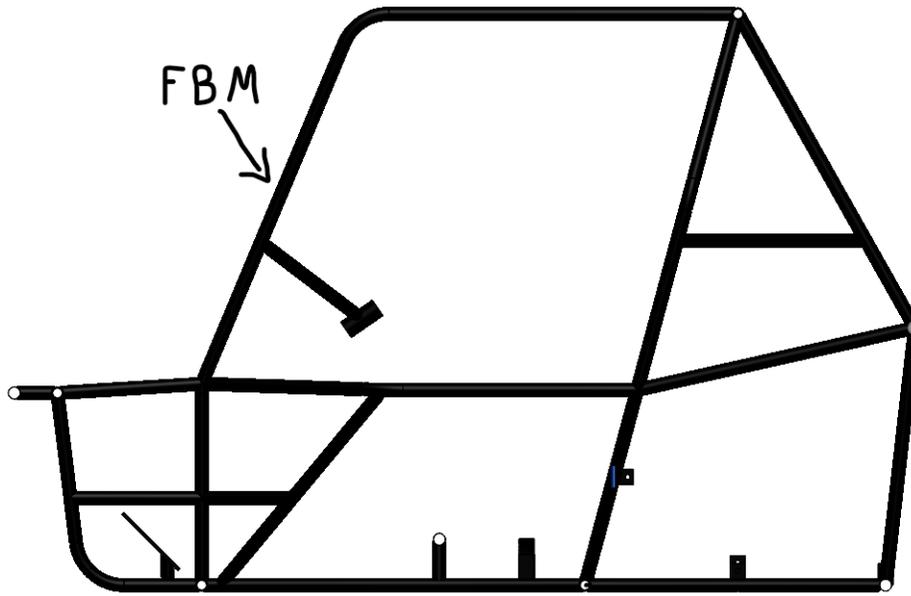


Figura 6.3 Miembro Estructural FBM en la jaula.

El CAD con las dimensiones obtenidas para lograr el *track* y *wheelbase*, junto con el ángulo del soporte para conectar al FBM se muestran en la Figura 6.4. La vista isométrica del CAD se muestra en la Figura 6.5.

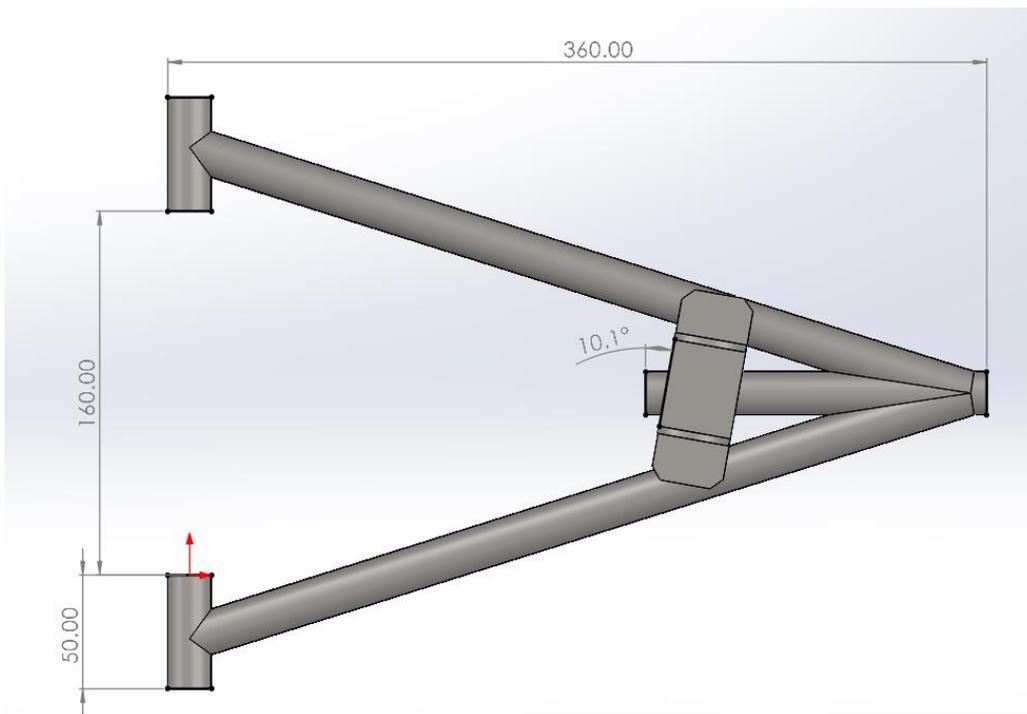


Figura 6.4 Dimensiones de la horquilla superior.

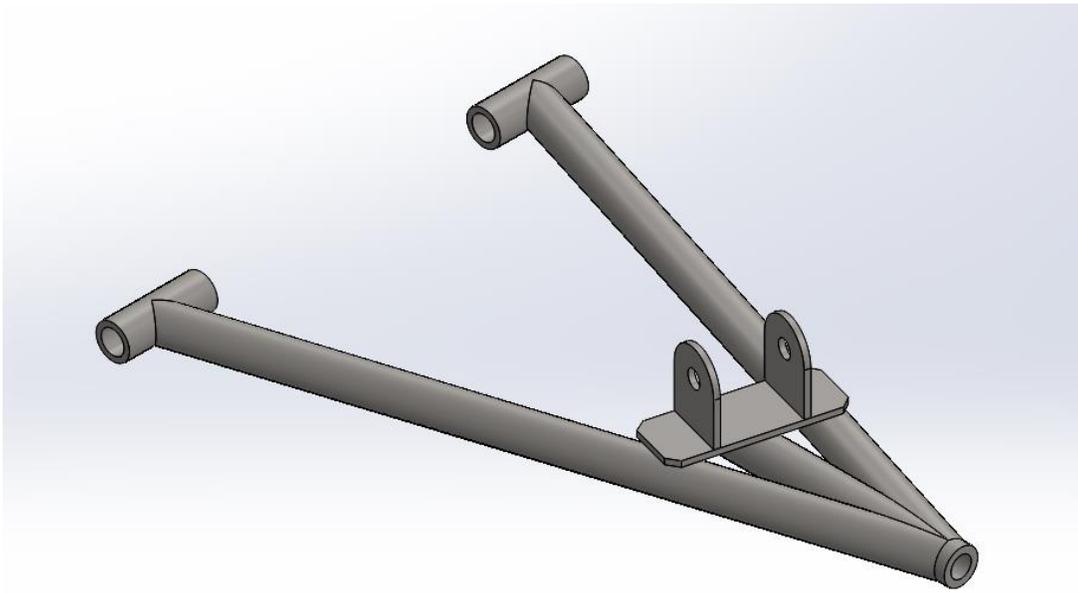


Figura 6.5 Vista Isométrica de la horquilla superior.

6.2.2.2 Horquilla Inferior

Para la Horquilla inferior se tomaron como parámetros de diseño el *track* y *wheelbase* únicamente. Sin embargo, al simular el movimiento de la suspensión, se observó que por la inclinación de la horquilla la rótula conectada podía limitar la carrera de la suspensión (Figura1). Así que, fue necesario que el tubo que porta la rótula en la horquilla tuviera una inclinación distinta al resto del elemento.

Las dimensiones de la horquilla inferior se muestran en la Figura 6.6

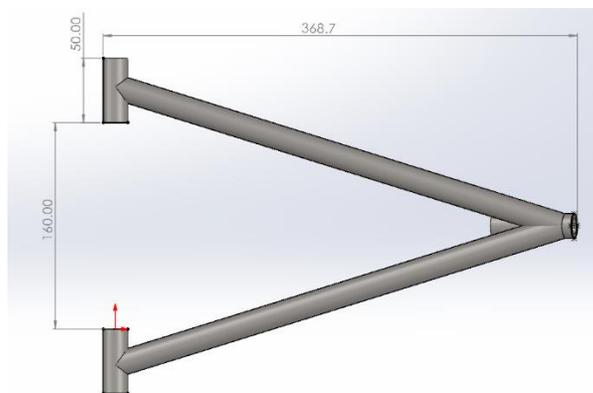


Figura 6.6 CAD con dimensiones de la horquilla inferior.

La vista isométrica de la horquilla inferior se observa en la Figura 6.7.

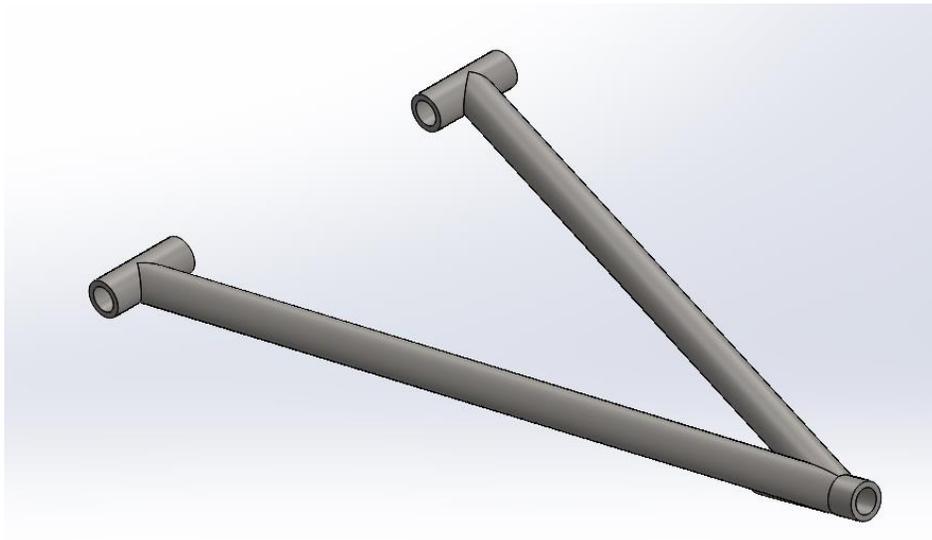


Figura 6.7 Vista Isométrica de la horquilla inferior.

6.2.2.3 Orejas delanteras

En el diseño de las dimensiones de las orejas (Figura 6.8), se tomó como principal parámetro el *track*. Para la dimensión “a”, se utilizó la geometría de la jaula y las dimensiones de esta, ya que la longitud de la jaula a las horquillas tuvo un tramo constante y uno variable linealmente.

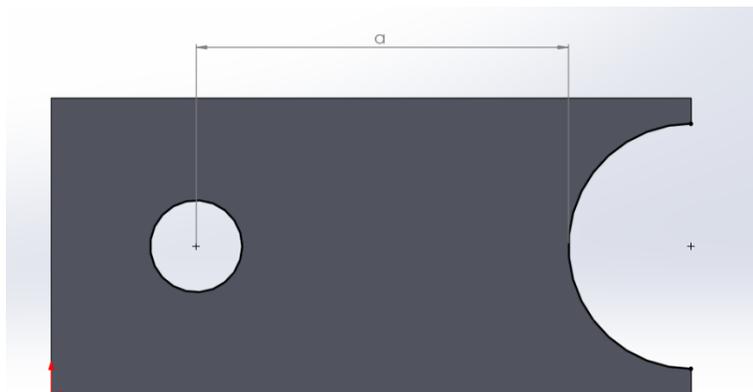


Figura 6.8 Dimensión “a” de las orejas delanteras.

También se requirió un valor mínimo de “a” de 15 mm para permitir la entrada y fácil ensamble de tornillos de 3/8in, ya que la cabeza de estos tornillos es de 9/16 in (Figura 6.9).

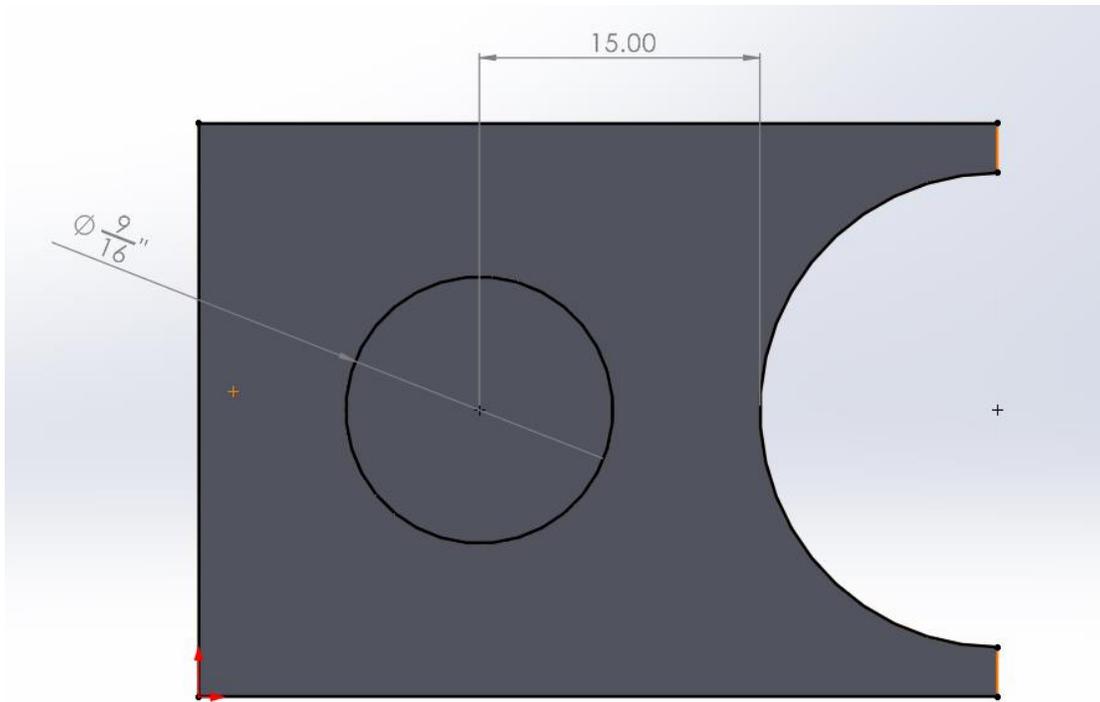


Figura 6.9 Valor mínimo de “a” para el uso de tornillos de 3/8 in.

Para obtener las dimensiones “a” en función de la geometría de la jaula, se realizaron polígonos. En ellos se representan las distancias de la jaula a las horquillas superior e inferior en los cuatro puntos de los que se sujetan. Para construir estos polígonos, se tomaron las medidas y geometría de los tubos de la jaula en esas secciones y la proyección de la línea que coincide con los cuatro puntos en donde se soporta la horquilla. Posteriormente, se utilizó una medida de 46 mm de la oreja más grande. En las Figuras 6.10 y 6.11 se muestran las dimensiones obtenidas

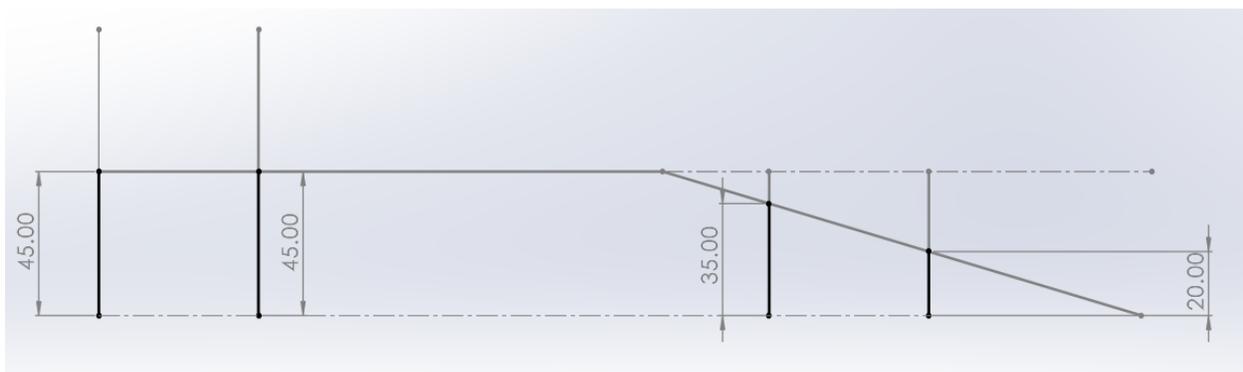


Figura 6.10 Polígono de orejas para horquilla superior.

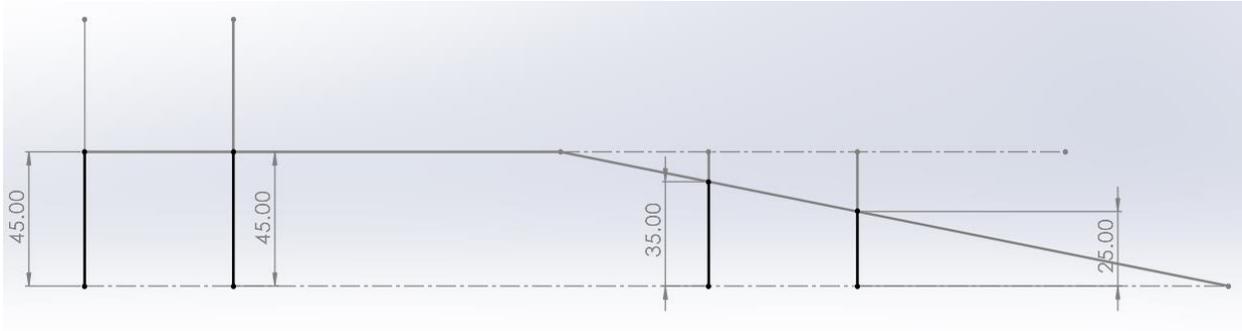


Figura 6.11 Polígono de orejas para horquilla inferior.

En la Tabla 6.1 se observan las dimensiones obtenidas para las orejas de la suspensión delantera.

Tabla 6.1 Valores "a" de las orejas.

Oreja	Valor de "a" (mm)
1	45
2	35
3	25
4	20

En la Figura 6.12 se observa la vista isométrica de las orejas.

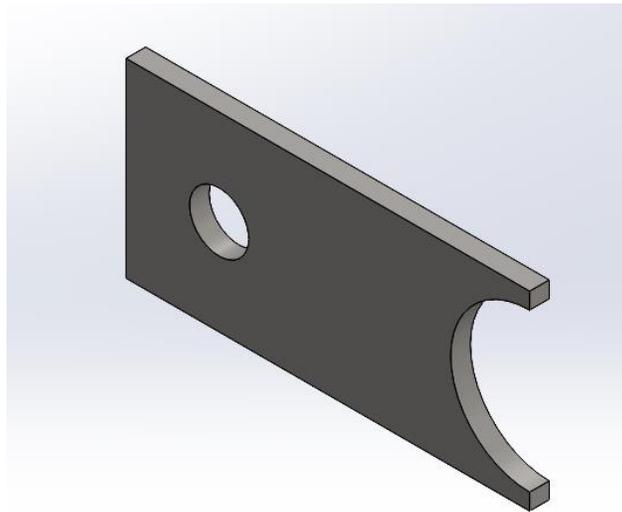


Figura 6.12 Vista isométrica de oreja.

6.2.2.4 Soportes de amortiguador delanteros

En las dimensiones de los soportes de amortiguador delanteros se tuvieron los siguientes criterios de diseño:

Conectar el soporte al FBM.

Lograr un ángulo del amortiguador menor a 30 grados.

Aumentar la altura de la suspensión a 0.3 m.

La menor distancia del amortiguador al tubo FBM, a través del soporte. Esto, cumpliendo lo anteriormente mencionado.

Para estos soportes, igualmente se decidió utilizar un barreno de 3/8 in, ya que este es el diámetro de los agujeros en los extremos del amortiguador.

Para la fabricación del soporte, se decidió utilizar un ptr, ya que esto facilitaría el maquinado de la pieza.

Las dimensiones obtenidas del soporte de amortiguador delantero se muestran en la Figura 6.13.

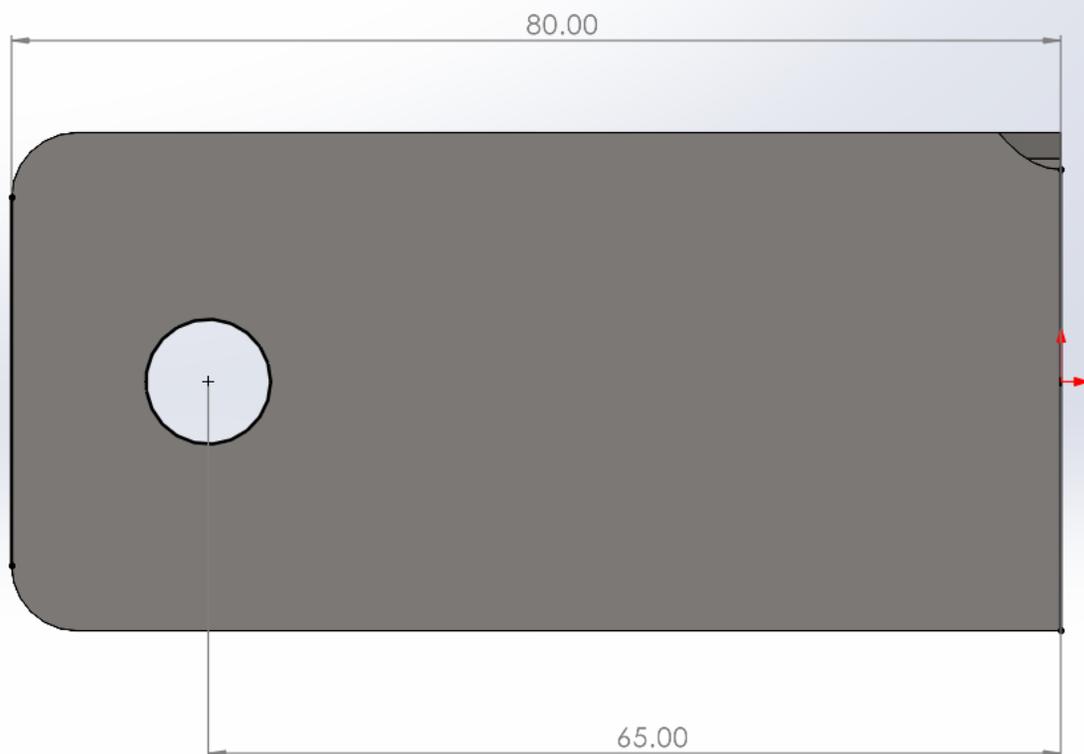


Figura 6.13 Dimensiones del soporte.

El CAD con la vista isométrica en la Figura 6.14.

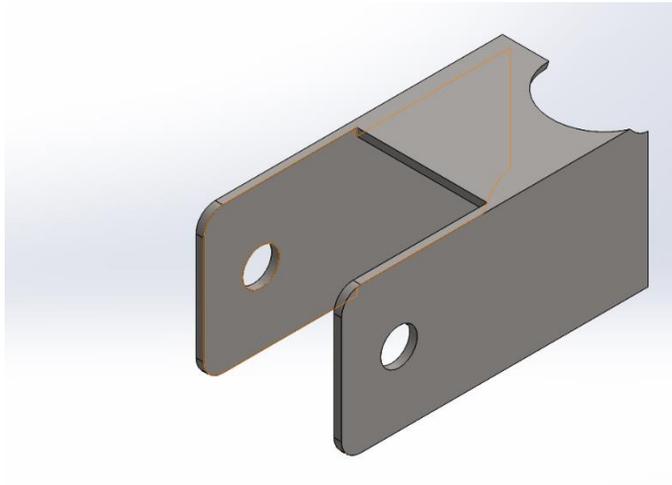


Figura 6.14 Vista Isométrica del soporte.

6.2.2.5 Simulación de impacto

Para la simulación de impacto se tomaron los siguientes parámetros:

Fuerza de 3000 N obtenida del peso aproximado del vehículo aplicada de forma lateral hacia la suspensión como se observa en la Figura 6.15.

Puntos fijos que se observan en la Figura 6.15

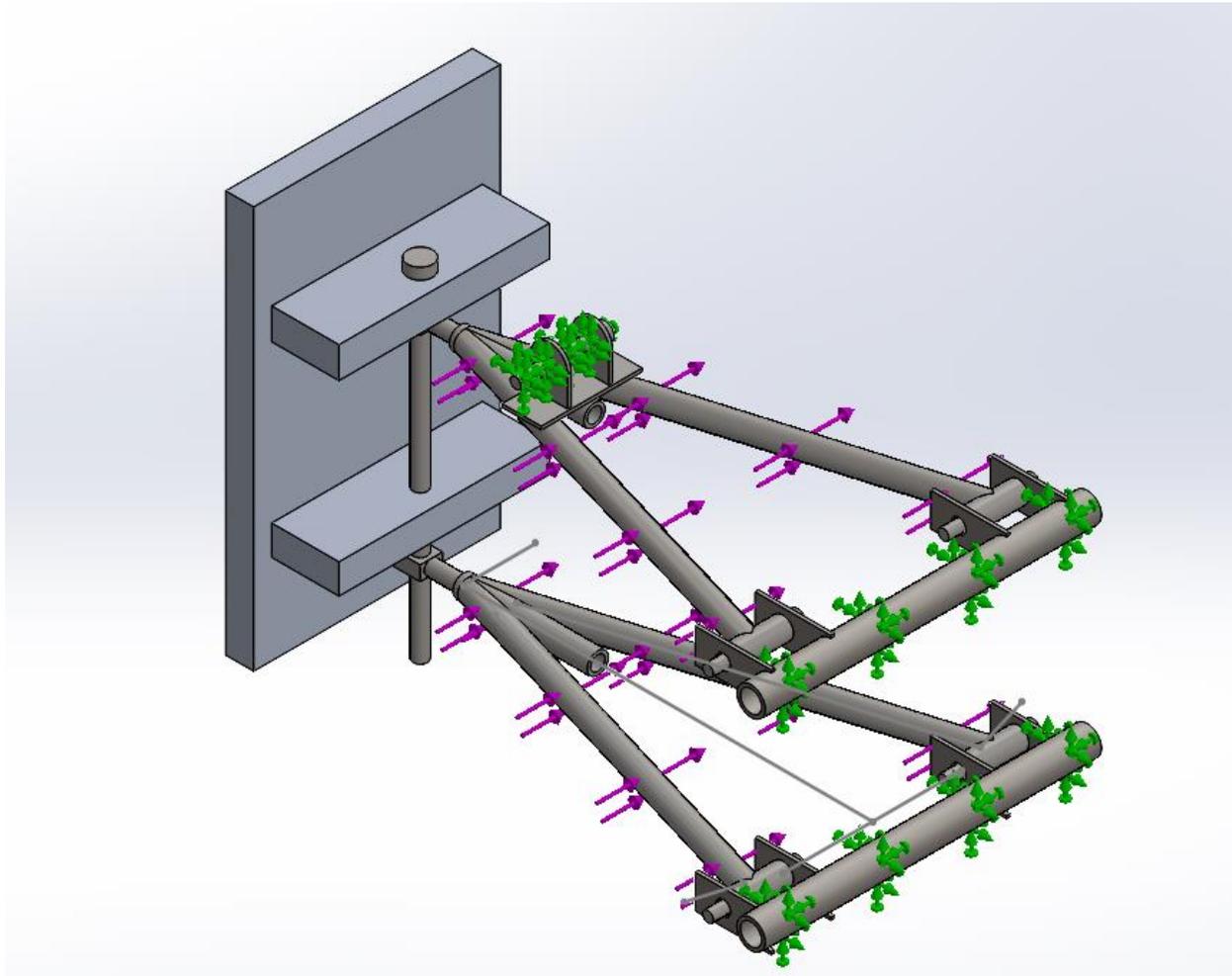


Figura 6.15 Simulación de impacto.

La simulación, fue realizada tomando como puntos fijos el soporte del amortiguador (alcanzando su máxima carrera) y los tubos que simulan la jaula. Las cargas son dadas por el peso del vehículo

6.2.2.6 Simulación de caída sobre una sola llanta

Para la simulación de caída sobre una sola llanta, se aplicaron los siguientes parámetros:

Fuerza de 3000 N obtenida del peso aproximado del vehículo aplicado sobre el portabaleros.

Puntos fijos que se observan en la Figura 6.16.

Parámetros, puntos fijos y cargas en la simulación de caída sobre una sola llanta

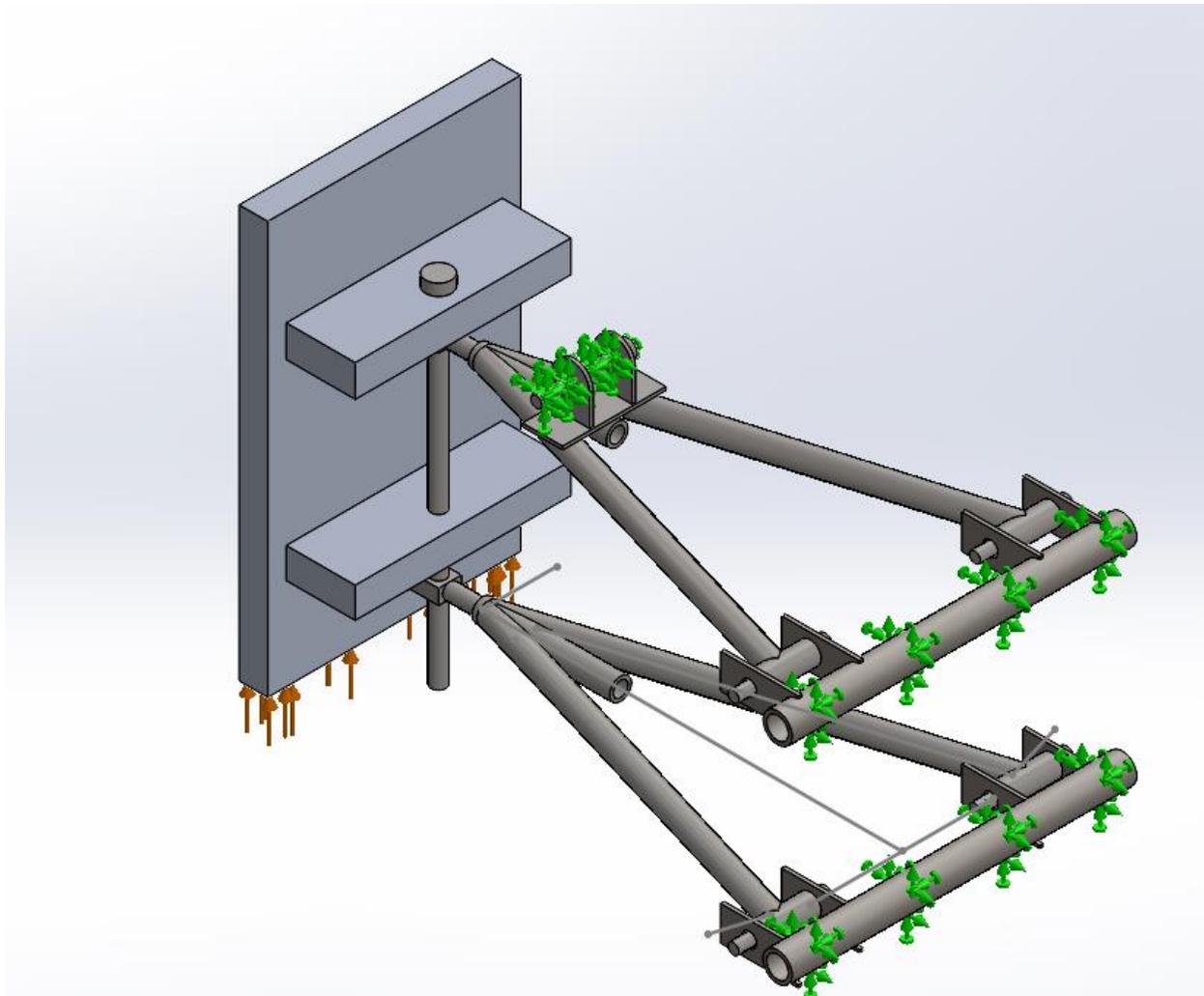


Figura 6.16 Simulación de caída sobre una llanta.

La simulación, fue realizada tomando como puntos fijos el soporte del amortiguador (alcanzando su máxima carrera) y los tubos que simulan la jaula. Las cargas son dadas por el peso del vehículo y sobre el lugar donde se sujetan las dos horquillas.

6.3 Mecanismo de la suspensión

6.3.1 Diseño del mecanismo

A partir de lo mostrado en la Figura 6.17, se comenzó el diseño del mecanismo de suspensión delantera. En donde R_1 es el eslabón fijo y representa los apoyos de las horquillas en la jaula, R_2 la horquilla inferior, R_3 la horquilla superior, y R_4 el eslabón acoplador y distancia entre los puntos de apoyo en el portabaleros.

La suma vectorial que describe el sistema se muestra en la Ecuación 24.

$$R_1 + R_3 = R_2 + R_4 \quad (24)$$

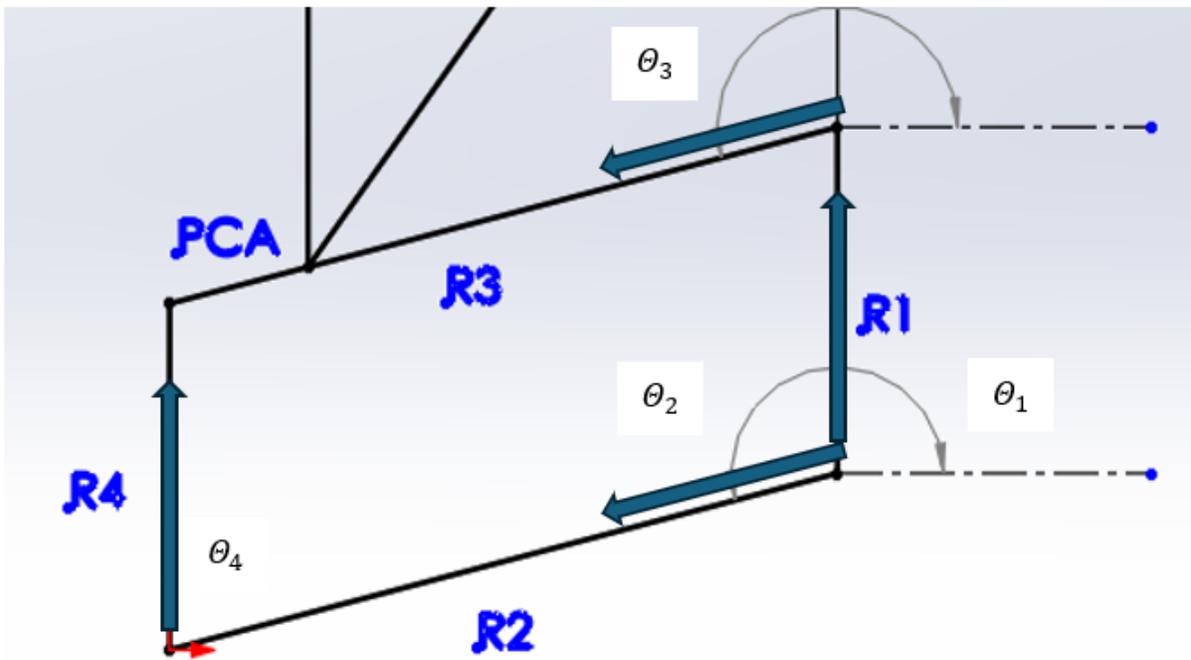


Figura 6.17 Diagrama del mecanismo de suspensión delantero.

El mecanismo se diseñó como un paralelogramo. Con esto, se tiene lo mostrado en las Ecuaciones 25 y 26.

$$\theta_1 = \theta_4 \quad (25)$$

$$\theta_2 = \theta_3 \quad (26)$$

Con lo anterior, se logra que el eslabón acoplador y por ende la llanta, siga su recorrido de forma paralela a la jaula del vehículo.

6.3.2 Rango de movimiento en los ángulos de las horquillas θ_2 y θ_3

Ya que el movimiento de las horquillas y la suspensión en general está dado por la extensión y compresión de los amortiguadores, para determinar los movimientos en el mecanismo, es necesario incluirlo en el diagrama. El amortiguador se agrega en el diagrama de la Figura 6.18

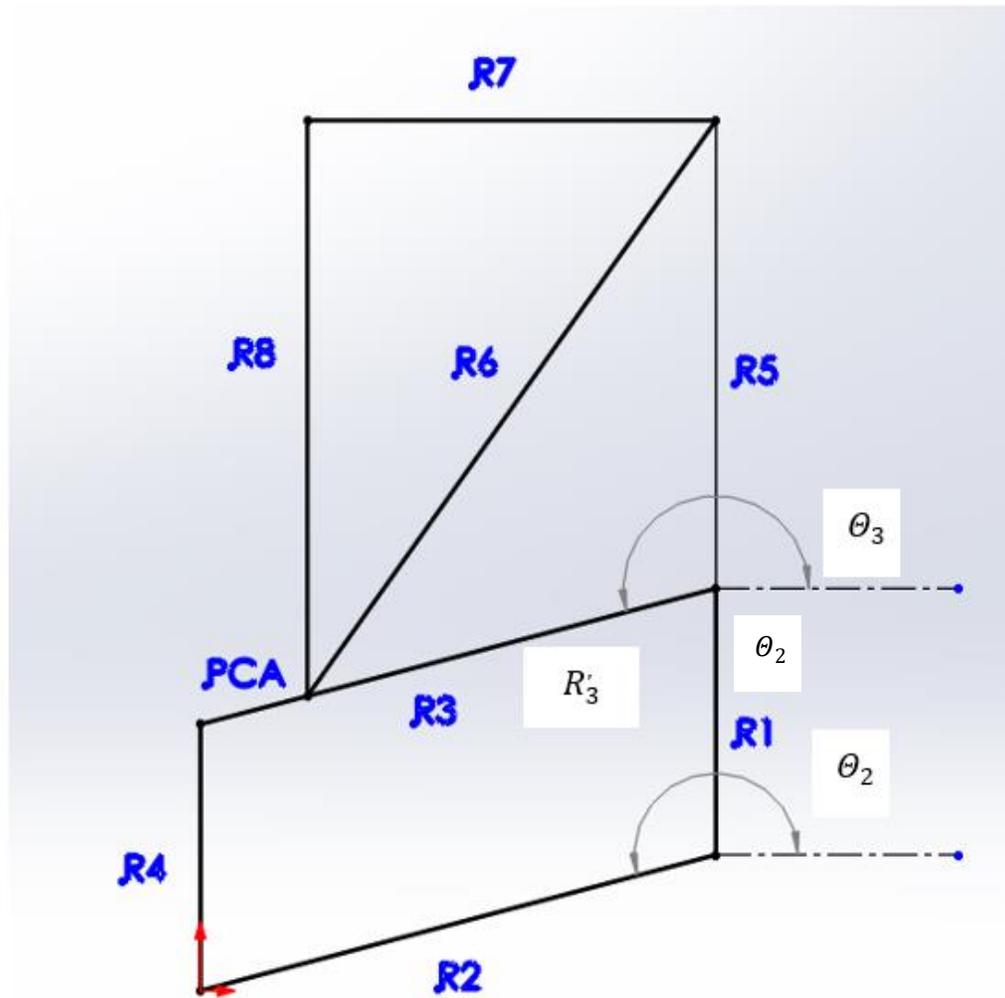


Figura 6.18 Diagrama del mecanismo con amortiguador.

El amortiguador funciona como una corredera, por lo tanto, es necesario agregar al mecanismo de cuatro barras, un biela-manivela-corredera. Siendo R_3 la distancia del apoyo de la horquilla superior en la jaula y el soporte del amortiguador en la horquilla, R_5 la distancia entre el apoyo de la horquilla superior en la jaula y el soporte del amortiguador, R_6 el amortiguador y PCA el punto de la corredera y apoyo del amortiguador en la horquilla.

Colocando los vectores en el diagrama, se muestra la Figura 6.19

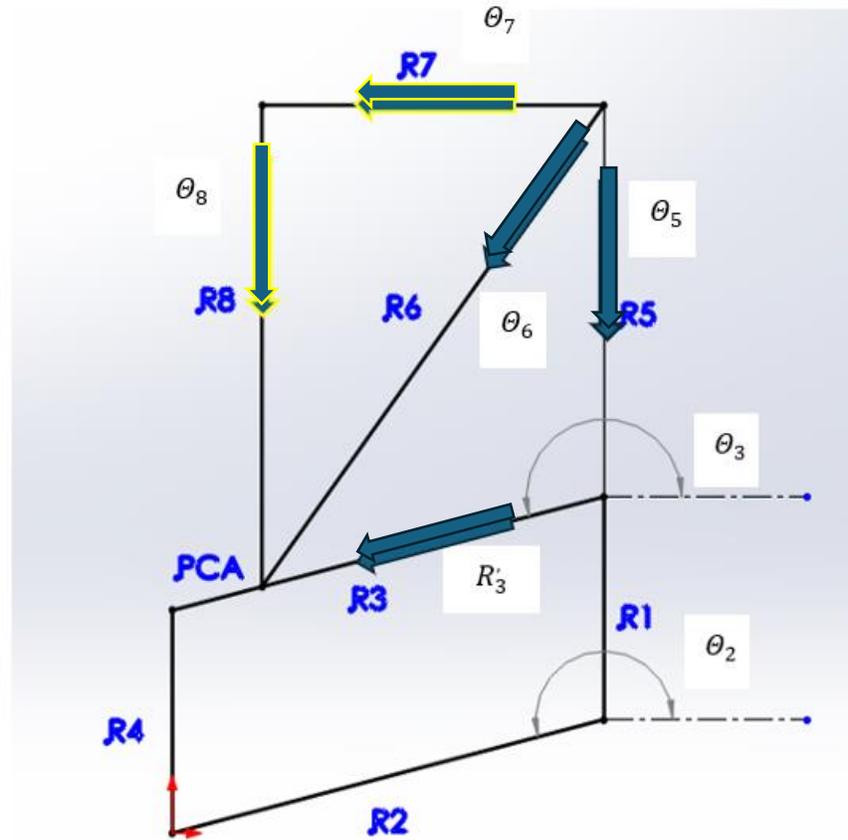


Figura 6.19 Vectores biela-manivela-corredera

Se realiza la suma vectorial de los eslabones R_3 , R_5 y R_6 , obteniendo la Ecuación 27.

$$R_3 + R_5 = R_6 \quad (27)$$

El eslabón R_6 se puede reemplazar por los eslabones R_7 y R_8 que controlan la posición de PCA . Este cambio se muestra en la Ecuación 28.

$$R_3 + R_5 = R_7 + R_8 \quad (28)$$

Utilizando la parte real de la identidad de Euler (1)

$$r_3'(\cos(\theta_3')) + r_5(\cos(\theta_5)) = r_7(\cos(\theta_7)) + r_8(\cos(\theta_8))$$

Despejando θ_3 de la Ecuación 29.

$$\theta_3' = \cos^{-1}\left(\frac{r_5(\cos(\theta_5)) - r_7(\cos(\theta_7)) + r_8(\cos(\theta_8))}{r_3'}\right) \quad (29)$$

Ya que $\theta_5 = 90^\circ$, $\theta_8 = 180^\circ$ y $\theta_7 = 180^\circ$ se sustituye y se obtiene la Ecuación 30.

$$\theta_3' = \cos^{-1}\left(\frac{-r_7}{r_3}\right) \quad (30)$$

La Ecuación, relaciona la longitud del amortiguador con el ángulo de ambas horquillas, esto por la Ecuación 26. El valor de θ_3 está dado por la Ecuación 31.

$$\theta_3 = \theta_3' + 180^\circ \quad (31)$$

La longitud r_7 está dada por la Ecuación 32.

$$r_7 = r_6 \cos(270^\circ - \theta_9) \quad (32)$$

En donde r_6 es la longitud del amortiguador y θ_9 su ángulo desde la jaula.

La Ecuación es aplicable a los sistemas de suspensión si cumple con los siguiente:

El mecanismo forma un paralelogramo. Si este no forma un paralelogramo, no se cumplen las Ecuaciones 25 y 26, por lo que los ángulos de los elementos son distintos. Además, el eslabón acoplador, en este caso, el portaleros, no sigue un recorrido perpendicular al eslabón formado por la jaula.

El amortiguador se sujeta de una horquilla. El movimiento de la horquilla es rotacional, lo cual favorece a mantener el amortiguador en un ángulo constante.

Los valores máximos y mínimos de θ_2 y θ_3 se obtuvieron con los siguientes valores de r_6 y θ_9 .

$$r_{6max} = 462.28 \text{ mm}$$

$$r_{6min} = 327.60 \text{ mm}$$

$$\theta_9 = 29^\circ$$

$$r_3' = 235 \text{ mm}$$

Para r_{6max}

$$r_7 = 462.28 \cos(270^\circ - 29^\circ)$$

$$r_7 = -224.11$$

$$\theta_3' = \cos^{-1}\left(\frac{-(-224.11)}{235}\right)$$

$$\theta_3' = 17.51^\circ$$

$$\theta_{3max} = 197.51^\circ$$

$$\theta_2 = 197.51^\circ$$

Para r_{6min}

$$r_7 = 327.60 \cos(270^\circ - 29^\circ)$$

$$r_7 = -158.82$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{-(-158.82)}{235}\right)$$

$$\theta_3 = 47.48^\circ$$

$$\theta_{3min} = 227.48^\circ$$

$$\theta_{2min} = 227.48^\circ$$

6.3.3 Desplazamiento angular máximo de las horquillas

El movimiento angular máximo de las horquillas en el mecanismo de suspensión está dado por la Ecuación 33.

$$\theta_{nmin} - \theta_{nmax} = \theta_{rn} \quad (33)$$

En donde θ_{nmax} es la posición angular de la horquilla con la máxima elongación del amortiguador, θ_{nmin} , la posición angular de la horquilla con la máxima compresión del amortiguador y el recorrido angular total que pueden realizar las horquillas en el movimiento de la suspensión.

Remplazando las variables en la Ecuación 1 para obtener el recorrido que harán las horquillas.

$$227.48^\circ - 197.51^\circ = 29.97^\circ$$

$$\theta_{r3} = 29.97^\circ$$

$$\theta_{r2} = 29.97^\circ$$

6.3.4 Mecanismo gráfico de la suspensión delantera

La suspensión delantera del vehículo se diseñó como un mecanismo de cuatro barras con inversión. Los cuatro eslabones son las horquillas superior e inferior y los puntos de apoyo en la jaula y portabaleros, y el amortiguador funciona como una corredera en el mecanismo.

El esquema del mecanismo de cuatro barras se muestra en la Figura 6.20. En dicho esquema, se observan los eslabones AB, AC, BD, CD Y E. Siendo AB la horquilla superior, CD la horquilla inferior, E el amortiguador y los eslabones AC Y BD las distancias entre los apoyos de las horquillas en el portabaleros y jaula respectivamente.

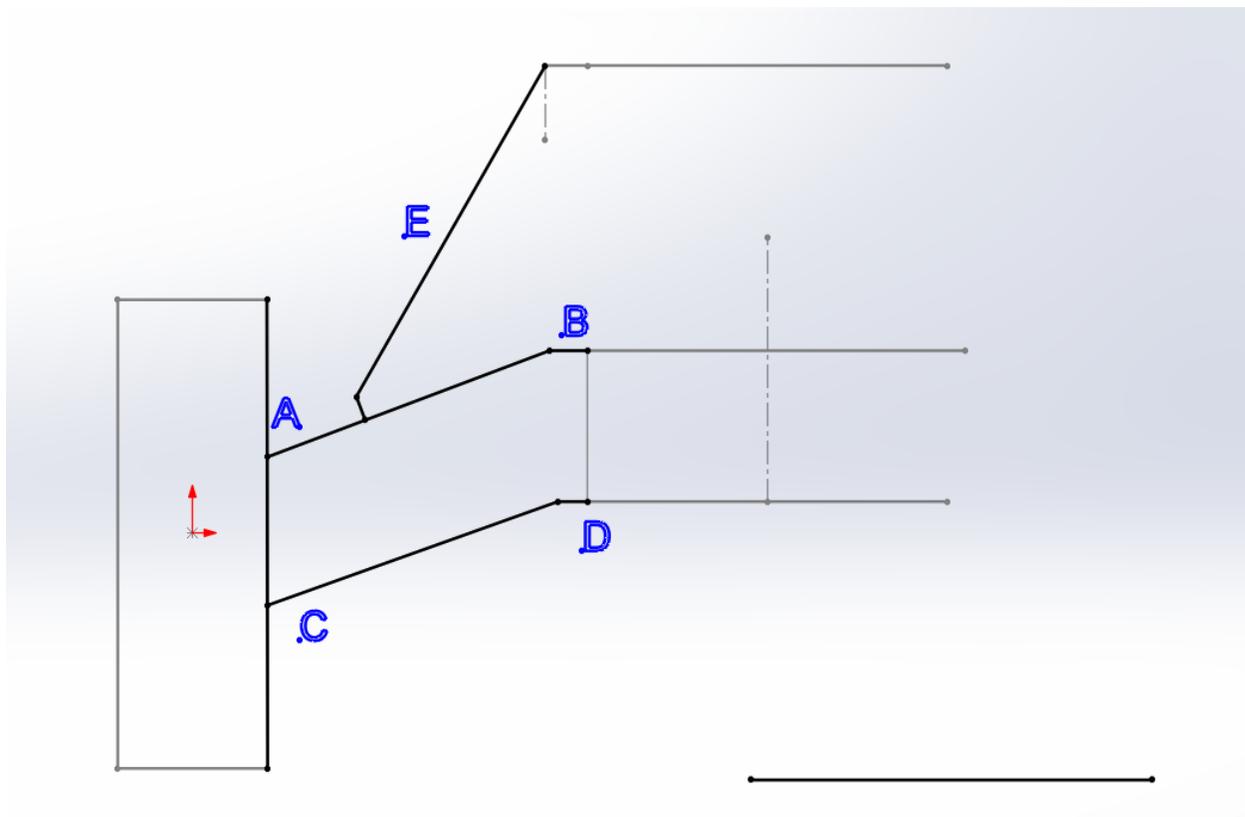


Figura 6.20 Esquema del mecanismo de suspensión delantera.

6.3.4.1 Mecanismo con amortiguador extendido

El estado del mecanismo cuando el amortiguador alcanza su máxima elongación de 18.24 pulgadas se muestra en la Figura 6.21.

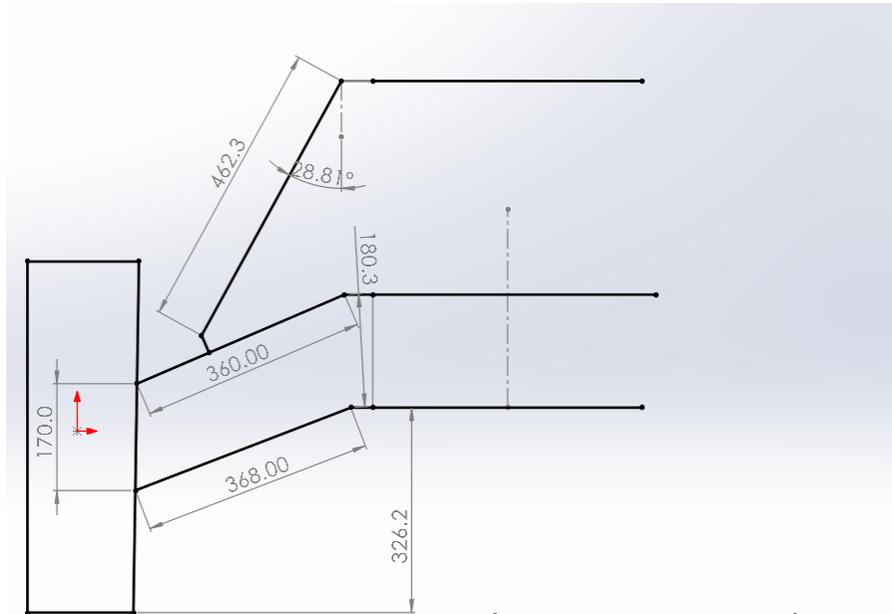


Figura 6.21 Mecanismo de suspensión delantero con el amortiguador extendido a 18.24 pulgadas.

6.3.4.2 Mecanismo con amortiguador comprimido

El estado del mecanismo cuando el amortiguador alcanza su máxima compresión de 12.9 pulgadas se muestra en la Figura 6.22.

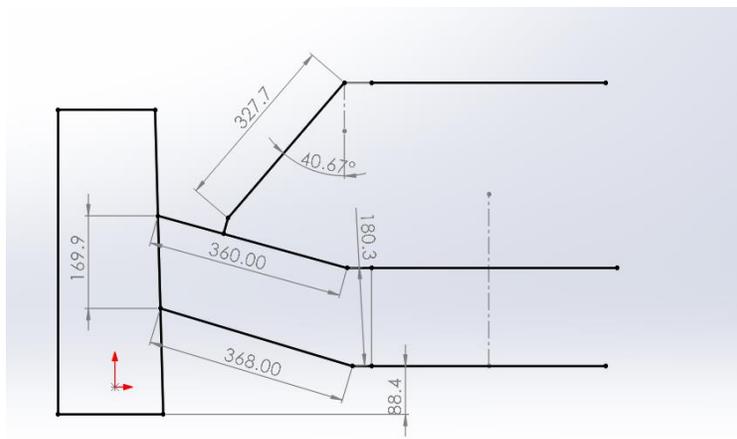


Figura 6.22 Mecanismo de suspensión delantero con el amortiguador comprimido a 12.9 pulgadas.

6.3.4.3 Condición de Grashof del mecanismo de cuatro barras

Para lograr que el mecanismo funcione correctamente, es necesario que cumpla con la condición de Grashof, representada por la Ecuación 1.

$$S + L \leq P + Q \quad (1)$$

En donde las variables son representadas por los siguientes elementos:

S: Horquilla inferior.

L: Distancia entre puntos de apoyo en el portabaleros.

P: Horquilla superior.

Q: Distancia entre puntos de apoyo en la jaula.

Las dimensiones de S, L, P Y Q se muestran en la Figura 6.23.

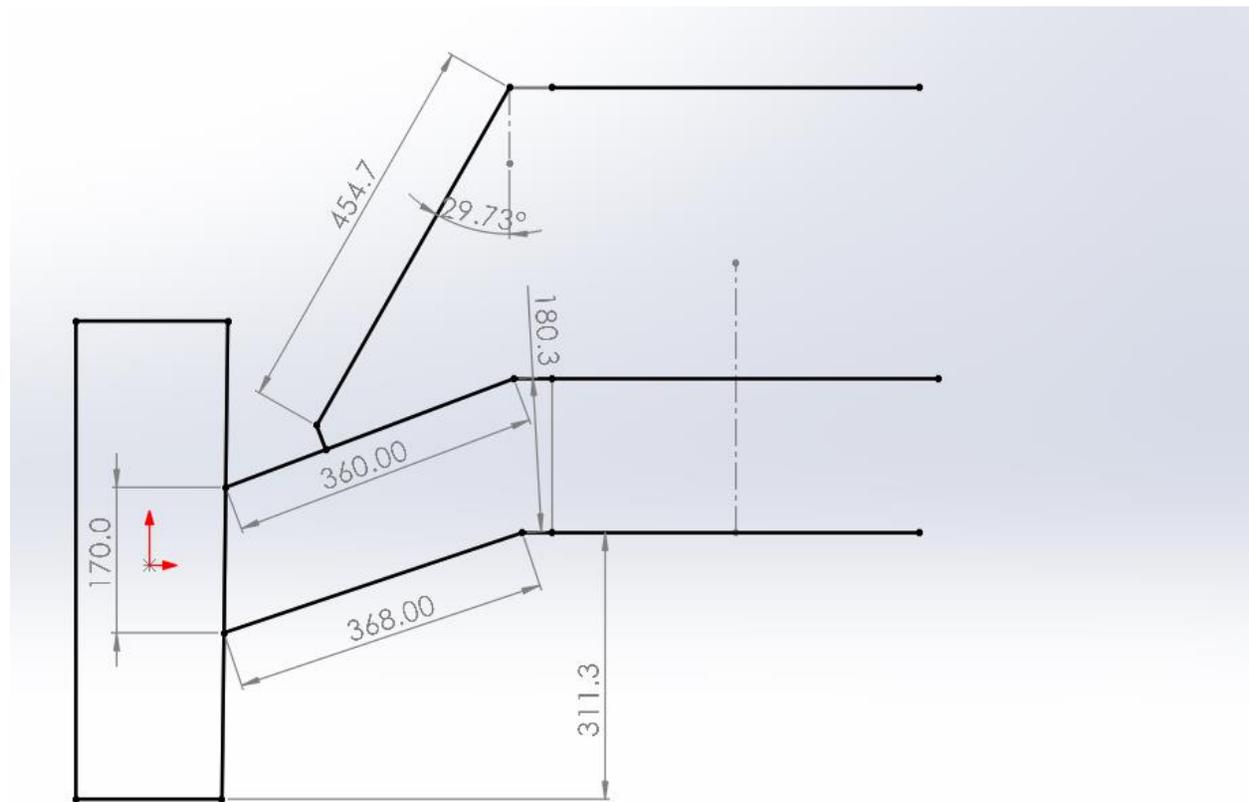


Figura 6.23 Estado del mecanismo de suspensión delantero en reposo (longitud del amortiguador en 17.9 in).

Sustituyendo los valores S, L, P Y Q en la Ecuación 1 se obtiene lo siguiente:

$$368 + 170 < 360 + 180.3$$

$$538 < 540.3$$

Por lo tanto, el mecanismo cumple la condición de Grashof.

6.3.5 Materiales de los elementos del sistema de suspensión delantera

6.3.5.1 Presentaciones en los materiales de los elementos

Con base en los CAD realizados, se determinó que los materiales para los elementos del sistema de suspensión debían ser de los tipos de presentación mostrados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Presentaciones del material para los elementos del sistema.

Pieza	Presentación del material a utilizar
Horquillas	Tubo
Orejas	Solera
Soportes de Amortiguador	PTR
Bujes	Barra sólida

La elección de un tipo de presentación de material específico para cada elemento del sistema se realizó para facilitar los maquinados a realizar para la manufactura de cada componente.

6.3.5.2 Dimensiones de los materiales

Para la obtención de las dimensiones de las presentaciones mostradas en la Tabla 6.3 para cada material, se utilizaron las simulaciones estáticas realizadas. Las dimensiones de cada presentación de material se muestran en la Tabla 2.

Tabla 6.3 Dimensiones obtenidas de las simulaciones para cada presentación de los materiales con su letra correspondiente en las Figuras 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27.

Presentación del material	Dimensiones a obtener
---------------------------	-----------------------

Tubo	Diámetro externo (a) y espesor (b)
PTR	Longitud (d) y espesor ϵ
Barra Sólida	Diámetro (c)
Solera	Espesor (f)

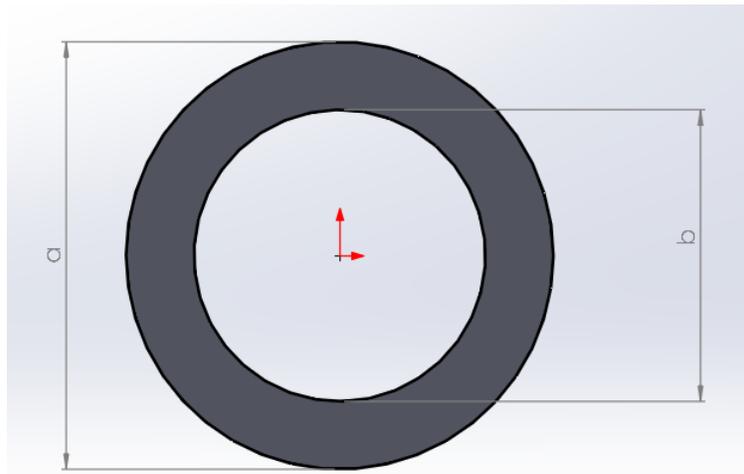


Figura 6.24 Dimensiones del tubo.

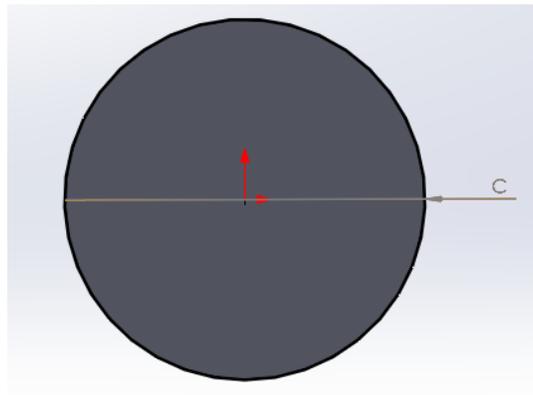


Figura 6.25 Dimensiones de la barra sólida.

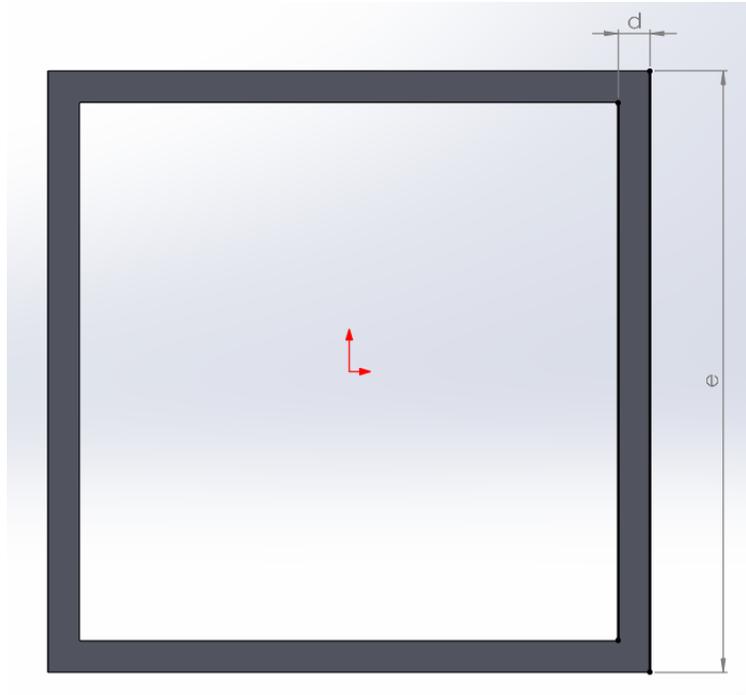


Figura 6.26 Dimensiones PTR.

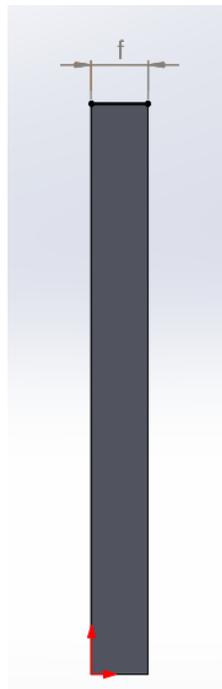


Figura 6.27 Dimensiones de la solera.

6.3.5.3 Materiales

Se realizó la búsqueda de materiales que tuvieran un límite elástico adecuado según los resultados de las simulaciones, y una buena maquinabilidad y soldabilidad. Igualmente se procuró que fueran materiales y dimensiones comerciales. Con lo anterior, se eligieron los aceros 1020, 1018 y 1518 como opciones para el material principal de las piezas del sistema. En la Tabla 6.4, se observan algunas propiedades de las mencionadas, para los aceros 1020, 1018 y 1518.

Tabla 6.4 Propiedades y características mecánicas de los aceros 1020, 1018 y 1518.

Propiedad	Acero 1020	Acero 1018	Acero 1518
Resistencia a la tracción (MPa)	410 - 550	440 - 570	440 - 570
Límite elástico (MPa)	250	370	350
Dureza Brinell (HB)	111 - 160	126 - 179	126 - 179
Maleabilidad	Buena	Muy buena	Buena
Maquinabilidad	Moderada	Excelente	Moderada
Soldabilidad	Buena	Buena	Buena

6.3.6 Sistema de suspensión trasero

En la suspensión trasera se decidió utilizar un sistema de McPherson, ya que este ofrece ventajas con respecto a la doble horquilla como las siguientes:

Menor peso.

Mayor facilidad de ensamble.

Mayor facilidad de remplazo de piezas.

El sistema consta de los siguientes elementos (por neumático):

Una Horquilla

Un brazo oscilante

Rótulas

Un Amortiguador

6.3.7 CAD de los elementos de la suspensión trasera

Al igual que con el CAD del sistema delantero, el CAD de los elementos traseros se realizó considerando las dimensiones de track y wheelbase establecidas por la sección de dirección, siendo estas, 1.58 metros y 1.25 metros respectivamente. Estas dimensiones debían ser cumplidas por los componentes del sistema de suspensión, para permitir el funcionamiento esperado del sistema de dirección.

Para lograr el track y wheelbase establecidos por dirección, se realizaron iteraciones en las dimensiones de los elementos del sistema de suspensión, esto, según los cambios en el diseño de la jaula del vehículo.

6.3.7.1 Horquilla trasera

Las dimensiones del CAD de la horquilla trasera se obtuvieron con base en el *track*, *wheelbase* y medidas de la jaula. Este elemento, a diferencia de las horquillas delanteras, requirió una geometría en su punto de apoyo al portabaleros que evitara un movimiento similar al generado por la dirección en las llantas delanteras, sobre las llantas traseras. Las dimensiones obtenidas para cumplir con las medidas y geometría mencionadas anteriormente se muestran en la Figura 6.28.

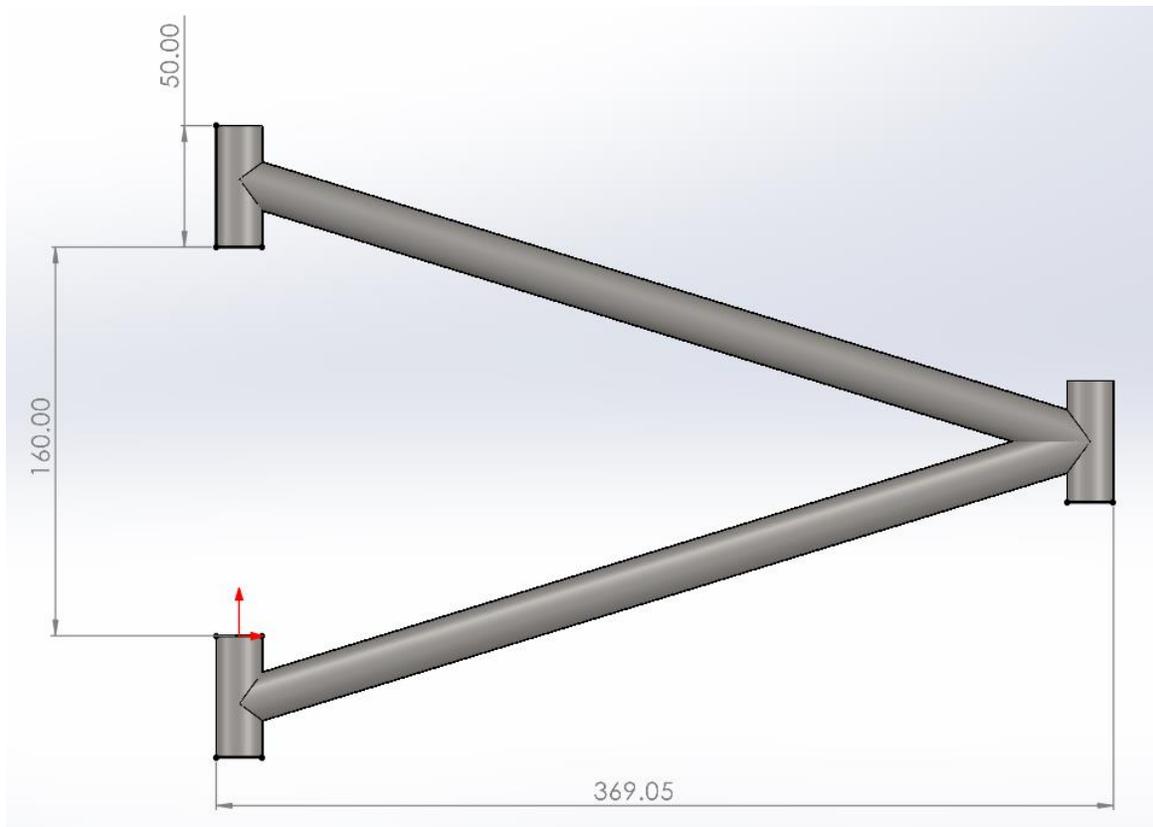


Figura 6.28 Dimensiones obtenidas para la horquilla trasera.

En la Figura 6.29 se muestra la vista isométrica del CAD obtenido para la horquilla trasera.

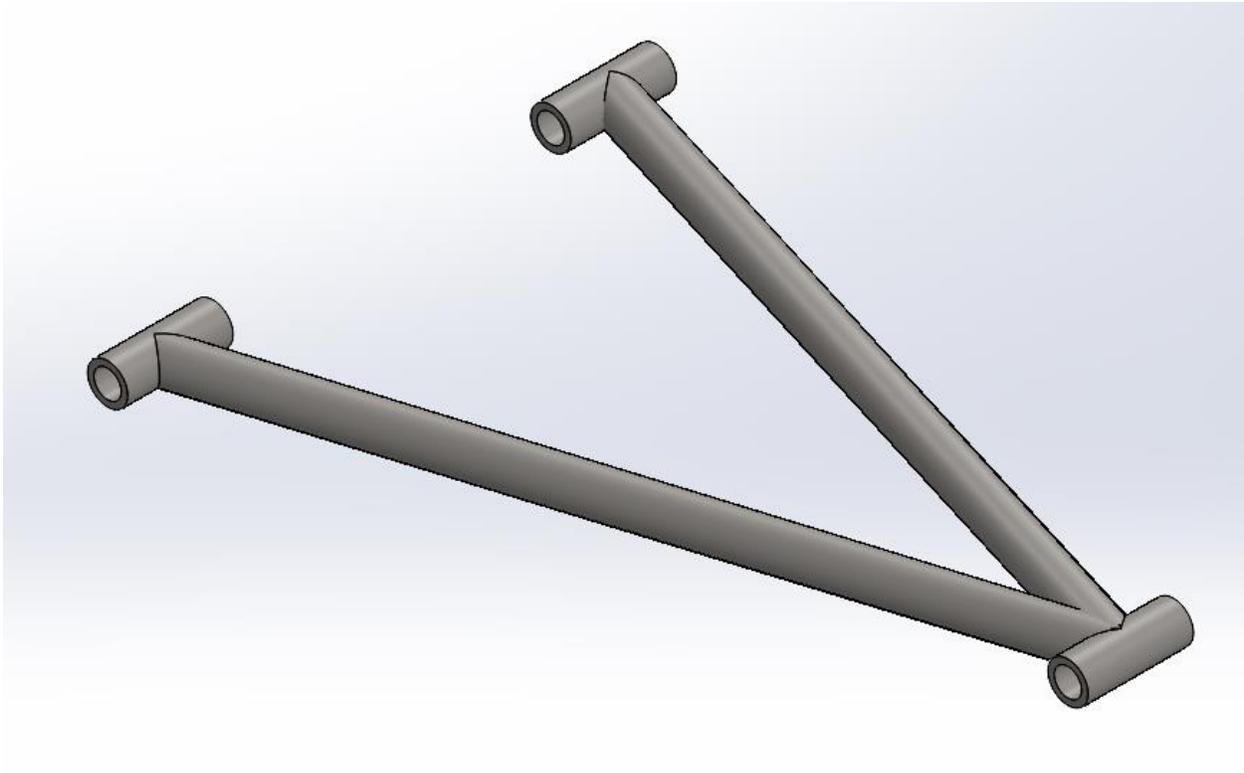


Figura 6.29 Vista isométrica de la horquilla trasera.

6.3.7.2 Brazo oscilante

Este elemento del sistema fue diseñado con base en las medidas del *track*, *wheelbase* y de la jaula. La función de este componente consistió en mantener un buen control del ángulo de *camber* de la llanta, con el objetivo de que los movimientos del sistema de suspensión trasero fueran más uniformes con respecto a un ángulo ya establecido.

Para que el elemento pudiera realizar los movimientos verticales deseados según el desplazamiento de la suspensión, se decidió utilizar rótulas en los dos extremos de este. Para el ensamble con rótulas del elemento, se requirió que en los dos extremos se tuvieran partes de un diámetro menor, para la realización del machuelado de la cuerda necesaria para dichas rótulas. En las Figuras 6.30 y 6.31, se observan el CAD del brazo oscilante con sus dimensiones y en vista isométrica respectivamente.

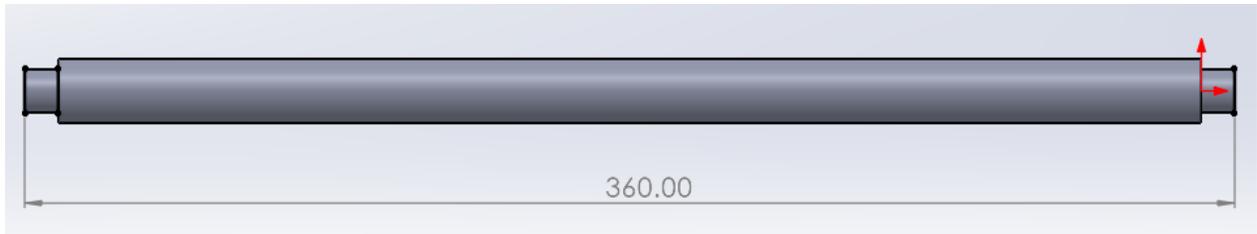


Figura 6.30 Dimensión del brazo oscilante

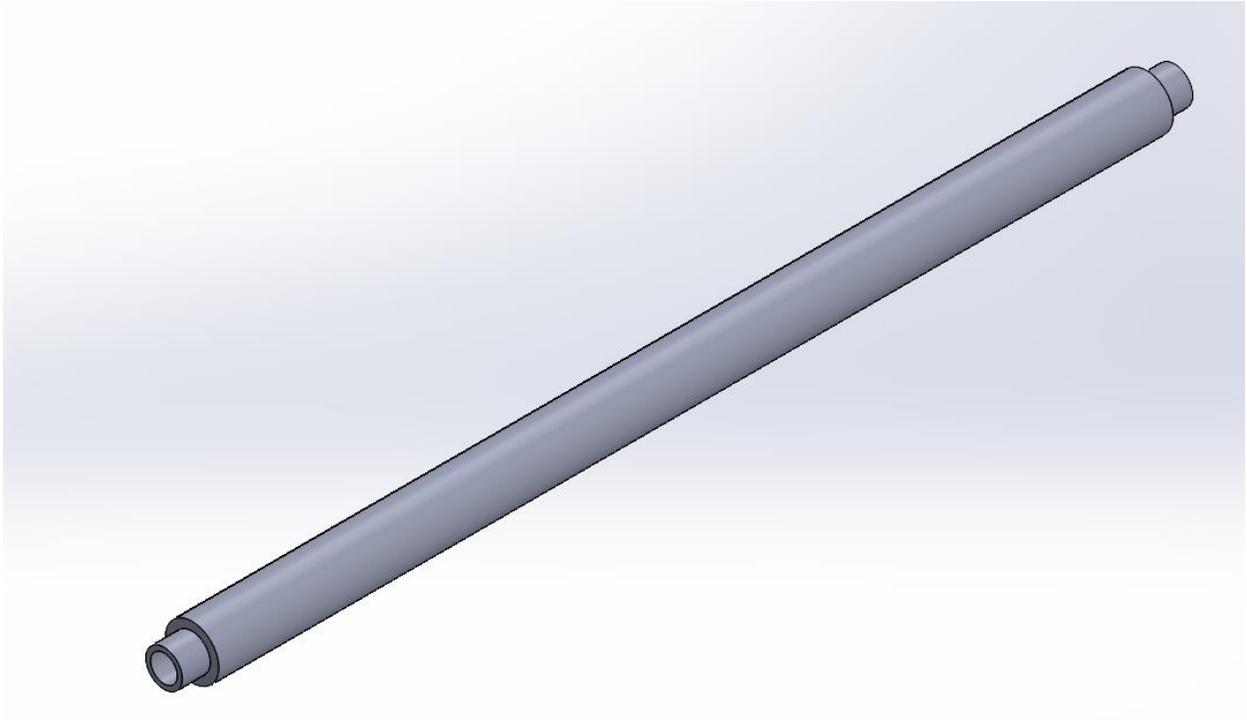


Figura 6.31 Vista isométrica del brazo oscilante.

6.3.7.3 Orejas traseras

En el diseño de las dimensiones de las orejas traseras (Figura 6.32), se tomó como principal parámetro el track. Para la dimensión “a”, se utilizó la geometría de la jaula y las dimensiones de esta, ya que la distancia de la jaula a las horquillas variaba linealmente. La dimensión “a”, representa la distancia entre la circunferencia del tubo de la jaula y el centro del barreno para el punto de apoyo de la horquilla en la oreja.

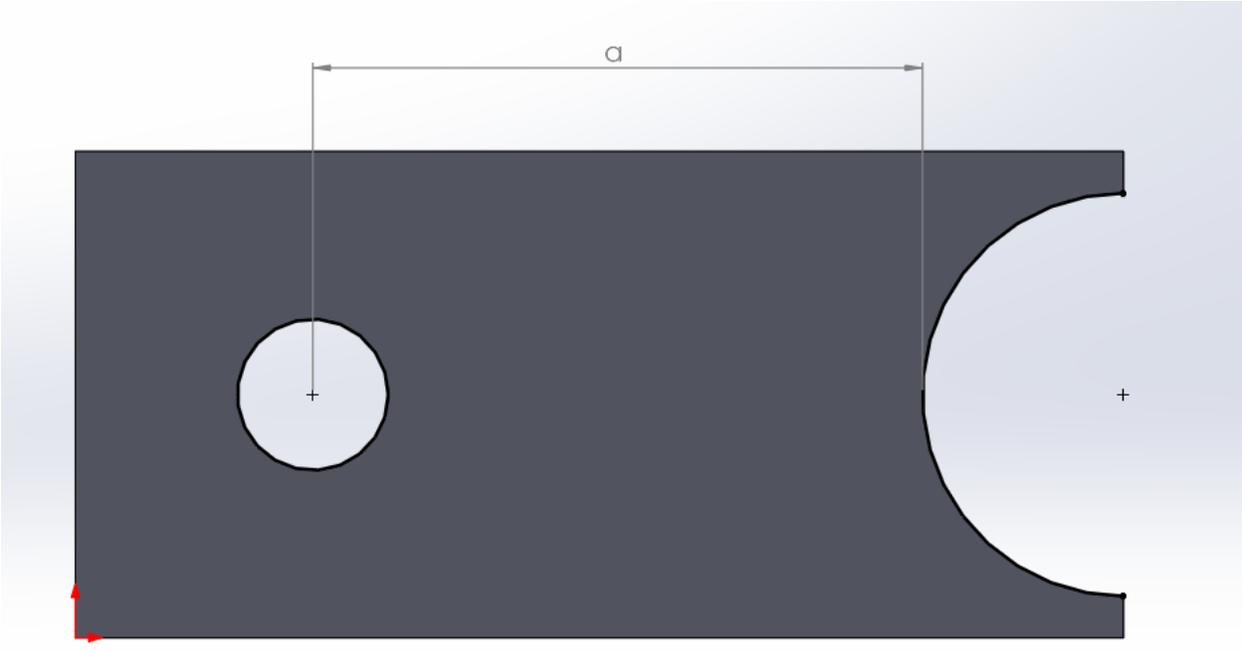


Figura 6.32 Dimensión “a” en las orejas de la suspensión trasera.

Para obtener la dimensión “a” de las orejas traseras, se utilizó un polígono en donde se representó la variación lineal en la distancia de la jaula a la horquilla (Figura 6.33). Se introdujo un valor, el cual fue el de la longitud de la oreja más larga, siendo de 68 mm, con lo que se obtuvieron las medidas mostradas en la Tabla 6.5.

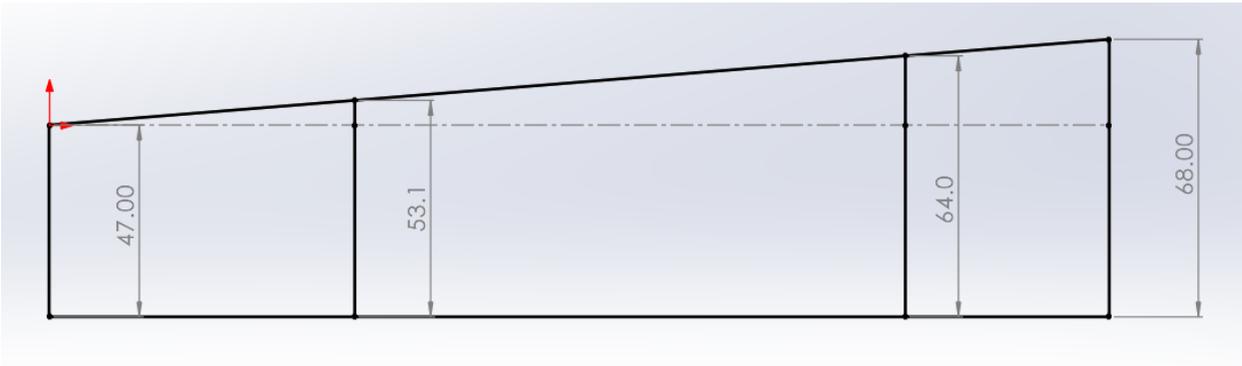


Figura 6.33 Polígono de orejas traseras.

Tabla 6.5 Dimensiones de las orejas traseras.

Oreja	Dimensión "a" (mm)
5	47.0
6	53.1
7	64.0
8	68.0

6.3.7.4 Soporte trasero del amortiguador

Para el soporte del amortiguador, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

Conectar el amortiguador al miembro estructural FAB (Figura 6.34).

Lograr un ángulo de amortiguador menor a 30 grados.

La menor distancia posible entre el punto de apoyo del amortiguador y el miembro estructural FABM cumpliendo los otros puntos mencionados.

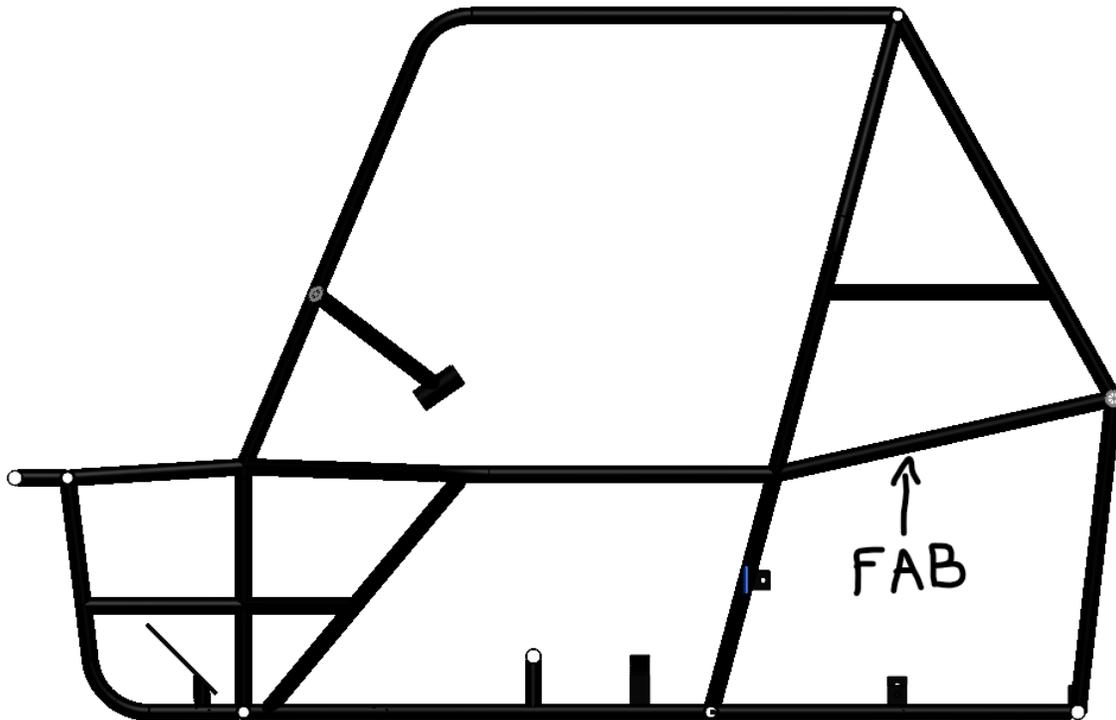


Figura 6.34 Miembro estructural FAB.

En las figuras 6.35 y 6.36 se muestra el CAD con las dimensiones obtenidas para el soporte del amortiguador trasero y su vista isométrica respectivamente.

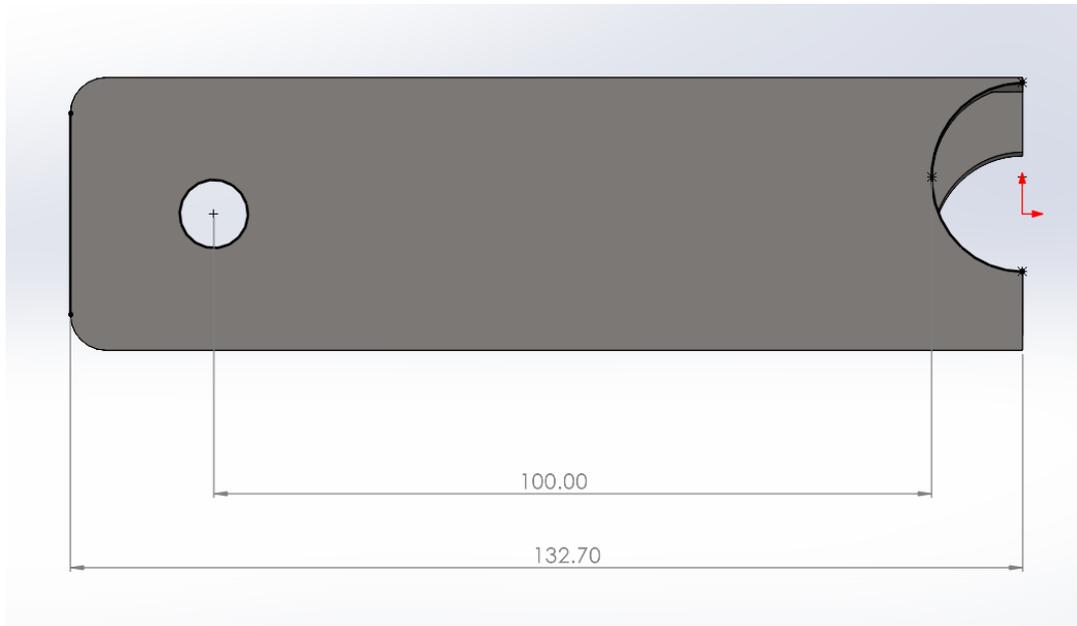


Figura 6.35 Dimensiones para el soporte de amortiguador trasero.

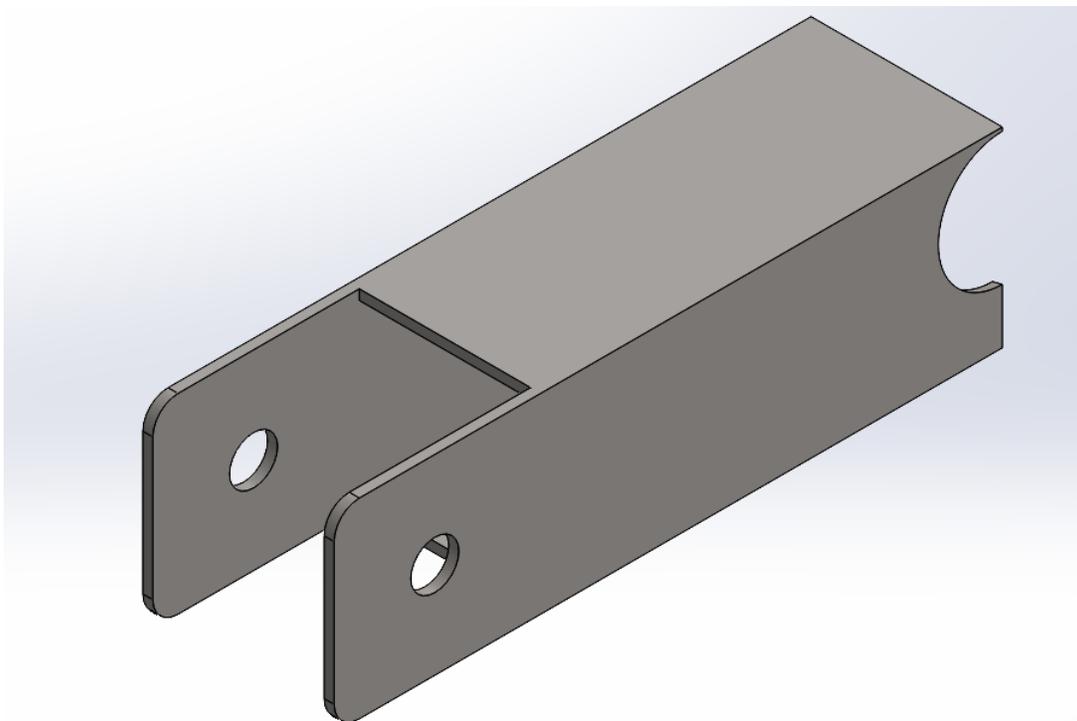


Figura 6.36 Vista isométrica del soporte de amortiguador trasero.

6.3.8 Simulaciones del sistema de suspensión trasera

Para obtener los esfuerzos en los elementos y dimensiones como el espesor o diámetro, se realizaron simulaciones de cargas estáticas. Las dos simulaciones representan un impacto del vehículo y la caída sobre una sola llanta del sistema.

6.3.8.1 Simulación de impacto

Para la simulación de impacto, se estableció una carga lateral basada en aproximadamente el peso del vehículo con piloto. En la simulación los elementos son los sometidos a dicha carga.

Los parámetros utilizados fueron:

Fuerza: 3000 N

En la Figura 6.37 se muestra gráficamente el planteamiento de la simulación.

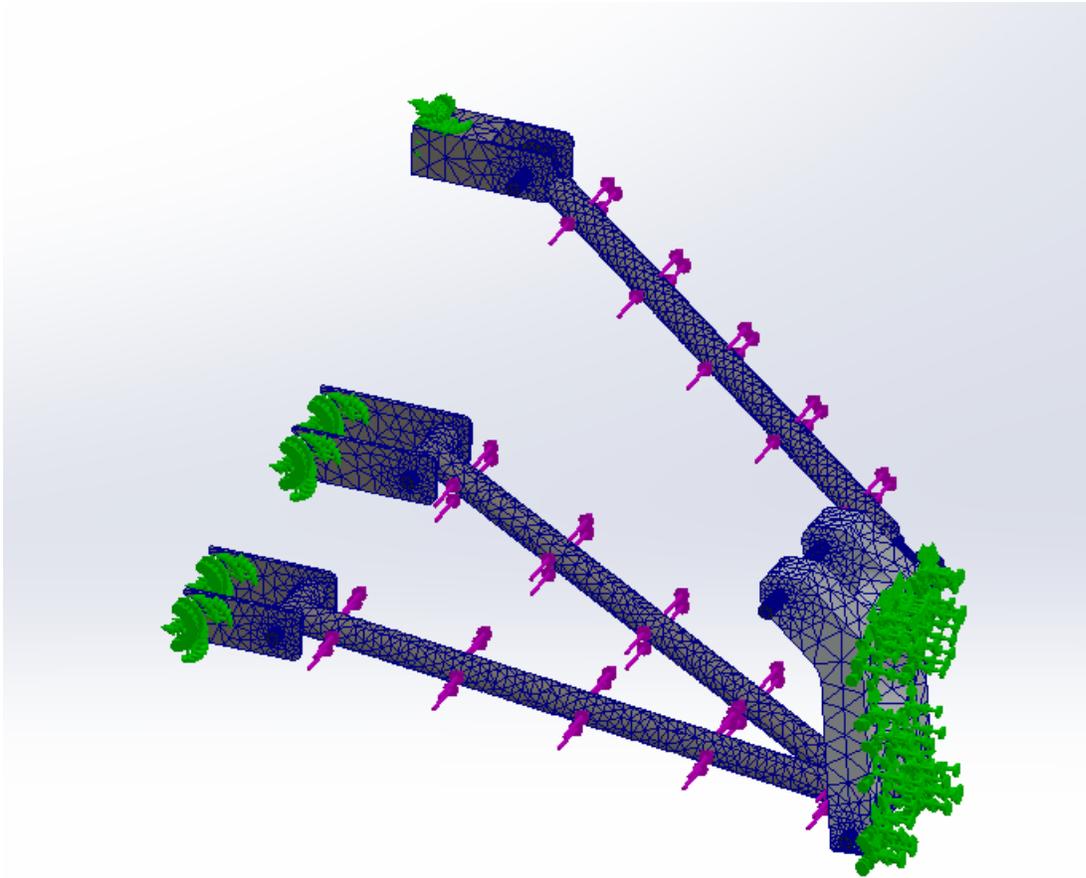


Figura 6.37 Cargas, puntos fijos y mallado de la simulación.

La fuerza representa un impacto de frente en los elementos de la suspensión, los puntos fijos son la soldadura de las orejas a la jaula y a la llanta fija.

6.3.8.2 Simulación de caída sobre una sola llanta

Para la simulación de caída sobre una sola llanta, se estableció una carga sobre el portabaleros basada en aproximadamente el peso del vehículo con piloto. Se utilizó el caso en el que el amortiguador alcanza toda su carrera y su punto de apoyo se vuelve un punto fijo.

Los parámetros utilizados fueron:

Fuerza: 3000 N

En la Figura 6.38 se muestra gráficamente el planteamiento de la simulación.

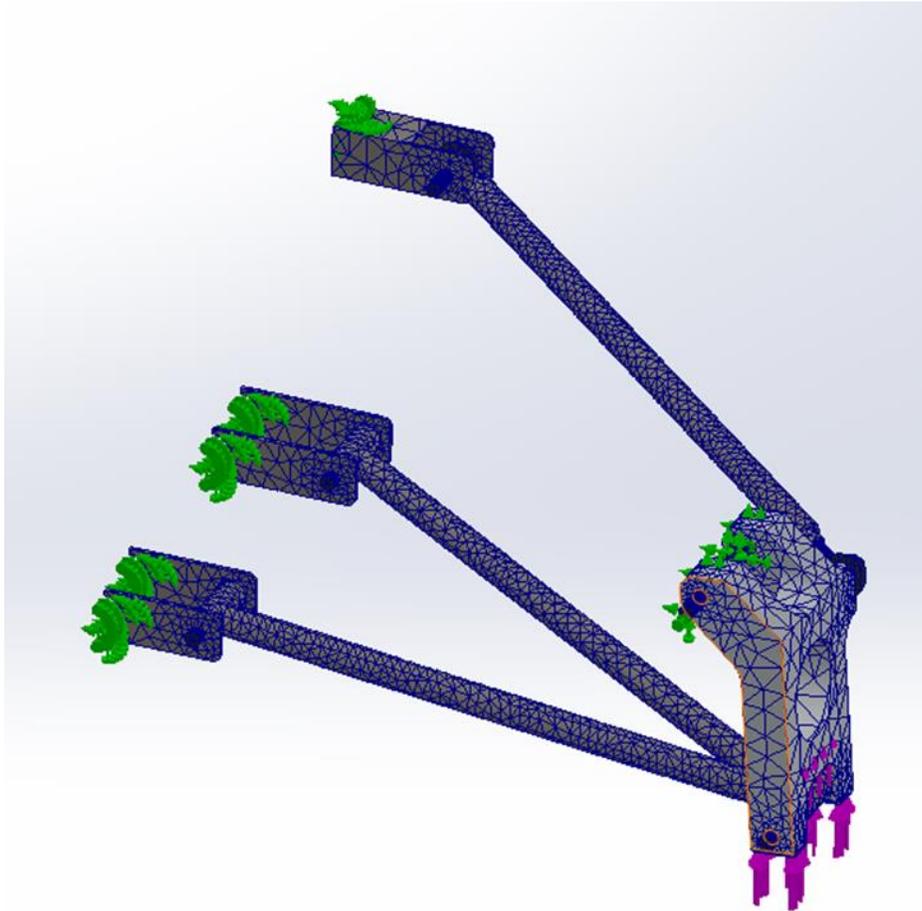


Figura 6.38 Cargas, puntos fijos y mallado de la simulación.

La carga mostrada en la simulación representa el peso del vehículo al caer sobre una sola llanta, los puntos fijos representan la soldadura de los soportes a la jaula y del soporte del amortiguador en el portabaleros al ocurrir su máxima compresión.

6.3.9 Soporte de amortiguador de la suspensión trasera

Debido a necesidades por reglamento de la sección de jaula, fue requerido que el soporte del amortiguador trasero tuviese una dimensión mayor a los 10 centímetros, para poder conectarse al FBM y que permitiera una buena altura de la suspensión mayor a 30 centímetros. Por lo que, para el diseño de este soporte, se realizaron simulaciones con y sin refuerzos.

La simulación incluyó lo siguientes parámetros (Figura 6.39):

Fuerza sobre el tornillo del amortiguador en el soporte de 3000 N, yendo al caso en que el vehículo cae sobre una sola llanta y el amortiguador alcanza toda su carrera.

Los extremos del tubo de la jaula fijos.

Todas las uniones con excepción del tornillo del amortiguador son con soldadura.

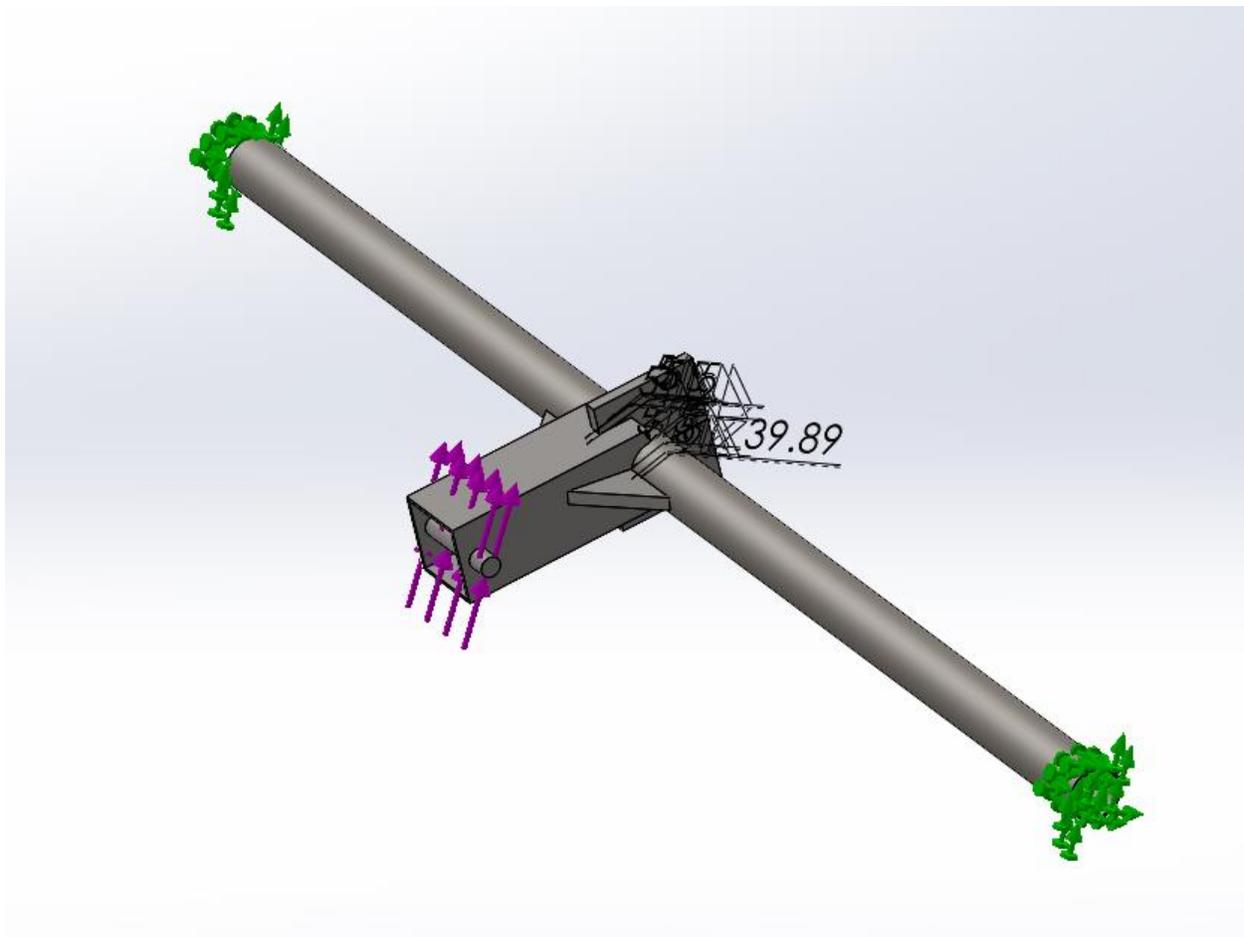


Figura 6.39 Cargas y puntos fijos en la simulación del soporte.

Debido a los resultados de la simulación, los cuales se muestran en la Figura 6.40, en donde los esfuerzos máximos ocurren en los puntos de unión del tupo con el soporte. fue necesario realizar simulaciones con distintos tipos de refuerzos, siendo estos casos los siguientes:

Un refuerzo superior

Un refuerzo superior e inferior

Refuerzos laterales en ambos lados y uno superior

Refuerzos superiores, inferior y en ambos laterales

Igualmente, se realizaron simulaciones con dos espesores distintos en los refuerzos: 0.25 pulgadas y 0.125 pulgadas.

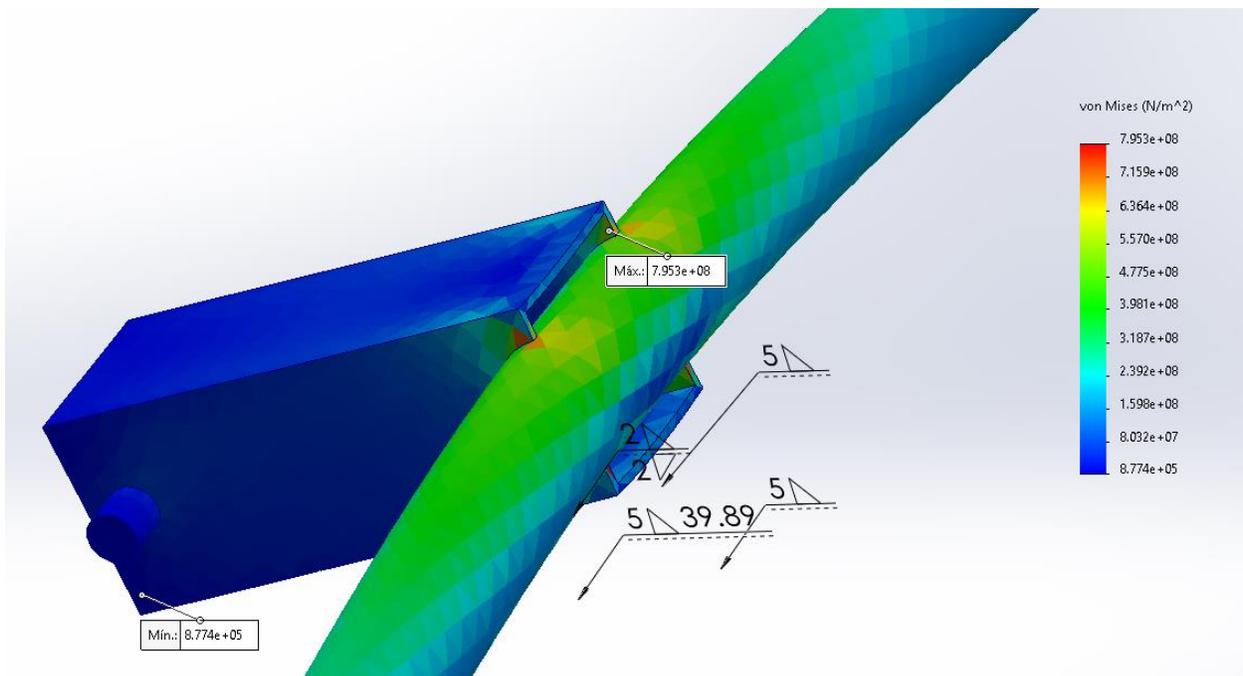


Figura 6.40 Esfuerzos de Von Mises en el soporte y tubo.

Los resultados de las simulaciones de los refuerzos se muestran en la sección de resultados.

El refuerzo escogido se encuentra en la sección de resultados.

6.3.10 Mecanismo gráfico de la suspensión trasera

El sistema de suspensión trasero funciona como un mecanismo de cuatro barras con inversión y con el amortiguador siendo la corredera, siendo los eslabones los elementos siguientes:

Horquilla Trasera

Brazo oscilante

Distancia de los puntos de apoyo entre la horquilla trasera y el brazo oscilante en el portabaleros.

Distancia de los puntos de apoyo entre la horquilla trasera y el brazo oscilante en la jaula.

Los movimientos del mecanismo de suspensión trasera están dados por la elongación o compresión del amortiguador. Así que, para conocer los desplazamientos del mecanismo, se utilizó a su estado con el amortiguador extendido (12.9 in) y su estado extendido (18.2 in).

El esquema que representa el mecanismo se observa en la Figura 6.41. En donde, AB representa al brazo oscilante, CD a la horquilla trasera, AC la distancia de apoyos en el portabaleros y BD la distancia entre apoyos en la jaula. También se observa a la corredera E, la cual es el amortiguador, y la altura del vehículo según el movimiento del mecanismo.

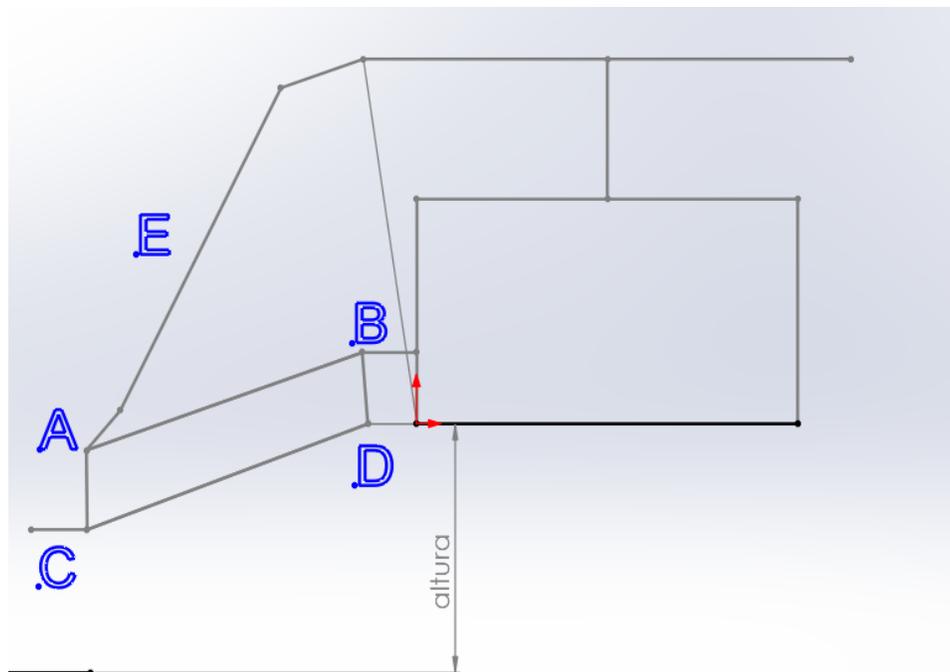


Figura 6.41 Esquema de suspensión trasera.

6.3.10.1 Mecanismo con amortiguador extendido

Para obtener el comportamiento del mecanismo cuando el amortiguador se encuentra en su máxima elongación, se utilizó la dimensión de este como 18.2 in. En la Figura 6.42 se muestra el estado del mecanismo.

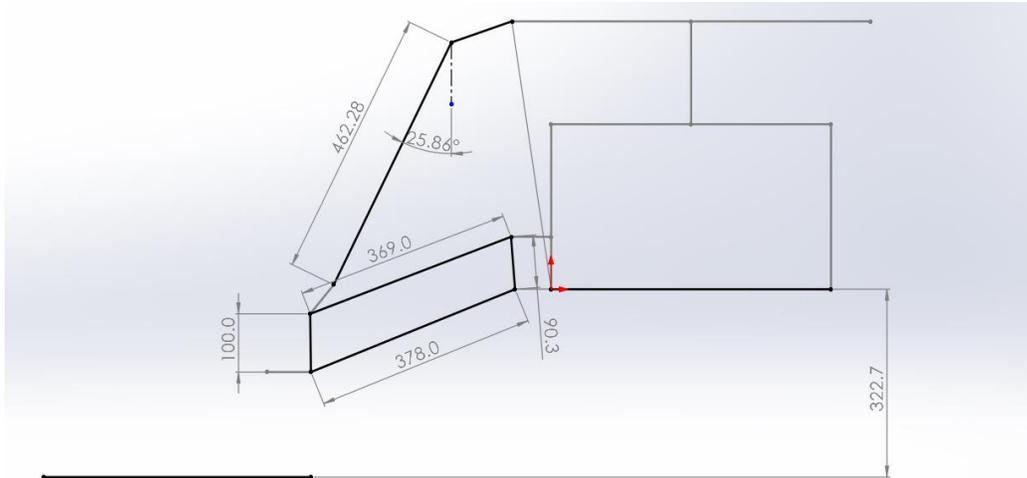


Figura 6.42 Estado del mecanismo con la máxima elongación del amortiguador.

6.3.10.2 Mecanismo con amortiguador comprimido

Para obtener el comportamiento del mecanismo cuando el amortiguador se encuentra en su máxima compresión, se utilizó la dimensión de este como 12.9 in. En la Figura 6.43 se muestra el estado del mecanismo.

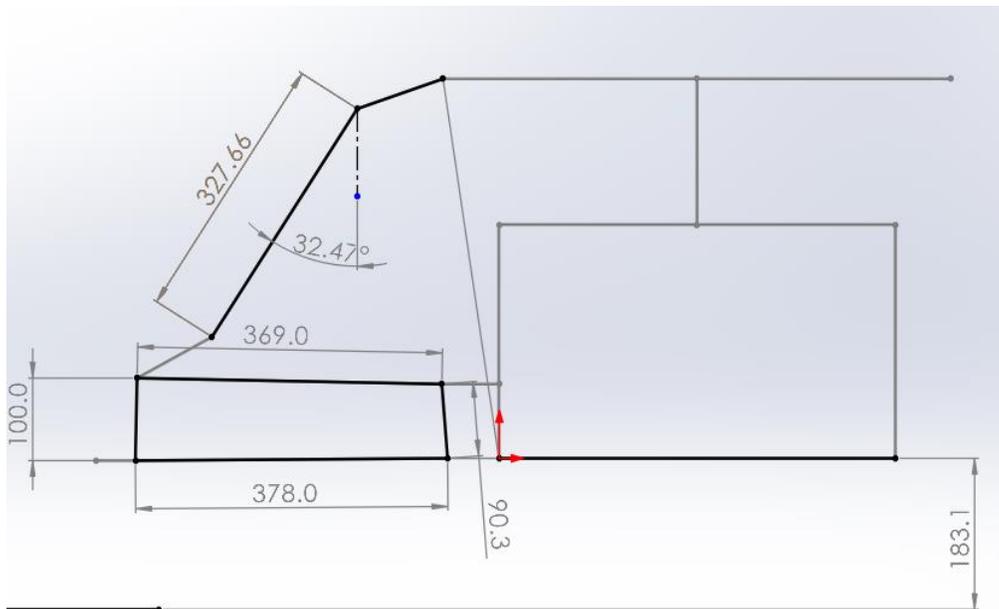


Figura 6.43 Estado del mecanismo con la máxima compresión del amortiguador.

6.3.10.3 Condición de Grashof.

Para garantizar un buen funcionamiento del mecanismo de cuatro barras, es importante que cumpla con la condición de Grashof, dada por la ecuación 1.

$$S + L \leq P + Q \quad (1)$$

En donde S, L, P y Q representan a:

S: Brazo oscilante.

L: Distancia entre puntos de apoyo en la jaula.

P: Horquilla trasera.

Q: Distancia entre puntos de apoyo en el portabaleros.

El estado del mecanismo cuando el amortiguador se encuentra en su elongación establecida de 17.9 in, se observa en la Figura 6.44.

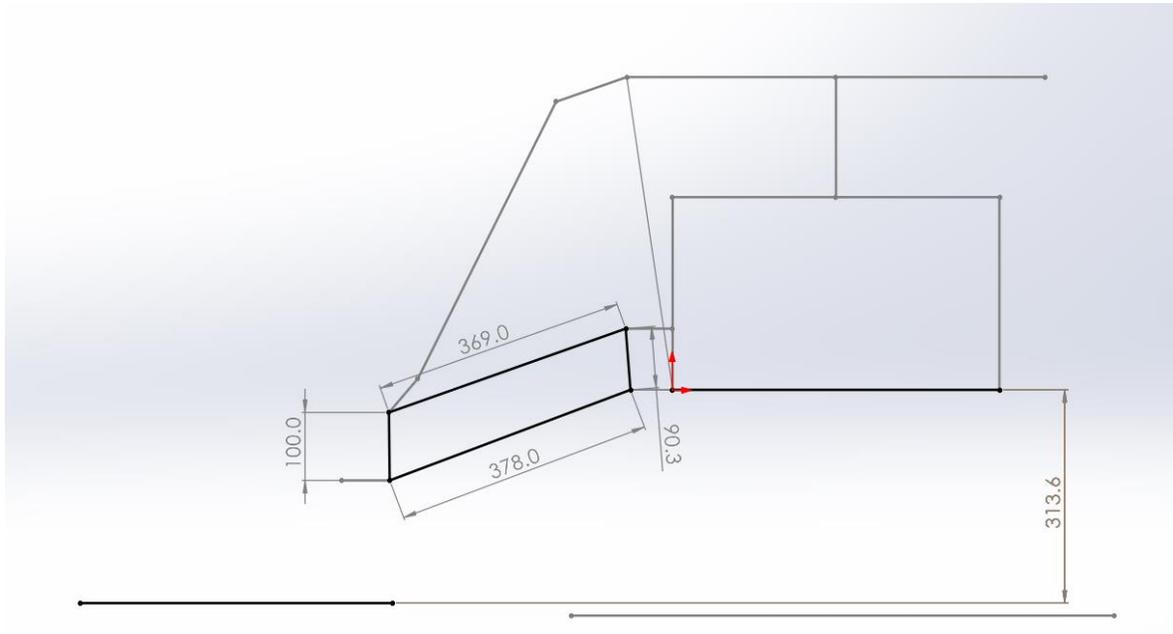


Figura 6.44 Estado del mecanismo cuando se encuentra a 17.9 in el vehículo.

Sustituyendo en la Ecuación 1 las longitudes de los eslabones, se tiene:

$$378 + 90.3 < 369 + 100$$

$$468.3 < 469$$

Por lo tanto, se cumple la condición de Grashof en el mecanismo.

6.3.11 Materiales de los elementos de la suspensión trasera

Para los materiales de los elementos, se utilizó el mismo procedimiento que la sección 7.2.6, dentro de la cual, se obtuvieron:

6.3.11.1 Presentación de los materiales.

Se obtuvieron las presentaciones observadas en la Tabla 6.6 para los materiales de los elementos.

Tabla 6.6 Presentaciones de los materiales de la suspensión trasera.

Elemento	Presentación del material
Horquilla Trasera	Tubo
Brazo Oscilante	Tubo
Bujes	Barra sólida
Soportes	PTR
Orejas	Solera

6.3.11.2 Dimensiones de los materiales.

Las dimensiones para obtener para cada presentación de material se observan en las Figuras 6.21, 6.22, 6.23, 6.24. La figura correspondiente a cada presentación se muestra en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Figuras correspondientes para las dimensiones de cada presentación

Presentación del material	Figura correspondiente
Tubo	Figura 6.21
Barra sólida	Figura 6.22
PTR	Figura 6.23
Solera	Figura 6.24

Las dimensiones de los materiales se eligieron con base en las simulaciones realizadas en el desarrollo y de los esfuerzos equivalentes de Von Mises y deformaciones obtenidas de dichas simulaciones en la sección de resultados.

6.3.11.3 Materiales.

Para la elección del material, así como en la sección 7.3.5.2, fueron utilizados los resultados de las simulaciones realizadas en la sección 7.3.3

Otros puntos que se tomaron la cuenta para la elección del material fueron:

Disponibilidad comercial del material

Disponibilidad comercial de la presentación del material

Facilidad para transporte

Maquinabilidad

6.4 Manufactura y selección de los elementos del sistema

6.4.1 Tolerancias dimensionales

6.4.1.1 Grupo de juegos

Las tolerancias de los elementos del sistema de suspensión fueron determinados con base en los juegos esperados siguiente siguientes:

Horquilla con buje-juego amplio

Oreja con horquilla-juego mediano

Oreja con tornillo-juego amplio

Tornillo con buje-juego mediano

6.4.1.2 Obtención de la tolerancia del árbol-agujero

Para la tolerancia dimensional, se utilizaron los apéndices 3 y 4.

Tolerancias dimensionales del juego tornillo-buje

Al tratarse de un juego mediano, se decidió utilizar H8/e8

La dimensión nominal es de 3/8 de pulgada o 9.525 mm, por lo cual, los valores de la tolerancia H8/ e8, son los siguientes:

Agujero: $9.525 \begin{smallmatrix} +0.022 \\ 0.000 \end{smallmatrix}$

Árbol: $9.525 \begin{smallmatrix} -0.025 \\ -0.047 \end{smallmatrix}$

6.4.1.3 Juego máximo, juego mínimo y tolerancia funcional

Para el cálculo del juego máximo y juego mínimo

Cálculo de juego máximo y juego mínimo del ajuste tornillo-buje.

Utilizando las Ecuaciones 3, 4 y 5, se obtuvieron los juegos máximo y mínimo, así como la tolerancia funcional.

$$J_{max} = d1_{max} - d2_{min} \quad (3)$$

$$J_{min} = d1_{min} - d2_{max} \quad (4)$$

$$TF = J_{max} - J_{min} \quad (5)$$

Sustituyendo los valores en las Ecuaciones 2 y 3, se obtiene:

$$J_{max} = 0.022 \text{ mm} - (-0.047 \text{ mm})$$

$$J_{min} = 0.000 \text{ mm} - 0.025 \text{ mm}$$

$$J_{max} = 0.069 \text{ mm}$$

$$J_{min} = 0.025 \text{ mm}$$

1

Sustituyendo los valores en la Ecuación 4, se obtiene la máxima tolerancia funcional:

$$TF = 0.069 \text{ mm} - 0.025 \text{ mm}$$

$$TF = 0.044 \text{ mm}$$

Las tolerancias dimensionales, juegos máximos y mínimos, y tolerancias funcionales, se encuentran en la sección de resultados

6.4.2 Componentes de la suspensión delantera

6.4.2.1 Horquillas delanteras

Para la fabricación de las horquillas, se comenzó cortando ocho tramos de 50 mm en el tubo de acero 1020 con la sierra cinta como se observa en la Figura 6.45, obteniendo así las piezas de los puntos de apoyo de las horquillas en la jaula. Posteriormente, estas piezas fueron careadas en el torno, para mantener mayor uniformidad en su superficie.



Figura 6.45 Corte de tubo con la sierra cinta

Se procedió a cortar ocho tramos de 370 mm de acero 1020 para las piezas largas de las horquillas, esto, igualmente fue realizado con la sierra cinta. Al igual que con las piezas de los

puntos de apoyo, se realizó un desbaste y luego careo en el torno (Figura 6.46), para dejar las piezas a la longitud requerida y con una superficie uniforme.

Debido al diámetro interior de 13 mm del tubo de acero 1020, para fabricar la pieza en soporte de la rótula en la horquilla, fue necesario utilizar una barra sólida de 0.75 pulgadas de acero 1045. Esto debido al diámetro interior de 13 mm del tubo de acero 1020, ya que, si el barreno requerido para una cuerda de 1/2-20 NF es de 29/64 pulgadas según la Tabla 1, el tubo de acero 1020 no tiene el material suficiente para poder tener ese barreno.

La barra de 0.75 in de diámetro exterior de acero 1045, se cortó en cuatro tramos, dos de 150 mm (para las horquillas superiores) y dos 70 mm (para las inferiores). Después, se maquinó en el torno el barreno de 29/64 pulgadas, atravesando completamente los cuatro tramos de la barra sólida. Para finalizar la pieza, se utilizó el machuelo en la pieza, y se realizaron barrenos de 50 mm en las cuatro piezas. El maquinado en el torno se muestra en la Figura 6.46.



Figura 6.46 Maquinado en torno.

Para lograr que los tubos embonaran correctamente para la soldadura, se requirió de plantillas para cortes boca de pescado (Figura 6.47) hechas en SolidWorks. Los cortes bocas de pescado fueron realizados en la fresadora (Figura 6.48).

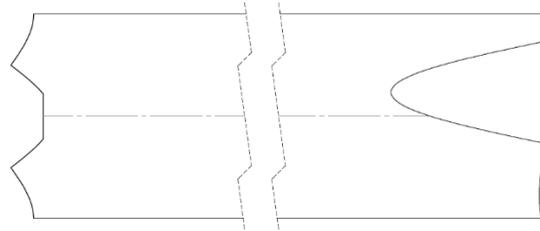


Figura 6.47 Plantillas boca de pescado horquilla delantera inferior.



Figura 6.48 Maquinado de bocas de pescado en la fresadora.

Para realizar el ensamble de las piezas para las horquillas al soldarlas, se requirió de moldes hechos con un plano a tamaño real y con puntos fijados con madera para evitar movimientos de las piezas o los efectos de la dilatación al realizar la soldadura. Igualmente, fue maquinado y utilizado un eje, para lograr la concentricidad en los puntos de apoyo de la horquilla a la jaula. Los moldes de las horquillas delanteras se muestran en la Figura 6.49.



Figura 6.49 Moldes de las horquillas delanteras.

En el caso de las horquillas superiores, fue necesario cortar seis tramos de solera (tres por horquilla), para construir el soporte de amortiguador sobre ellas. Con los tramos, se construyó la estructura del soporte del amortiguador a la horquilla, el soporte fue soldado primero entre sus tres piezas y luego, a la horquilla.

6.4.2.2 Orejas

Para la fabricación de las orejas, se utilizó la sierra cinta para cortar en tramos con la medida requerida la solera con la que se realizaron.

Posteriormente y utilizando plantillas para la concentricidad de las orejas, en el taladro radial, se hicieron los barrenos de 3/8 pulgadas a cada oreja. El maquinado de los barrenos de las orejas en el taladro radial se muestra en la Figura 6.50.



Figura 6.50 Maquinado de las orejas en el taladro radial.

Para su ensamble con los miembros estructurales de la jaula, se utilizó un cortador vertical de 1 pulgada en la fresadora, con lo que se logró que las orejas pudieran estar sujetadas por la jaula.

6.4.2.3 Soportes

Para la fabricación de los soportes del amortiguador, se utilizó PTR de 1.5 pulgadas con dos milímetros de espesor.

Se realizó el corte de dos tramos PTR en la sierra cinta de 7 cm cada uno. Posteriormente, en el taladro radial se realizaron los barrenos a través de los cuales pasaría el tornillo que sujete al amortiguador a la jaula.

El material sobrante del PTR que impedía el ensamble con el amortiguador, fue cortado con esmeril y disco de corte.

Se hicieron dos cortes con plantillas de SolidWorks que representaron con su ángulo al miembro estructural FMB, para lograr el soporte y dicho miembro embonen.

6.4.2.4 Elementos comerciales para seleccionar

Se decidió utilizar rótulas de 1/2 pulgadas con base en el resultado de las simulaciones, así como, por el desempeño que tuvieron en la competencia BAJA SAE MÉXICO 2023, ya que ninguna de ellas se rompió.

6.4.3 Componentes de la suspensión trasera

6.4.3.1 Horquilla trasera

Para la fabricación de las horquillas traseras, se comenzó cortando seis tramos de 50 mm en el tubo de acero 1020 con la sierra cinta, obteniendo así las piezas de los puntos de apoyo de las horquillas en la jaula y al portabaleros. Posteriormente, estas piezas fueron careadas en el torno, para mantener mayor uniformidad en su superficie.

Se procedió a cortar cuatro tramos de 370 mm de acero 1020 para las piezas largas de las horquillas, esto, igualmente fue realizado con la sierra cinta. Al igual que con las piezas de los puntos de apoyo, se realizó un desbaste y luego careo en el torno, para dejar las piezas a la longitud requerida y con una superficie uniforme.

Fueron utilizadas las plantillas boca de pescado mencionadas en la sección anterior, para marcar los cortes en las piezas de las horquillas para lograr que embonen. Los cortes fueron realizados en la fresadora con un cortador anular de 3/4 de pulgada.

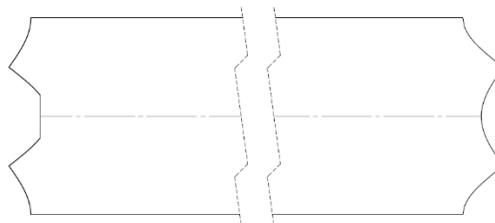


Figura 6.51 Plantilla boca de pescado de horquilla trasera.

Ya con las piezas manufacturados, se ensamblaron sobre un molde de madera con puntos de apoyo para impedir que ocurriese movimientos que afectaran el procedimiento de soldadura. Igualmente, se utilizó un eje para garantizar la concentricidad de los puntos de apoyo en la jaula. El molde de la horquilla trasera se muestra en la Figura 6.52.



Figura 6.52 Molde de la horquilla trasera.

6.4.3.2 Brazo oscilante

Para la manufactura del brazo oscilante, se realizó un corte de tubo de acero 1020 con la sierra cinta para obtener la pieza más larga del elemento. Posteriormente, se máquina en el torno el tramo cortado.

Para los soportes de las rótulas, se cortaron dos tramos de acero 1045 de 40 mm cada uno. Ambos tramos fueron maquinado en el torno, se comenzó con un careo¹, para posteriormente, realizar el barrenado 11/32 a través de toda la barra para el machuelo 1/8 24 NF correspondiente a la cuerda de la rótula. Se realizó el machueado a lo largo de 40 mm de la pieza.

Se realizó el ensamble de los dos cilindros de soporte de rótulo junto con la pieza principal del brazo y las rótulas, y al colocarse en las medidas esperadas, se soldó el ambos cilindros en los extremos de la pieza principal.

6.4.3.3 Orejas

Para las orejas traseras se utilizó el mismo procedimiento que para las orejas delanteras de la sección 6.3.2.2.

6.4.3.4 Soportes

Para la fabricación de los soportes de amortiguador trasero, se utilizó el mismo procedimiento que en la sección 6.3.2.3, con algunas diferencias como las siguientes:

Longitud de tramos cortados: 13 cm

Miembro estructural en donde se ensamblará: FAB

6.4.3.5 Elementos comerciales para seleccionar

Las rótulas utilizadas para el sistema de suspensión trasero son de 3/8 pulgadas, estas permitirán que el brazo oscilante haga los movimientos planteados en el mecanismo. El diámetro de las rótulas fue escogido con base en las simulaciones.

6.4.4 Componentes comunes en los dos sistemas

6.4.4.1 Bujes

Para la fabricación de los bujes se cortaron 14 (12 puntos de apoyo horquilla-jaula y 2 puntos de apoyo horquilla-portabaleros) tramos de 50 mm en la sierra cinta. Posteriormente, se les maquinó en el torno, reduciendo su diámetro de 5/8 de pulgada a 13 mm. También se les realizó un barrenado 13/32 pulgadas a lo largo de todo el elemento, con el objetivo de juego amplio tornillo-buje para un fácil ensamblaje.

6.5 Implementación del sistema en el vehículo

6.5.1 Soldadura de soportes y orejas en el vehículo

6.5.1.1 Alineación de las horquillas y concentricidad de las horquillas delanteras

Se utilizó un eje para mantener la concentricidad entre las rótulas de las horquillas delanteras superior e inferior. Las horquillas se alinearon con respecto al semieje, siendo este colonial a los soportes de las rótulas.

Para la horquilla trasera, se realizó su alineación de forma similar al de las delanteras. La horquilla se alineó con respecto al simieje, siendo este paralelo a una línea en la mitad de la horquilla.

6.5.1.2 Colocación y soldadura de las orejas

Con las horquillas tanto delanteras como traseras ya alineadas, se ensamblaron las orejas a cada horquilla, y a la jaula. Después de revisar la alineación de nuevo, se procedió a soldar las orejas de las seis horquillas a la jaula.

6.5.1.3 Colocación y soldadura de los soportes de amortiguador y brazo oscilante

Para los soportes del amortiguador tanto trasero como delantero, se colocaron sobre sus miembros estructurales correspondientes (FAB y FBM respectivamente). Posteriormente, se ensambló al amortiguador a ellos y a sus puntos de apoyo en las horquillas (Suspensión delantera) y portabaleros (Suspensión trasera). Se midió el aproximado de la altura alcanzada por la suspensión del vehículo en función de la posición del amortiguador, hasta que se obtuvo la esperada y se soldaron los soportes.

Para el soporte del brazo oscilante, se colocó el soporte en la altura considerada en la sección 1.1.1.1. Una vez colocado el soporte, se soldó a la jaula.

6.5.2 Ensamble de los elementos del sistema

6.5.2.1 Suspensión delantera

El ensamble de la suspensión delantera se realiza de la siguiente forma:

1. Se colocan los bujes de nylamid dentro de los puntos de apoyo de las horquillas a la jaula.
2. Se alinean las horquillas con respecto a las orejas y se colocan los tornillos horquilla-oreja.
3. Se ensambla con sus tornillos el amortiguador al su punto de soportes en la horquilla superior y al soporte de la jaula.
4. Se alinean los barrenos de los portabaleros al eje formado por las rótulas de las horquillas superior e inferior.
5. Se ensamblan con Tornillo las rótulas a sus respectivos barrenos en el portabaleros.
6. Se colocan y aprietan todas las tuercas de seguridad.

6.5.2.2 Suspensión trasera

1. Se colocan los bujes de nylamid dentro de los puntos de apoyo de las horquillas a la jaula.
2. Se alinean las horquillas con respecto a las orejas y se colocan los tornillos horquilla-oreja.
3. Se ensambla con sus tornillos el amortiguador al su punto de soportes en el portabaleros y al soporte de la jaula.
4. Se alinean los barrenos de los portabaleros al eje formado por las rótulas de las horquillas superior e inferior.
5. Se ensamblan las dos rótulas d brazo oscilante en sus extremos.
6. Se ensambla con tornillo a su soporte el brazo oscilante por medio de su rótula.
7. Se alinea el portabaleros haciendo uso del brazo oscilante, de modo que este, quede lo más vertical posible.
8. Se aprieta el tornillo del brazo oscilante.
9. Se ensamblan con sus tornillos las horquillas en traseras con el portabaleros.
10. Se colocan y aprietan todas las tuercas de seguridad.

6.6 Validación del sistema y participación en la competencia BAJA SAE MÉXICO 2024

Debido a inconvenientes técnicos, como problemas en el motor y en los frenos, el vehículo no pudo participar en la competencia BAJA SAE MÉXICO 2024, por lo cual, tampoco se realizaron ahí pruebas al sistema de suspensión.

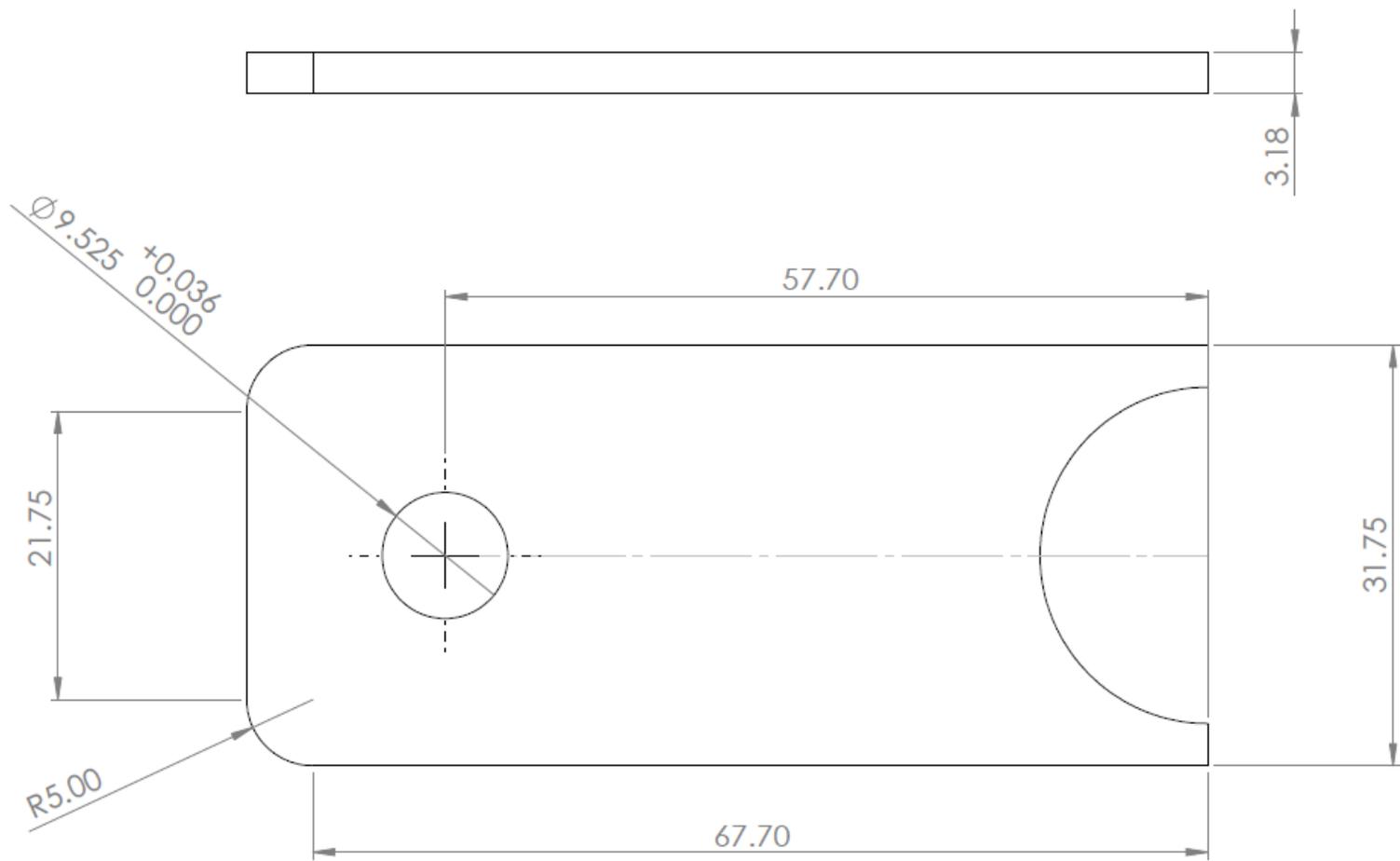
Sin embargo, se resolvieron los problemas del motor y freno, y con ello, se logró poner a prueba el vehículo.

En las instalaciones del deportivo Reynosa en la alcaldía Azcapotzalco de la Ciudad de México, se realizaron pruebas dinámicas. Para la suspensión, la prueba realizada, fue un camino de troncos, en donde el vehículo tendría que pasar sobre esos obstáculos. En la Figura 6.53, se observa la prueba realizada.

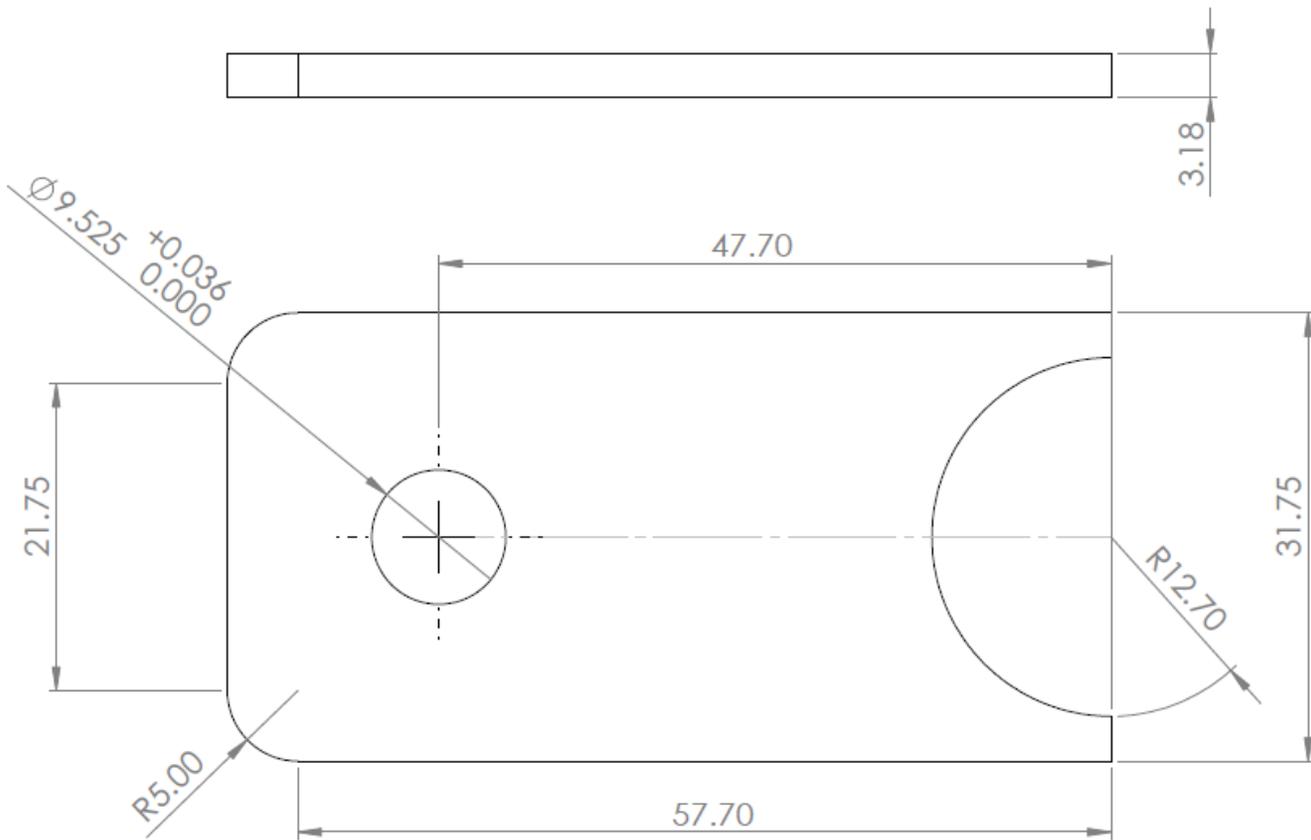


Figura 6.53 Prueba de suspensión del vehículo.

6.7 Planos



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	Oreja 1			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	1/20		



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
 Dr. Iván Gonzalez Uribe
 Dr. Francisco Beltrán Carbajal

2:1

mm



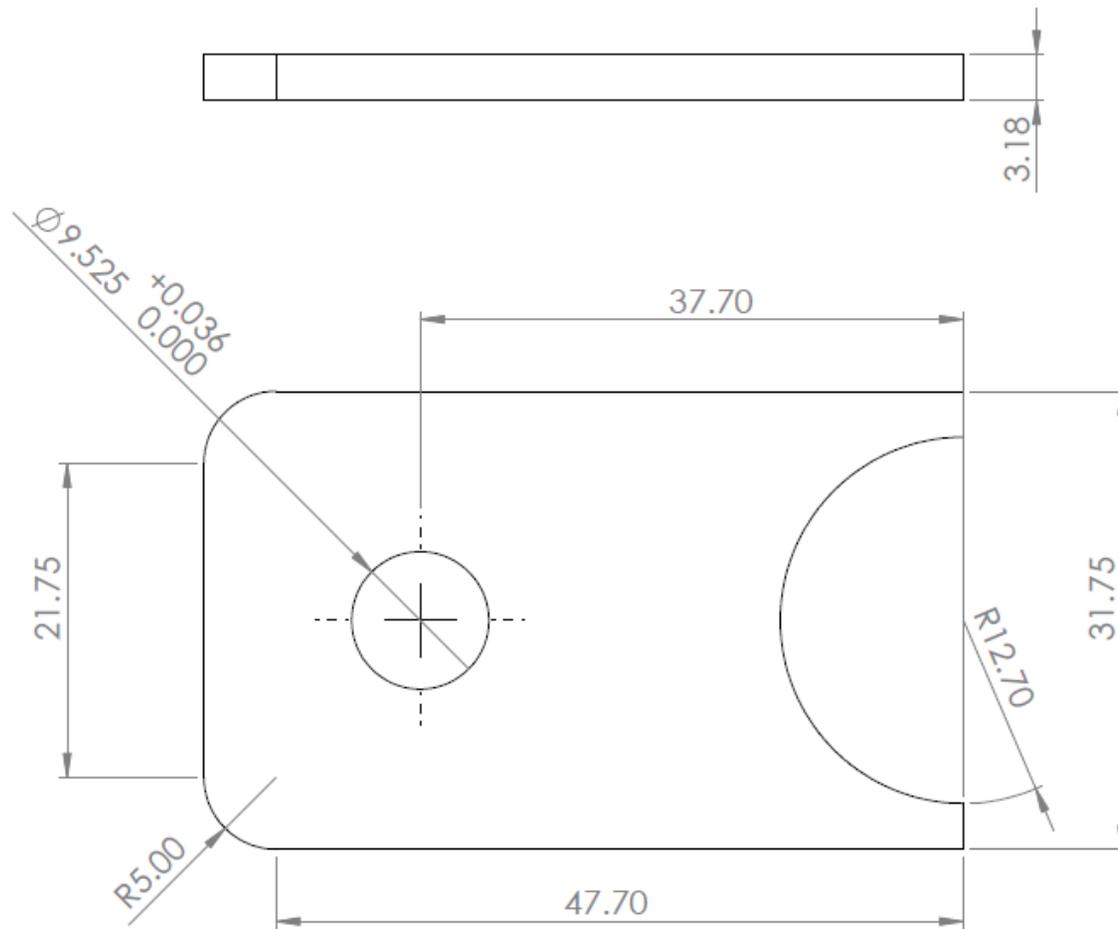
Fecha:
30/01/2025

UAM

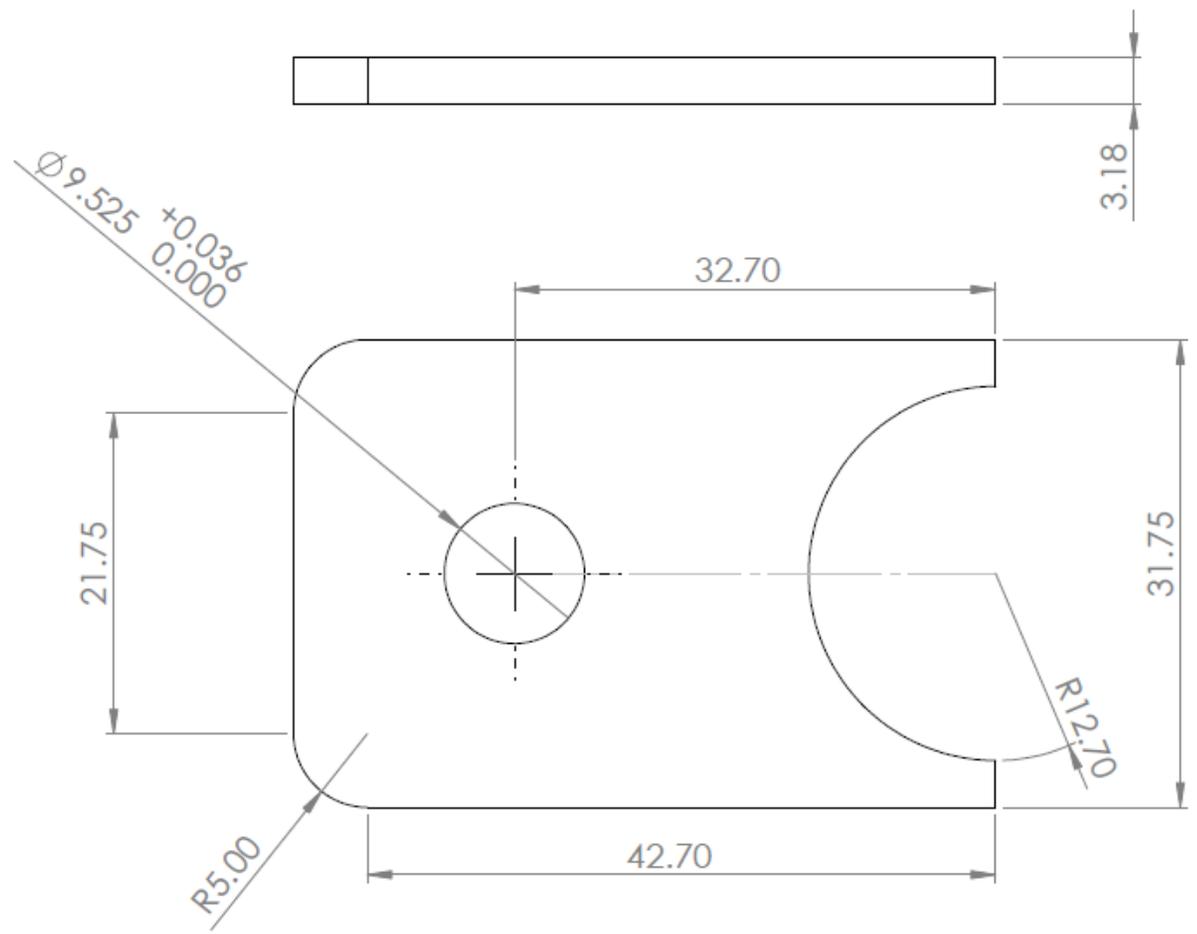
Oreja 2

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

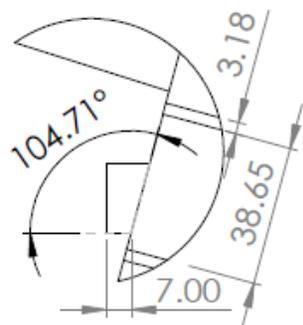
2/20



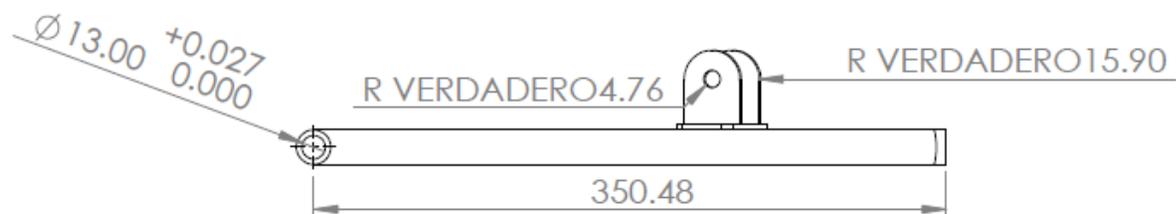
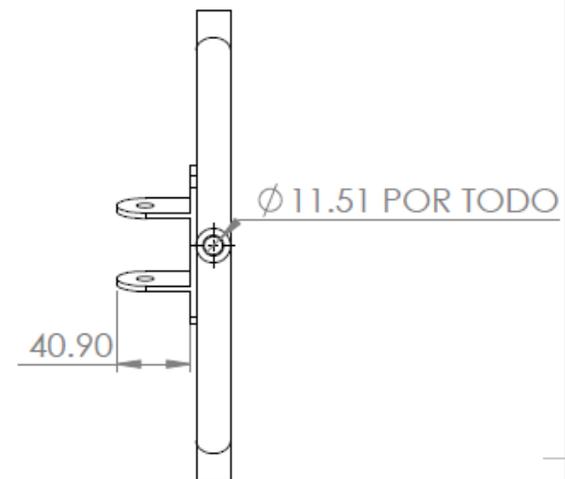
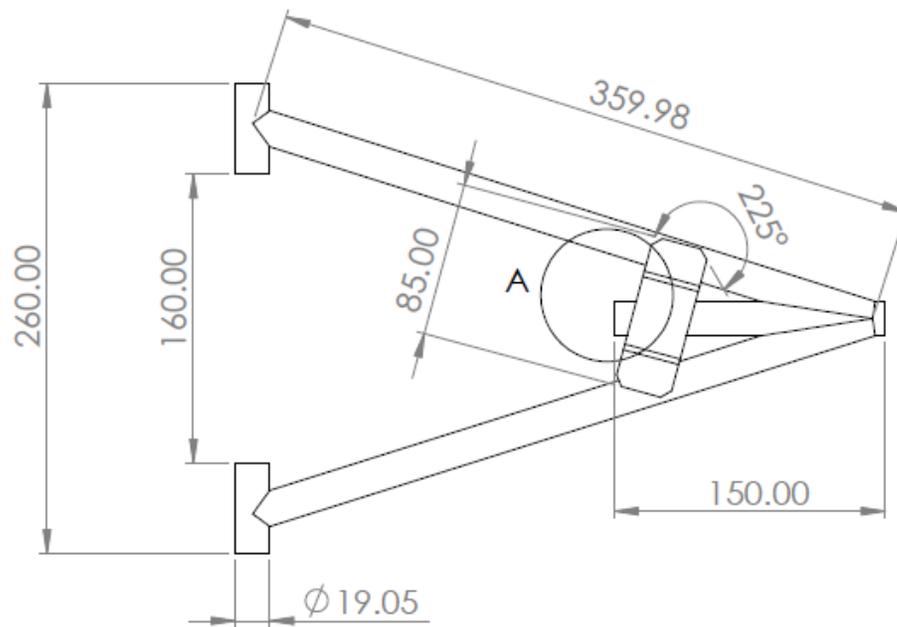
Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	<h2>Oreja 3</h2>			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	3/20		



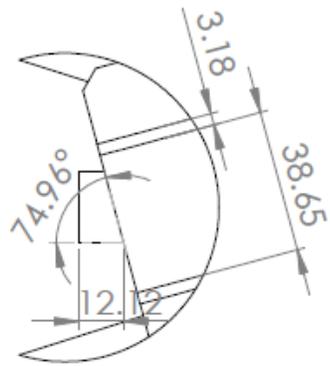
Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	<h2>Oreja 4</h2>			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	4/20		



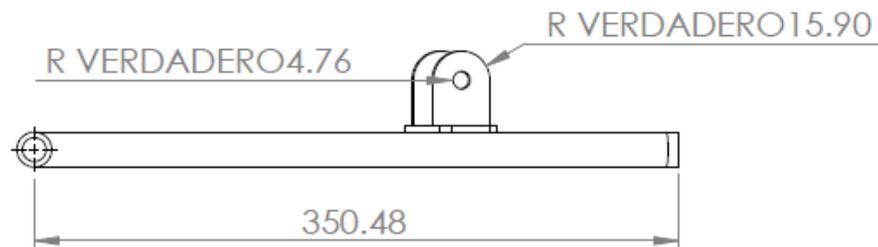
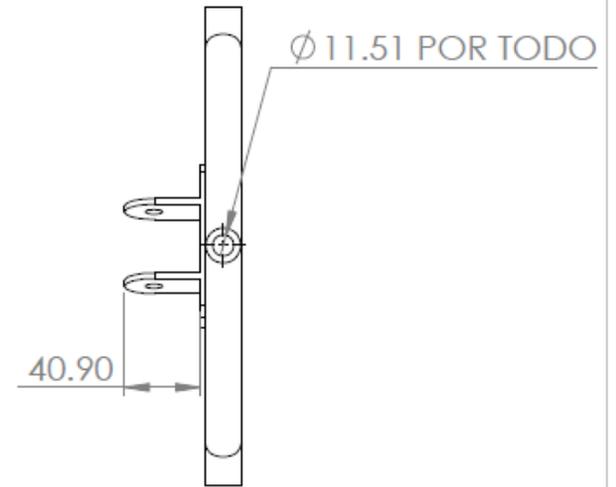
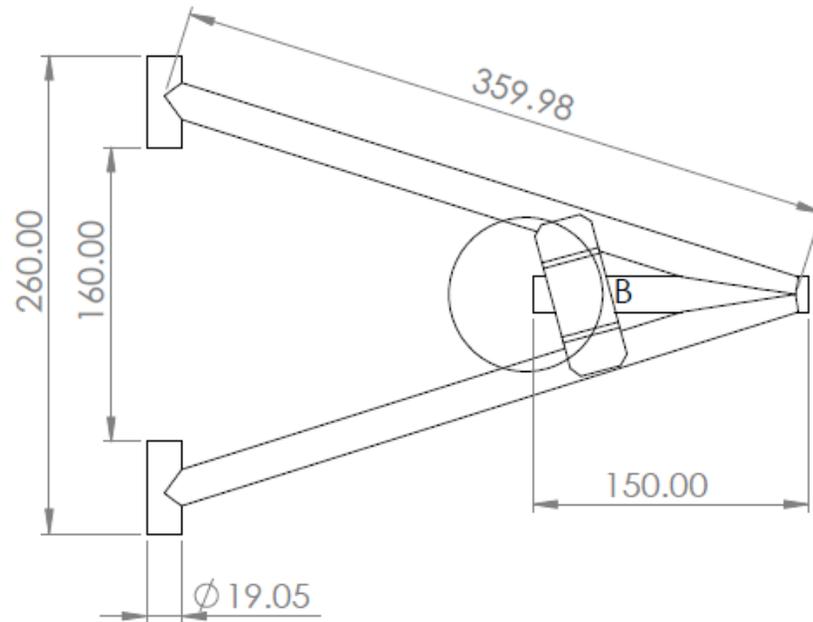
DETALLE A
ESCALA 1 : 2



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	1:4	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1>UAM</h1>	Horquilla superior derecha			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro			5/20



DETALLE B
ESCALA 1 : 2



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
Dr. Iván Gonzalez Uribe
Dr. Francisco Beltrán Carbajal

1:4

mm



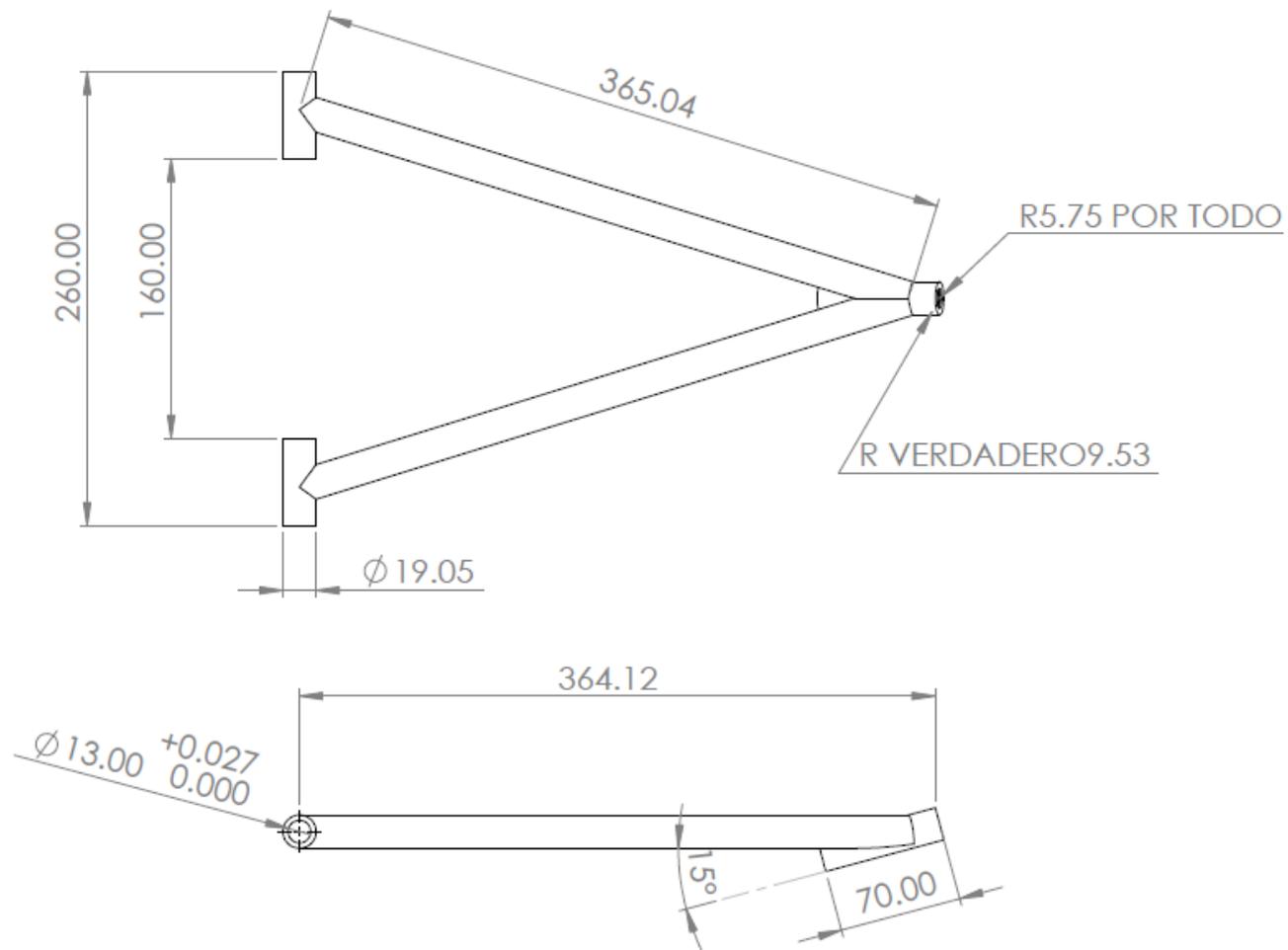
Fecha:
30/01/2025

UAM

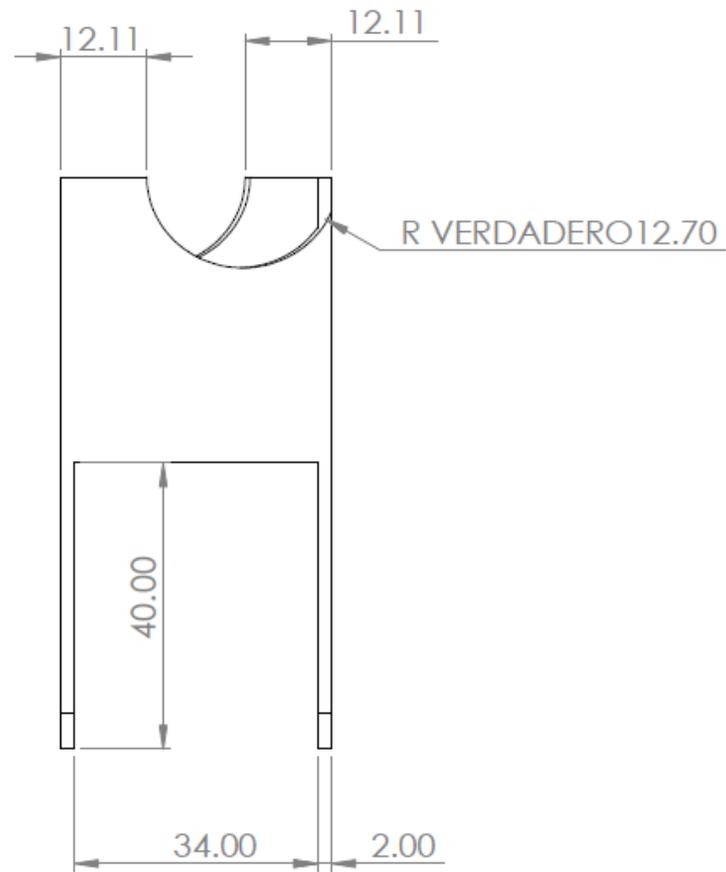
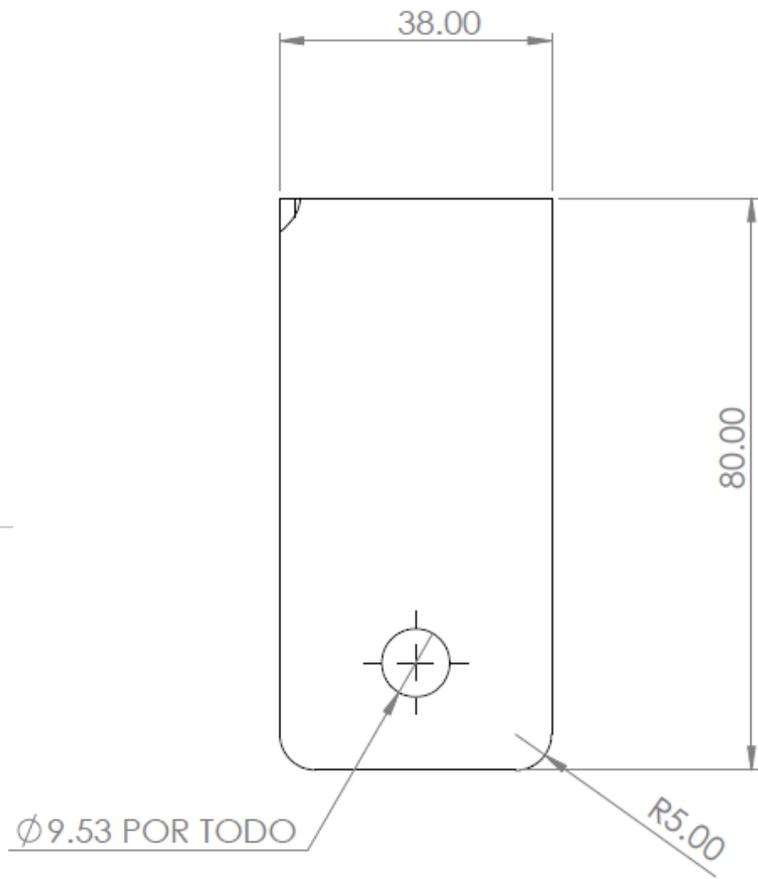
Horquilla superior izquierda

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

6/20



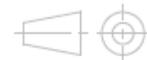
Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	1:4	mm		Fecha: 30/01/2025
	Horquilla inferior			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	7/20		



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
 Dr. Iván Gonzalez Uribe
 Dr. Francisco Beltrán Carbajal

1:1

mm

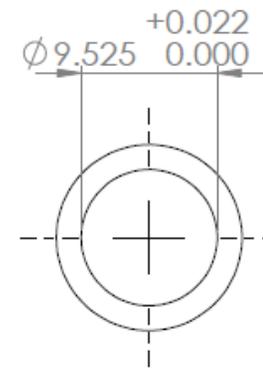
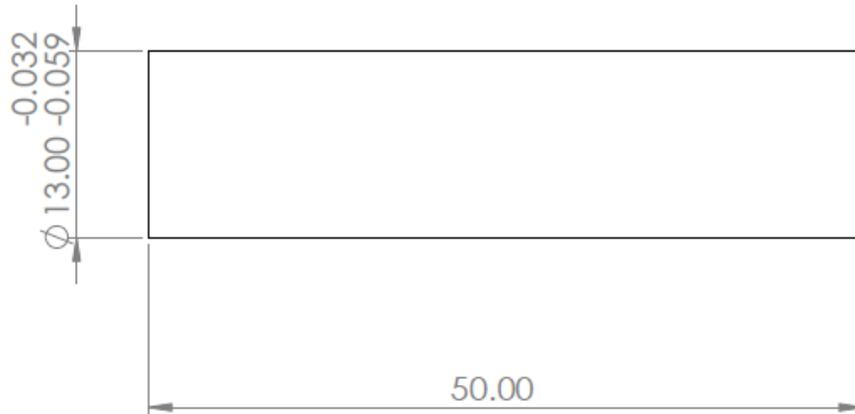


Fecha:
30/01/2025

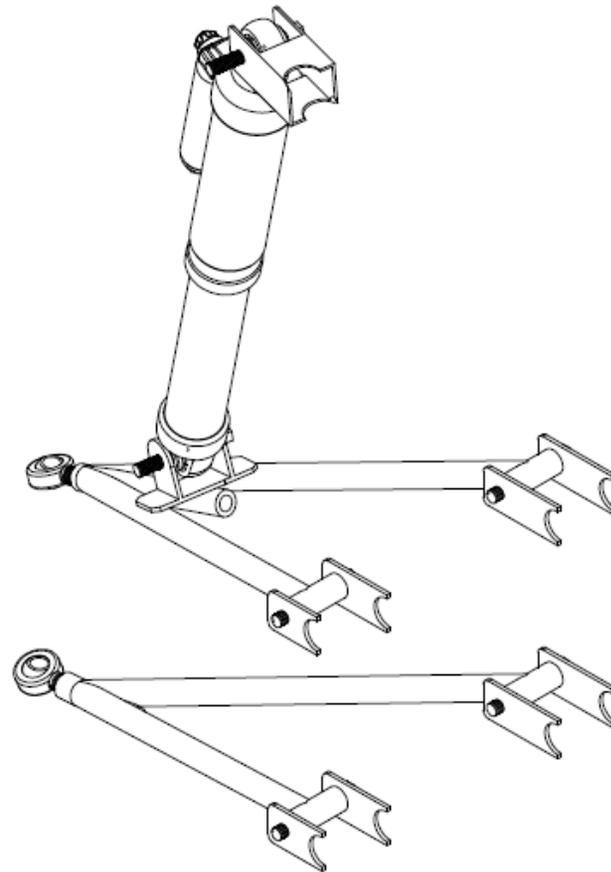
UAM

Soporte de amortiguador delantero

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	Buje			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro			9/20



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
Dr. Iván Gonzalez Uribe
Dr. Francisco Beltrán Carbajal

1:5

mm

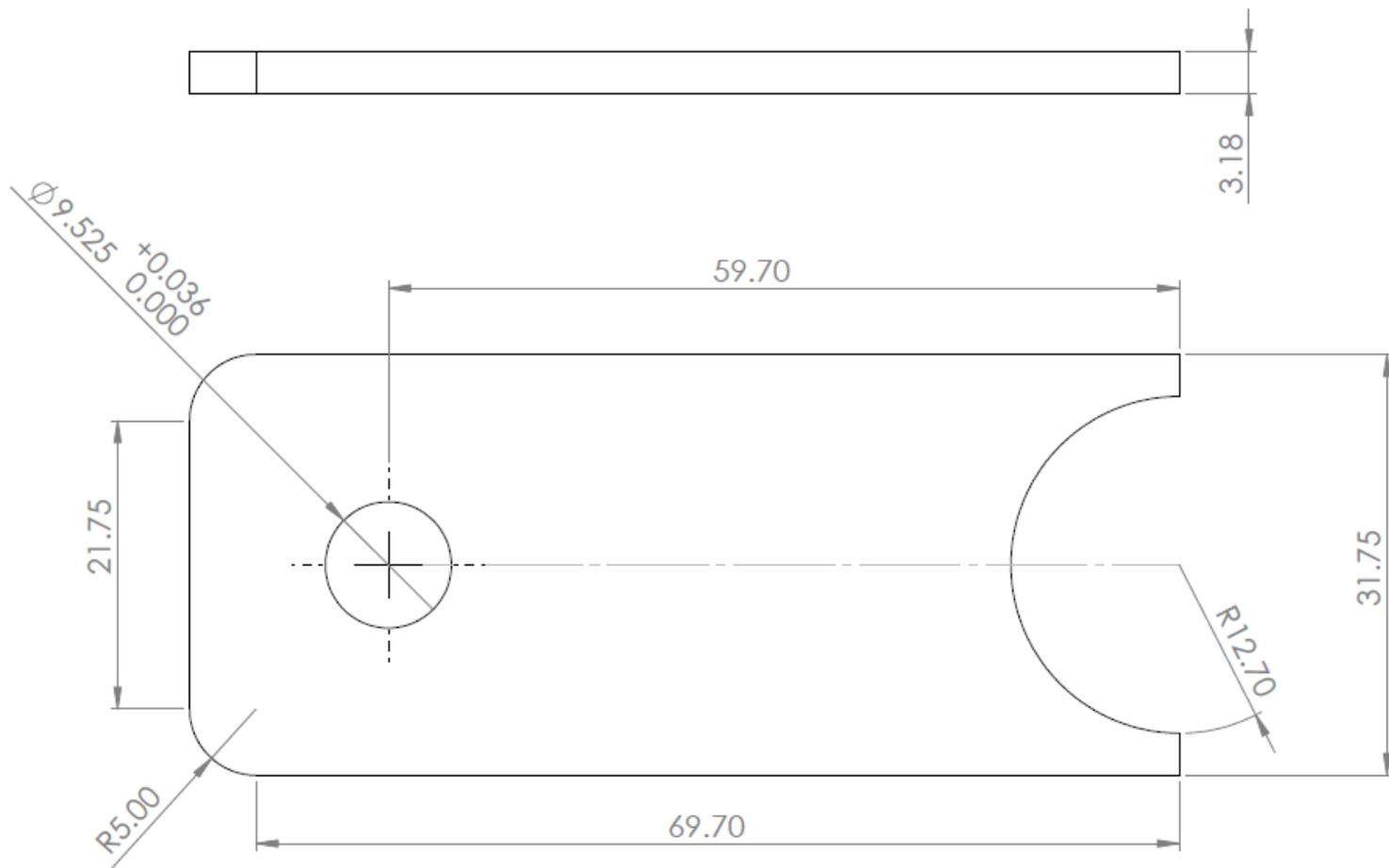


Fecha:
30/01/2025

UAM

Suspensión delantera

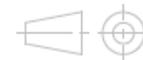
Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
 Dr. Iván González Uribe
 Dr. Francisco Beltrán Carbajal

2:1

mm



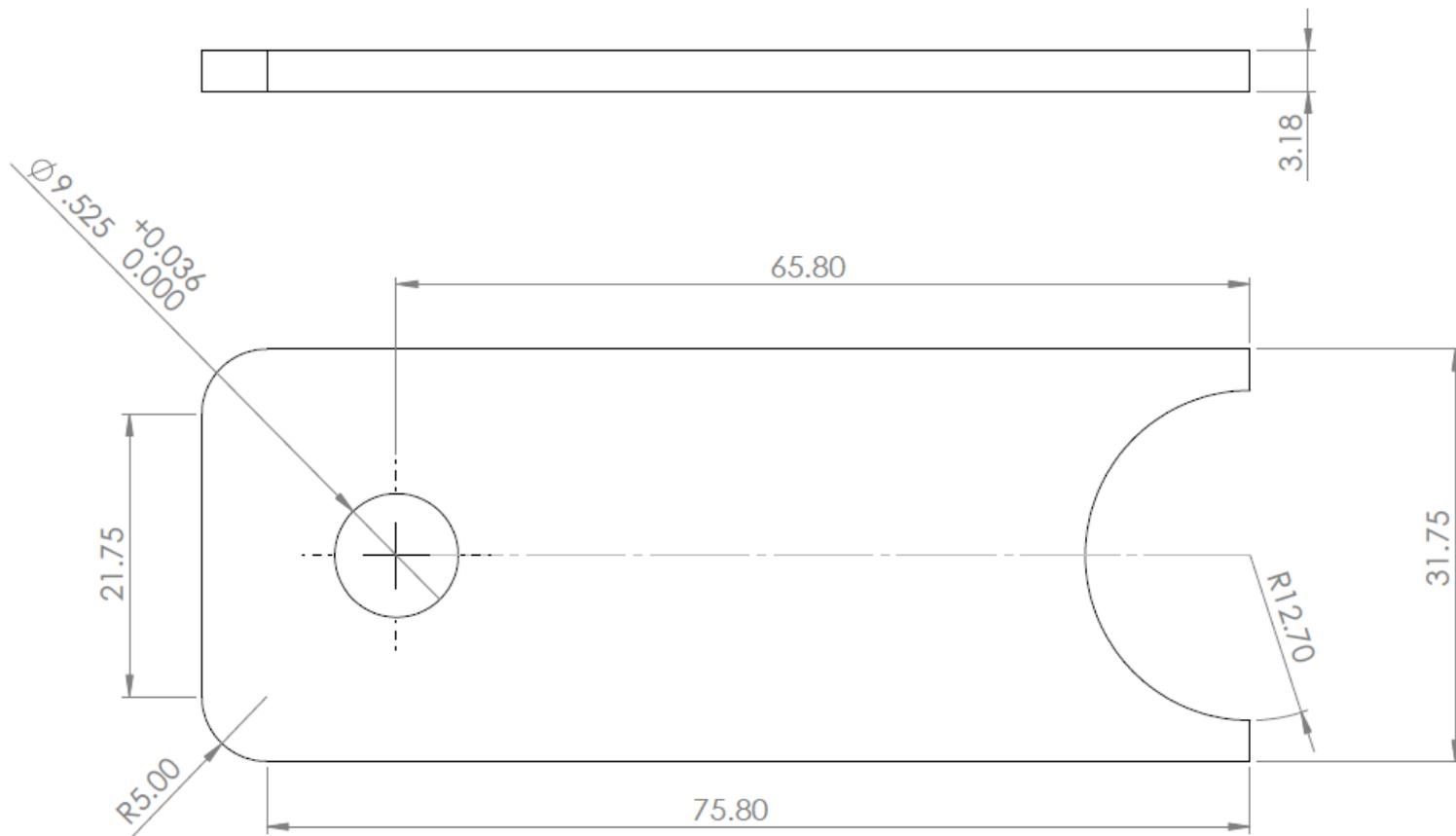
Fecha: 30/01/2025

UAM

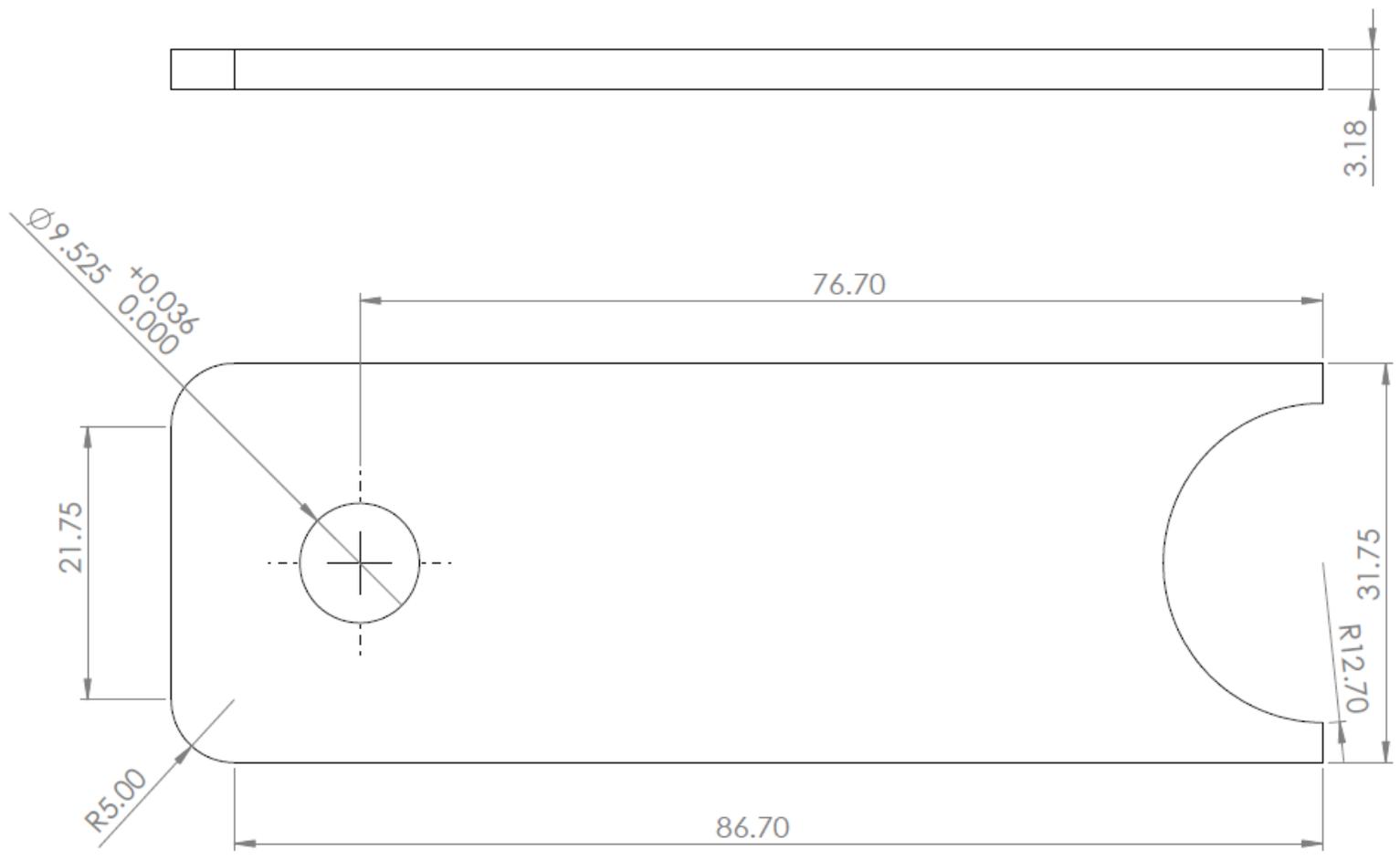
Oreja 5

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

12/20



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	Oreja 6			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	13/20		



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
 Dr. Iván González Uribe
 Dr. Francisco Beltrán Carbajal

2:1

mm



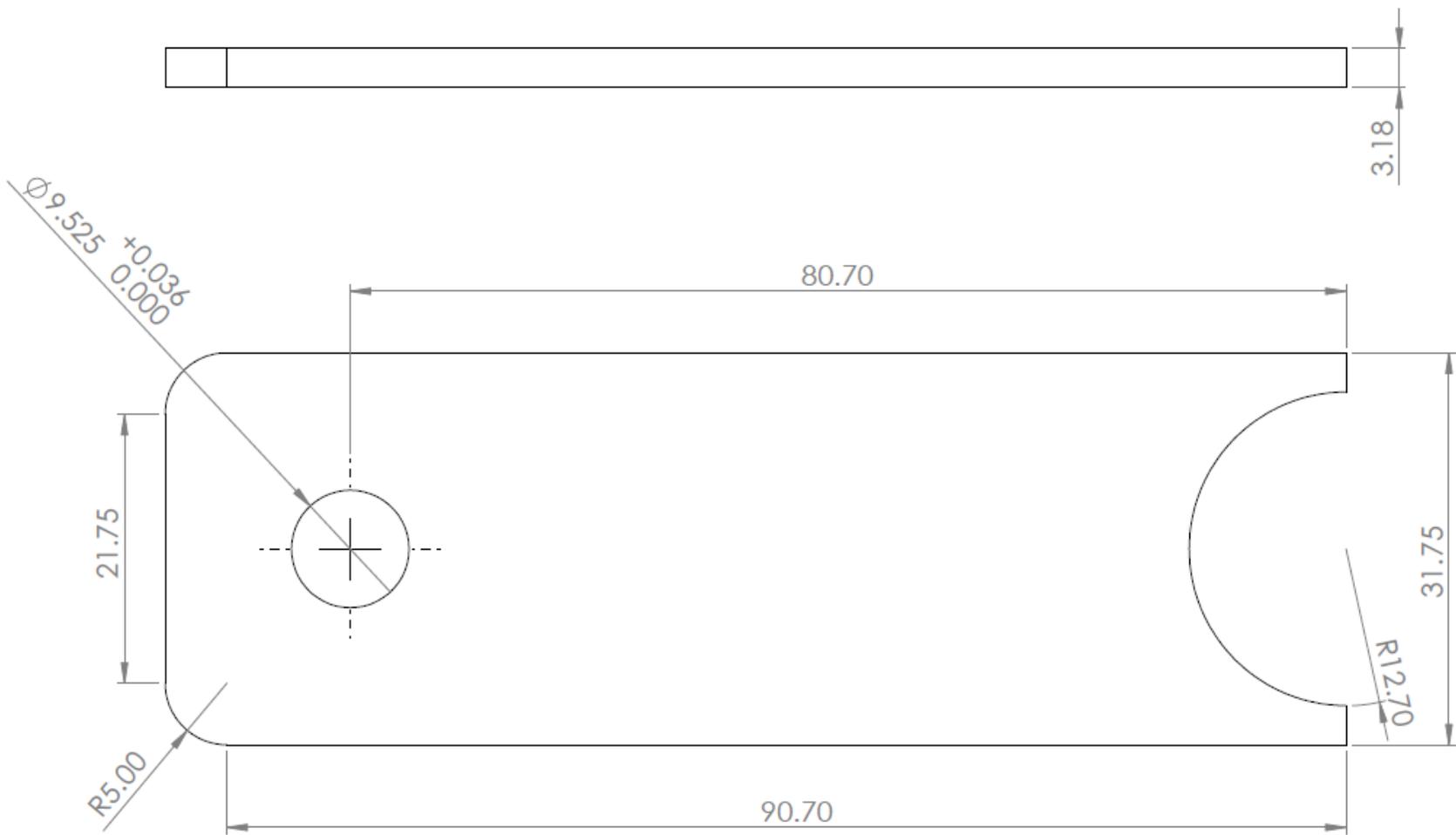
Fecha: 30/01/2025

UAM

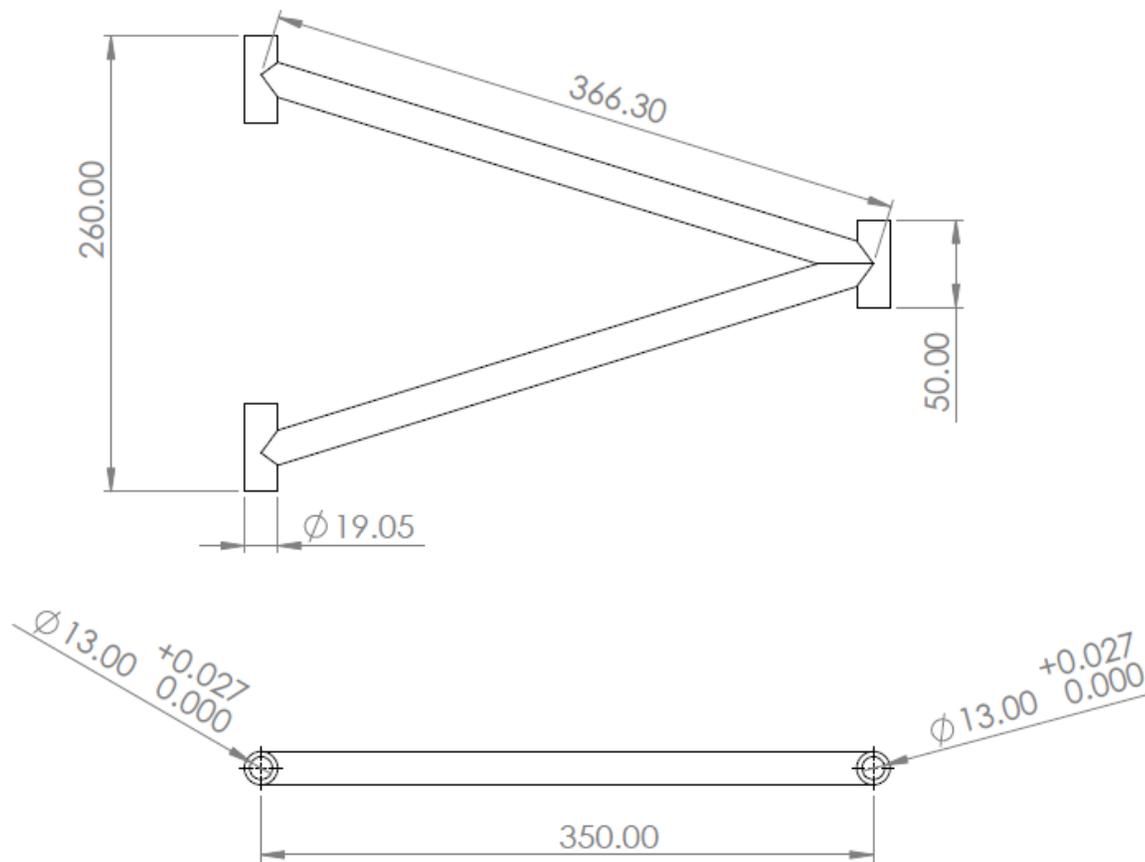
Oreja 7

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

14/20



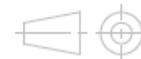
Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	2:1	mm		Fecha: 30/01/2025
<h1 style="text-align: center;">UAM</h1>	Oreja 8			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	15/20		



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
 Dr. Iván Gonzalez Uribe
 Dr. Francisco Beltrán Carbajal

1:4

mm



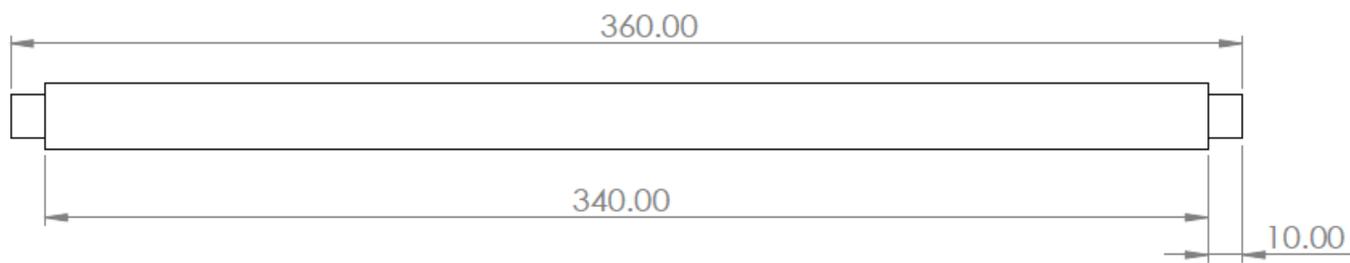
Fecha: 30/01/2025

UAM

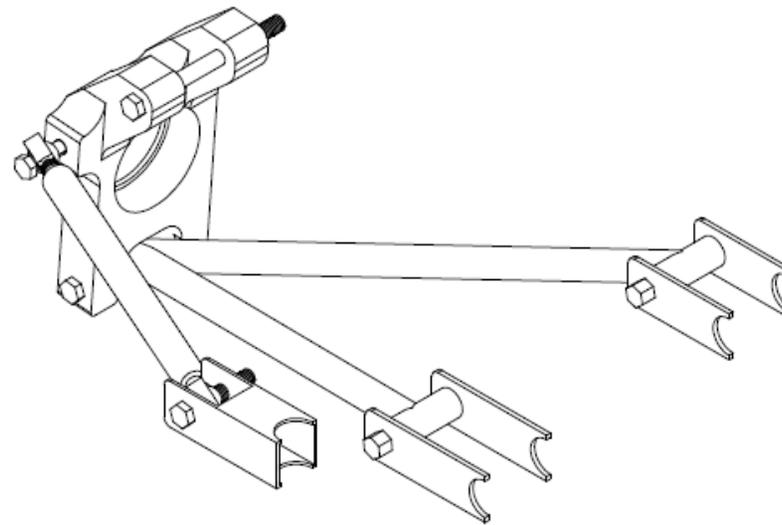
Horquilla trasera

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

16/20



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno Dr. Iván Gonzalez Uribe Dr. Francisco Beltrán Carbajal	1:2	mm		Fecha: 30/01/2025
UAM	Brazo Oscilante			
	Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro	17/20		



Asesores: Ing. Romy Pérez Moreno
Dr. Iván Gonzalez Uribe
Dr. Francisco Beltrán Carbajal

1:4

mm



Fecha:
30/01/2025

UAM

Suspensión trasera

Alumnado: Lopez Azamar Jose Alejandro

7 Resultados

7.1.1 Función de transferencia

La Ecuación 18, es la obtenida para modelar el sistema de suspensión.

$$X_2(s) = X_0(s) \left(\frac{k_1 b_1 s + k_1 k_2}{(m_1 m_2) s^4 + (m_1 + m_2) s^3 + (k_1 m_2 + k_2 m_1) s + k_1 k_2} \right) \quad 18$$

7.2 Modelo dinámico del sistema

En la gráfica de la Figura 7.1, se muestra la respuesta del sistema de suspensión modelado con la función de transferencia obtenida

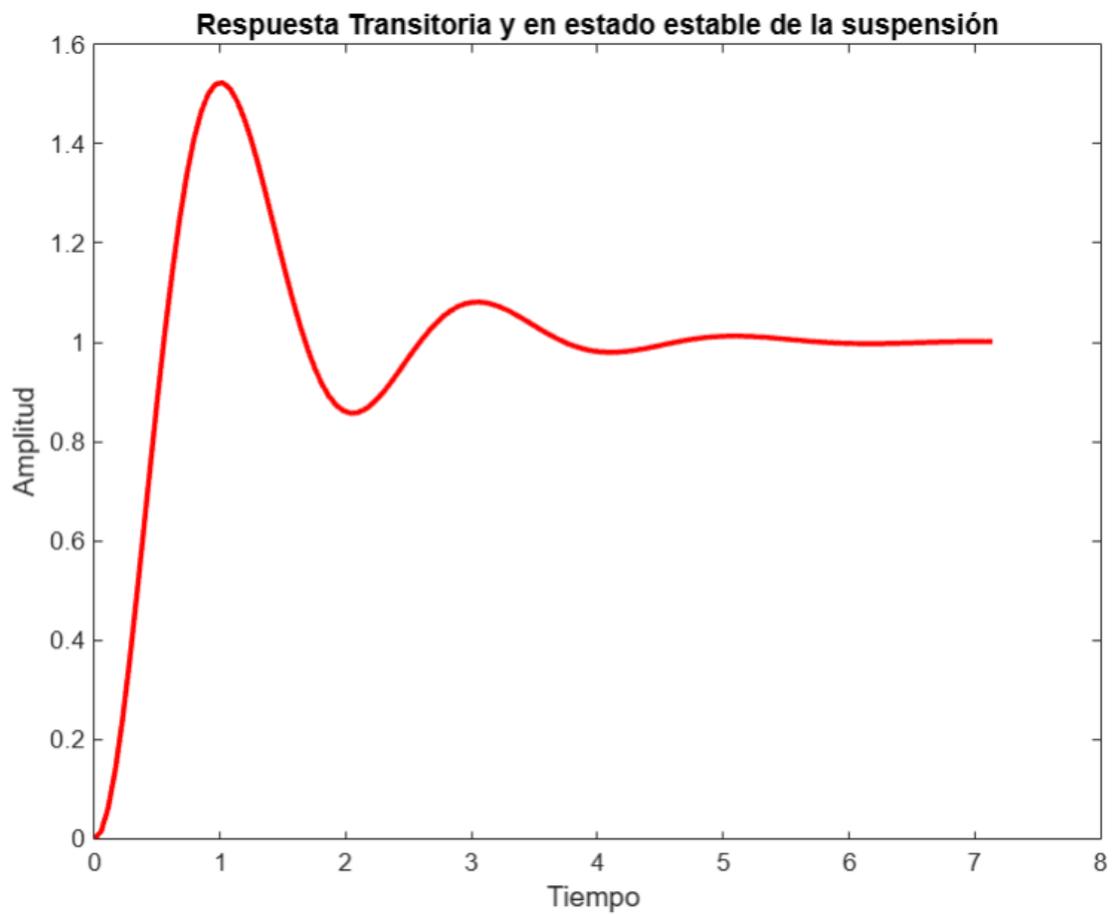


Figura 7.1 Respuesta transitoria y estable del sistema.

7.3 Diseño de los elementos

7.3.1 Simulaciones de la suspensión delantera

En las Figuras 7.2 y 7.3, se muestran los resultados de las simulaciones.

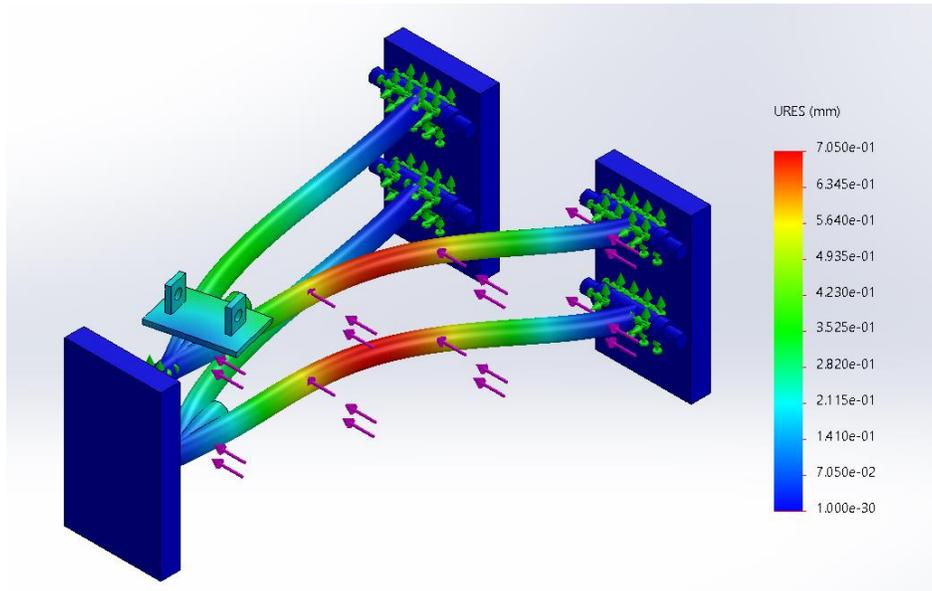


Figura 7.2 Simulación de impacto.

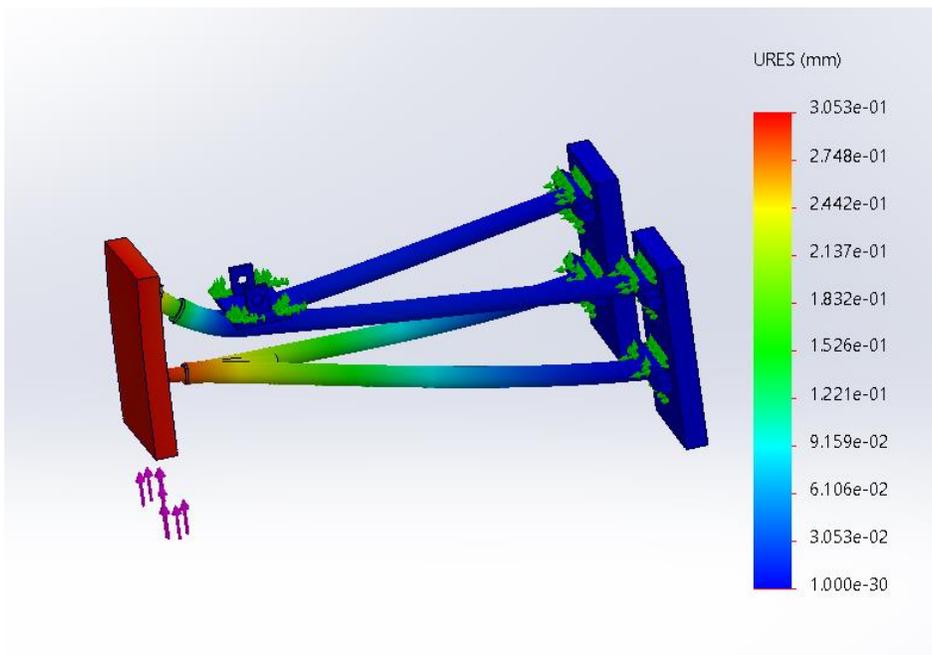


Figura 7.3 Simulación de caída sobre una sola llanta.

7.3.2 Materiales y dimensiones de la suspensión delantera

Los materiales seleccionados para los elementos de suspensión delantera muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Materiales y sus dimensiones, para la fabricación de las piezas de la suspensión delantera.

Elementos	Parte del elemento	Presentación	Material	Dimensiones comerciales
Horquillas delanteras	El resto de piezas	Tubos	Acero 1020	a=0.75 in, b= 13 mm
	Soporte de la rótula	Barra sólida para machuelo	Acero 1045	c = 0.75 in
Bujes	Toda la pieza	Barra sólida	Nylamid	c = 5/8 in
Orejas	Toda la pieza	Solera	Acero	f = 0.125 in
Soportes de amortiguador	Toda la pieza	PTR	Acero	d = 2 mm, e = 1.5 in

Los valores de las dimensiones a, b, c, d, e y f que se obtuvieron, para las piezas de cada elemento del sistema de suspensión delantero, se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Dimensiones de las piezas de los elementos del sistema de suspensión

Elementos	Parte del elemento	Dimensiones de diseño con el resultado de las simulaciones
Horquillas delanteras	El resto de piezas	a=0.75 in, b= 13 mm
	Soporte de la rótula	a=0.75 in, b= 12.7 mm
Bujes	Toda la pieza	a= 13 mm b= 3/8 in
Orejas	Toda la pieza	f = 0.125 in
Soportes de amortiguador	Toda la pieza	d = 2 mm, e = 1.5 in

7.3.3 CAD de la suspensión delantera

El CAD resultante del diseño del sistema de suspensión delantera, se observa en las Figuras 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7.

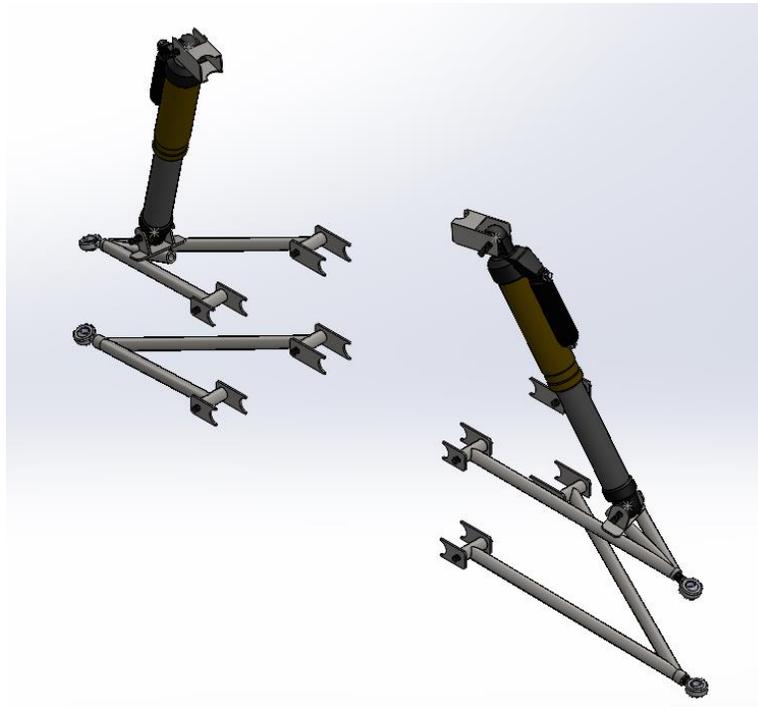


Figura 7.4 Vista isométrica del CAD de la suspensión delantera.



Figura 7.5 Vista frontal del CAD de la suspensión delantera.



Figura 7.6 Vista superior del CAD de la suspensión delantera.

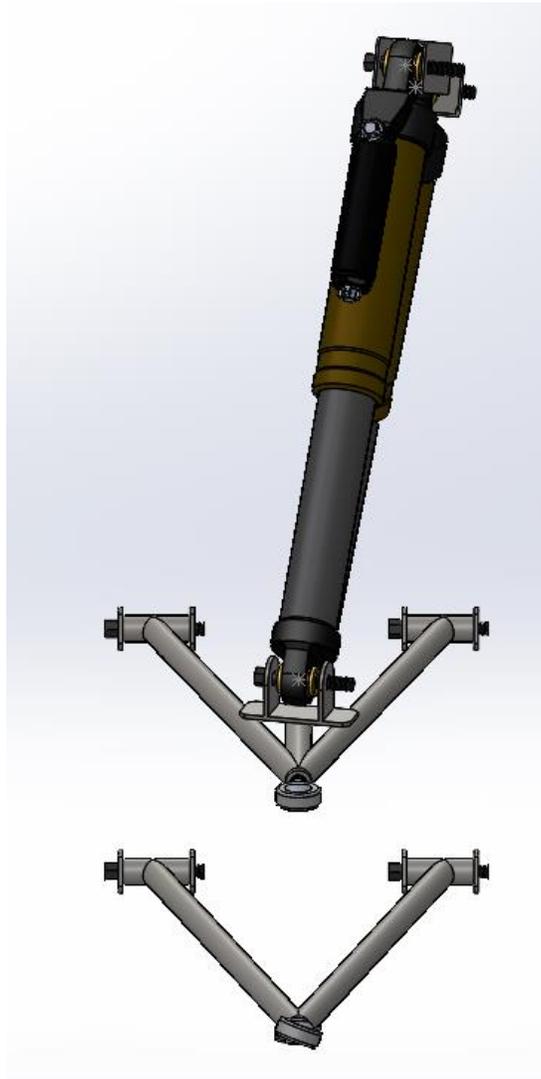


Figura 7.7 Vista lateral del CAD de la suspensión delantera.

7.3.4 Simulaciones de la suspensión trasera

La simulación de caída sobre una sola llanta se muestra en la Figura 7.8

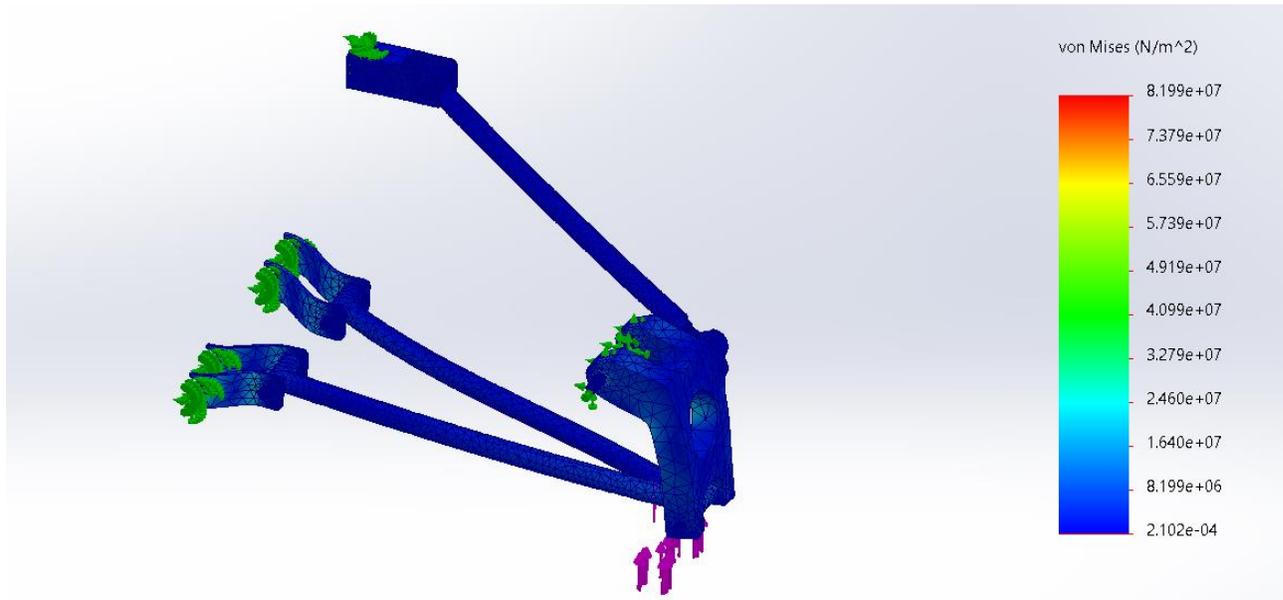


Figura 7.8 Resultados de la simulación de caída sobre una sola llanta.

Los resultados de la simulación de impacto se muestran en la Figura 7.9

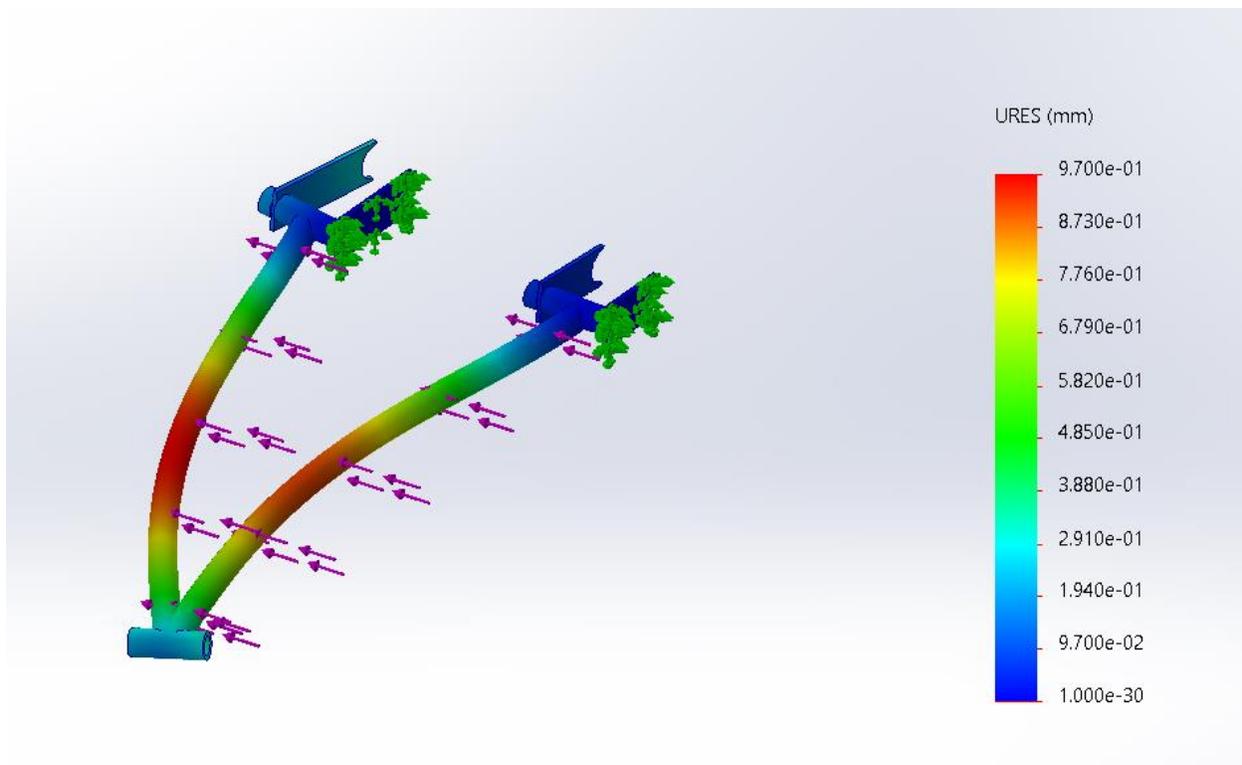


Figura 7.9 Simulación de impacto sobre la horquilla trasera.

7.3.5 Simulaciones de soporte de amortiguador trasero

En las Figuras de la sección, se muestran los cuatro resultados de las simulaciones según cada opción.

Sin refuerzo (Figura 7.10)

Un refuerzo superior (Figura 7.11)

Un refuerzo superior e inferior (Figura 7.12)

Refuerzos superiores, inferior y en ambos laterales (Figura 7.13)

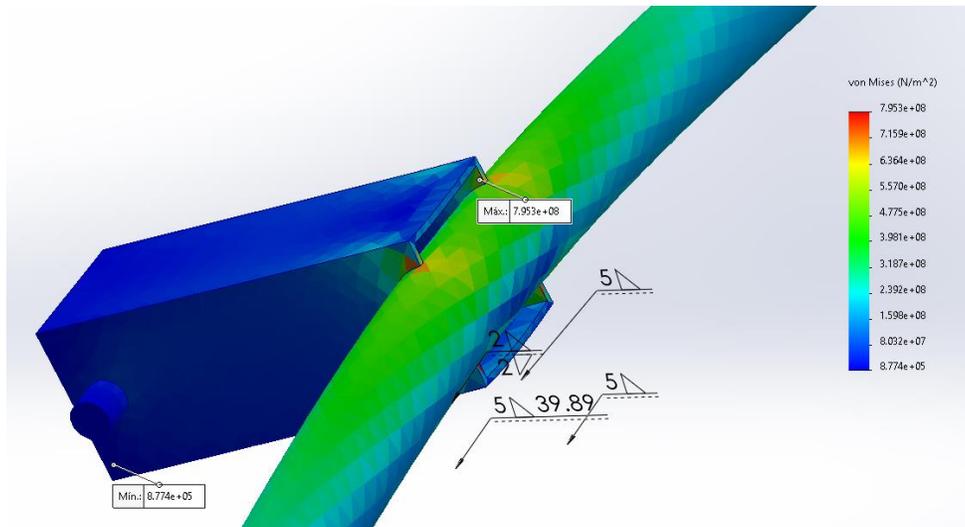


Figura 7.10 Resultado de la simulación sin refuerzo.

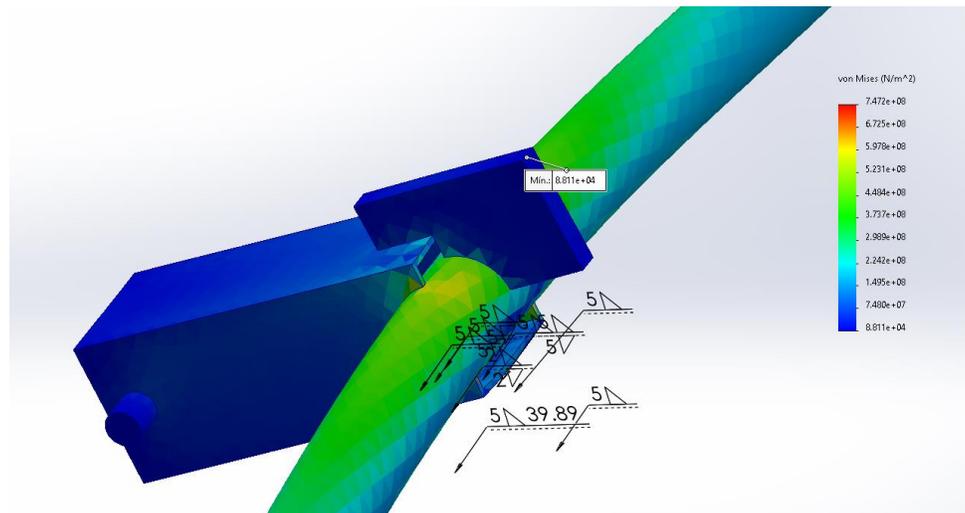


Figura 7.11 Resultado de la simulación con refuerzo superior.

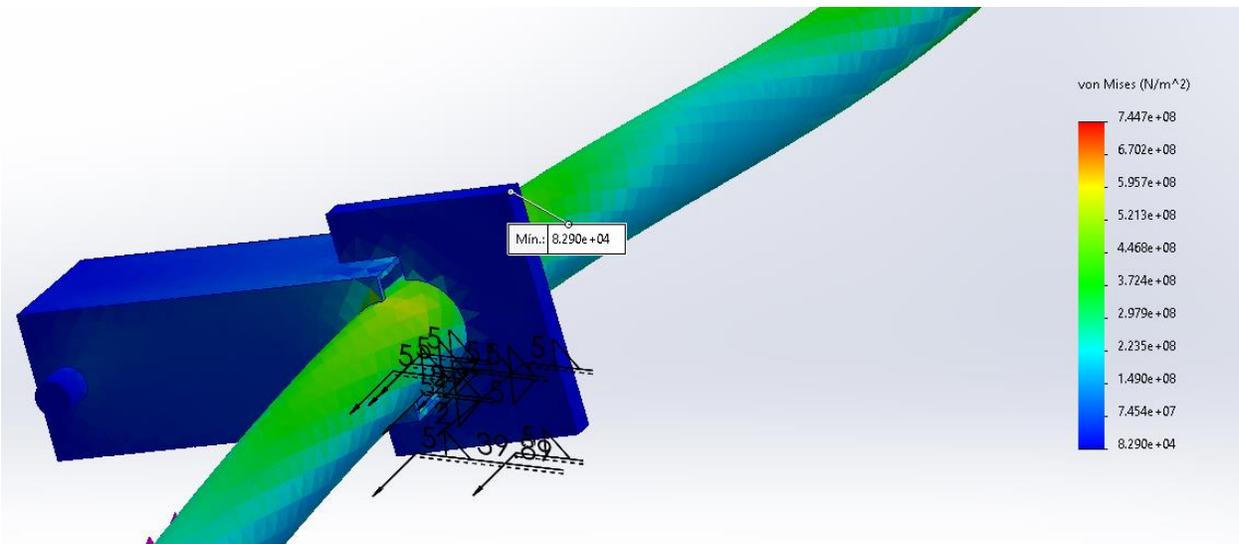


Figura 7.12 Resultado de la simulación con refuerzo superior e inferior.

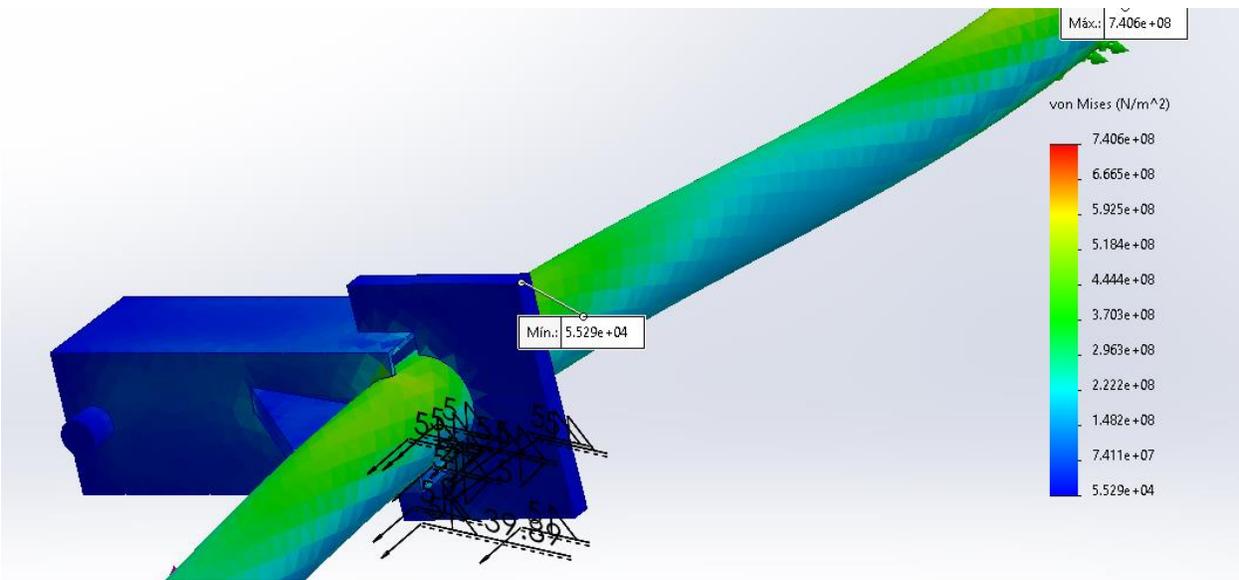


Figura 7.13 Resultado de la simulación con refuerzo superior, inferior y laterales.

Con base en los resultados de las simulaciones, se eligió el refuerzo superior e inferior (Figura), esto es debido a que son los que más disminuyen los esfuerzos en el soporte y en el miembro estructural de la jaula.

7.3.6 Materiales y dimensiones de la suspensión trasera

Los materiales seleccionados para los elementos de suspensión trasera con base en las simulaciones se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 7.3 Materiales y sus dimensiones, para la fabricación de las piezas de la suspensión trasera.

Elementos	Parte del elemento	Presentación	Material	Dimensiones comerciales
Horquillas traseras	El resto de piezas	Tubos	Acero 1020	a=0.75 in, b= 13 mm
Brazo oscilante	Pieza más larga	Tubos	Acero 1020	a=0.75 in, b= 13 mm
	Soportes de rótulas	Barra sólida	Acero 1045	c= 3/4 in
Bujes	Toda la pieza	Barra sólida	Nylamid	c = 5/8 in
Orejas	Toda la pieza	Solera	Acero	f = 0.125 in
Soportes de amortiguador	Toda la pieza	PTR	Acero	d = 2 mm, e = 1.5 in
Soportes de amortiguador	Toda la pieza	PTR	Acero	d = 2 mm, e = 1.25 in

Los valores de las dimensiones a, b, c, d, e y f que se obtuvieron con base en las simulaciones realizadas para las piezas de cada elemento del sistema de suspensión delantero, se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.4 Dimensiones de las piezas de los elementos del sistema de suspensión

Elementos	Parte del elemento	Dimensiones de diseño con el resultado de las simulaciones
Horquillas traseras	El resto de piezas	a=0.75 in, b= 13 mm
Bujes	Toda la pieza	a= 13 mm b= 3/8 in
Orejas	Toda la pieza	f = 0.125 in
Soportes de amortiguador	Toda la pieza	d = 2 mm, e = 1.5 in
Brazo oscilante	Pieza más larga	a=0.75 in, b= 13 mm
	Soportes de rótulas	a = 5/8 in b = 11/32 in
Soportes de barra estabilizadora	Toda la pieza	d = 2 mm, e = 1.25 in

7.3.7 CAD de la suspensión trasera

En las figuras de la sección, se muestran las vistas del sistema de suspensión trasero.

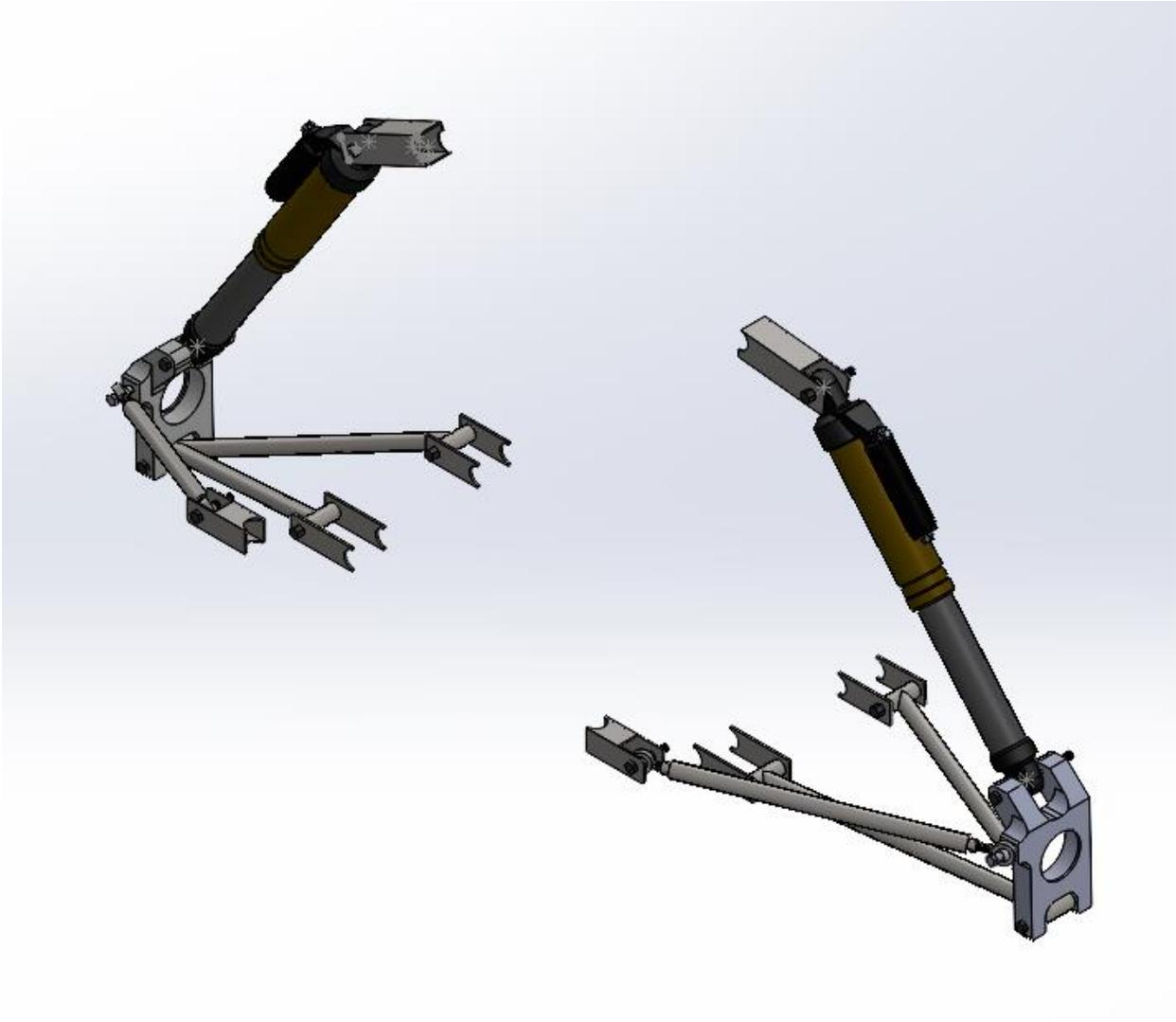


Figura 7.14 Vista isométrica del CAD de la suspensión trasera.

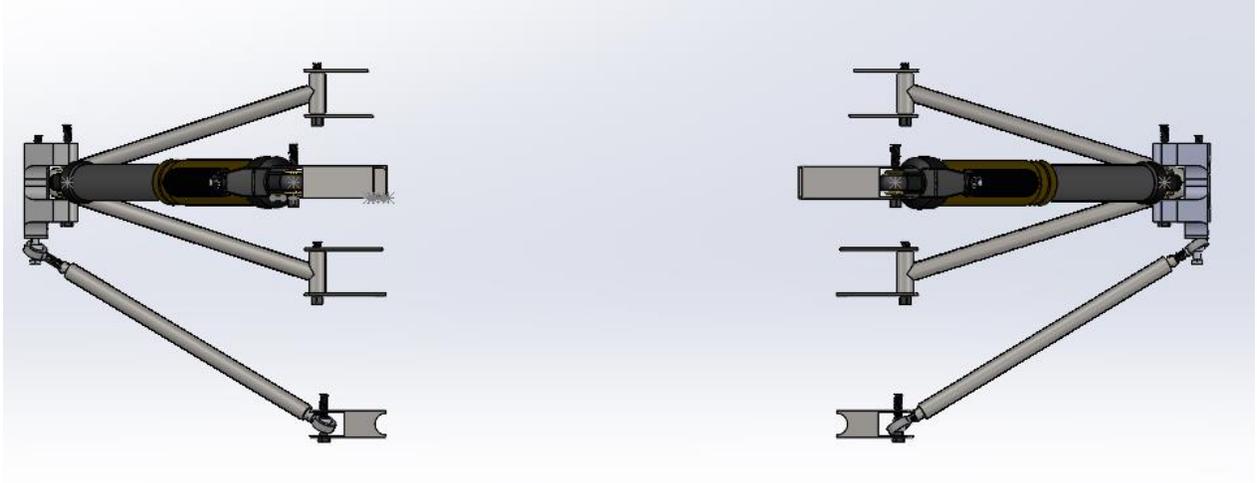


Figura 7.15 Vista superior del CAD de la suspensión trasera.



Figura 7.16 Vista lateral derecha del CAD de la suspensión trasera.

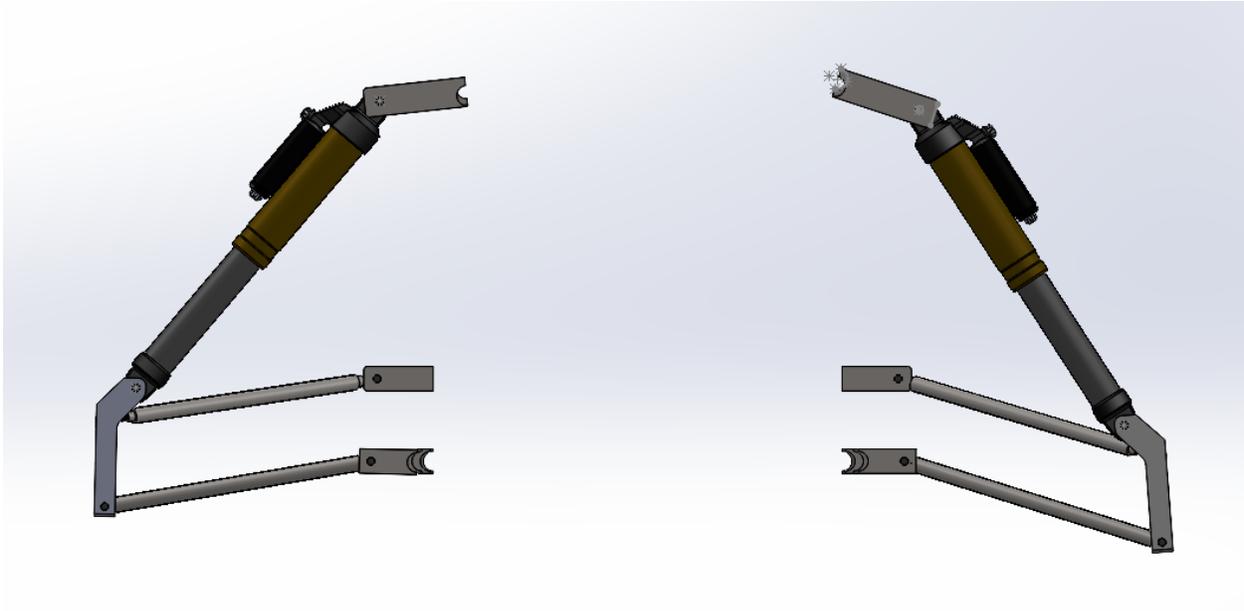


Figura 7.17 Vista frontal del CAD de la suspensión trasera.

7.4 Manufactura y selección de materiales

7.4.1 Tolerancias dimensionales

Horquilla con Buje-juego mediano

Ajuste H8/e8

Tolerancia para agujero:

$$13 \begin{matrix} 0.027 \\ 0.000 \end{matrix}$$

Tolerancia para el árbol:

$$13 \begin{matrix} -0.032 \\ -0.059 \end{matrix}$$

Juego máximo = 0.0860 mm

Juego mínimo = 0.0320 mm

Tolerancia funcional = 0.0540 mm

Oreja con Horquilla-juego amplio

Ajuste H9/C9

Tolerancia para agujero

$$50 \begin{matrix} 0.062 \\ 0.000 \end{matrix}$$

Tolerancia para el árbol

$$50_{-0.112}^{-0.050}$$

Juego máximo = 0.1740 mm

Juego mínimo = 0.0500 mm

Tolerancia funcional = 0.1240 mm

Oreja con Tornillo-juego amplio

Ajuste H9/e9

Tolerancia para agujero

$$9.525_{0.000}^{0.036}$$

Tolerancia para el árbol

$$9.525_{-0.061}^{-0.025}$$

Juego máximo = 0.6460 mm

Juego mínimo = 0.0250 mm

Tolerancia funcional = 0.6210 mm

Tornillo con Buje-juego mediano

Ajuste H8/e8

Tolerancia para agujero

$$9.525_{0.000}^{+0.022}$$

Tolerancia para el árbol

$$9.525_{-0.047}^{-0.025}$$

Juego máximo = 0.069 mm

Juego mínimo = 0.025 mm

Tolerancia funcional = 0.044 mm

7.4.2 Resultados del peso de los principales elementos de la suspensión

En la Tabla 7.3 se muestran los pesos de los elementos simulados y reales.

Tabla 7.5 Pesos de los elementos del sistema de suspensión

Pieza	Peso real (kg)	Peso en simulacion(kg)
Horquilla superior	1.30	1.18
Horquilla inferior	1.20	1.10
Horquilla trasera	1.15	1.05
Brazo oscilante	0.45	0.40

7.4.3 Resultados de la longitud de los elementos de la suspensión

En la Tabla 7.4, se muestran las longitudes reales y simuladas de los elementos de la suspensión.

Pieza	Longitud real(mm)	Longitud en simulación (mm)
Horquilla superior	359	360
Horquilla inferior	369	368
Horquilla trasera	370	369
Brazo oscilante	375	360
Soporte del amortiguador delantero	105	100
Soporte del amortiguador trasero	55	55

Longitudes de los elementos de la suspensión

7.4.4 Elementos de la suspensión delantera

Los elementos de la suspensión manufacturados se muestran en las Figuras de la sección.



Figura 7.18 Horquilla delantera derecha.



Figura 7.19 Horquilla delantera izquierda.



Figura 7.20 Orejas de la suspensión delantera.



Figura 7.21 Soporte del amortiguador delantero.



Figura 7.22 Rótulas seleccionadas para la suspensión delantera 1/2-20 NF.

7.4.5 Elementos de la suspensión trasera

Los elementos de la suspensión trasera se muestran en las figuras de la sección.



Figura 7.23 Horquilla trasera.



Figura 7.24 Brazo oscilante.



Figura 7.25 Orejas traseras.



Figura 7.26 Soporte de amortiguador trasero.



Figura 7.27 Rótulas seleccionadas de la suspensión trasera 3/8-24 NF.

7.5 Implementación del sistema en el vehículo

7.5.1 Ensamble de la suspensión delantera

El sistema de suspensión delantero ensamblado con la jaula y los portabaleros, se muestra en las Figuras 7.28 y 7.29. El sistema completo, se observa en la Figura 7.30.

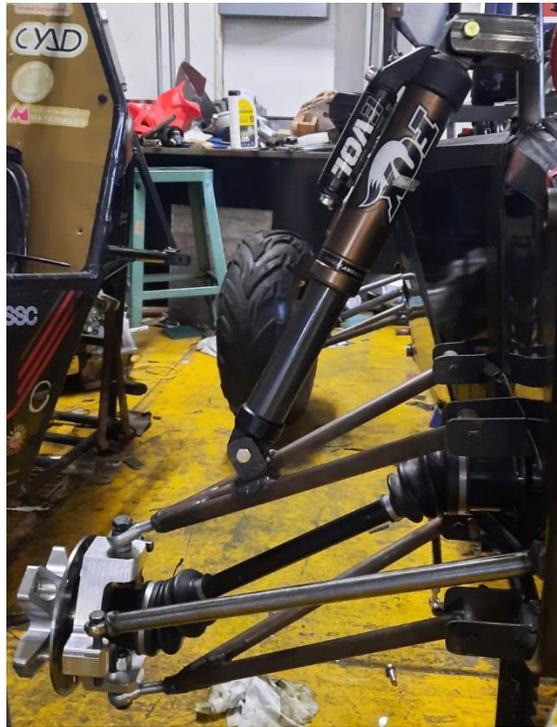


Figura 7.28 Sistema de suspensión delantero en el lado izquierdo del vehículo.



Figura 7.29 Sistema de suspensión delantero en el lado derecho del vehículo.



Figura 7.30 Sistema de suspensión delantero desde una vista frontal al vehículo.

7.5.2 Ensamble de la suspensión trasera

El sistema de suspensión trasera ensamblado con la jaula y los portabaleros, se muestra en las Figuras 7.31 y 7.32.



Figura 7.31 Sistema de suspensión delantero en el lado izquierdo del vehículo.



Figura 7.32 Sistema de suspensión delantero en el lado derecho del vehículo.

7.5.3 Resultados de la altura de la suspensión, *track* con el ensamble real y la simulación.

La altura obtenida del sistema de suspensión del vehículo en las simulaciones fue de 313 mm. La altura de la suspensión real del vehículo es de 305 mm.

El *track* simulado, fue de 1580 mm. En el caso del *track*, fue diferente la parte delantera, al de la parte trasera, siendo estos, 1557 mm y 1600 mm respectivamente.

El wheelbase simulado fue de 1250 mm y el real fue de 1220 m.

7.5.4 Otros resultados del ensamble

La suspensión delantera permite el giro sin interferencias de la dirección y están alineadas como se esperaba.

Las llantas traseras no se encuentran alineadas verticalmente.

Una de las llantas traseras no se encuentra paralelas a la vista lateral de la jaula (tiene un ángulo en el plano en donde giran las delanteras por la dirección).

7.6 Validación del sistema de suspensión del vehículo

7.6.1 Prueba de vehículo en movimiento

Cuando el vehículo comenzó a moverse, las llantas traseras presentaban una brusca desalineación. Esto, llevó a modificar la alineación de una de las llantas, para que, al desplazarse, el ángulo de la llanta permaneciera vertical.

7.6.2 Prueba de suspensión del vehículo

De la prueba de suspensión del vehículo se concluyó lo siguiente:

Los elementos del sistema soportaron los esfuerzos a los que se sometieron, ya que no sufrieron deformaciones visibles.

El vehículo pudo atravesar sin inconvenientes el camino con los obstáculos.

El mecanismo de suspensión realiza los desplazamientos esperados.

8 Análisis y discusión de resultados

8.1 Comparación entre dimensiones de manufactura reales y simuladas

De las Tabla 1 y 2, se observa que hay diferencia entre los elementos del sistema de suspensión simulados y los manufacturados. En el caso de los pesos de las piezas, se puede deber a factores como no haber tomado en cuenta la soldadura del material. En el caso de la variación en la longitud, esta es menor, y puede ser debido a que los apoyos en los moldes no estaban bien fijos, a la precisión en el maquinado e incluso a la dilatación del material por la soldadura. Sobre los errores por la precisión en los maquinados, estos son por falta de experiencia en el uso de las máquinas y herramientas, así como, que los quipos no están bien calibrados.

8.2 Comparación en dimensiones del vehículo

La altura de la suspensión obtenida es distinta a la simulada, esto por la dificultad por la dificultad de medir el lugar correcto para soldar los soportes de los amortiguadores. Igualmente, realizar las mediciones despreciando el peso del piloto afecta la altura real de la suspensión.

Para el caso del *track* y *wheelbase*, si bien son cercanos a los establecido por dirección, las variaciones que tuvieron, son debidas a las variaciones en los elementos manufacturados o desperfectos de soportes en sus lugares de soldadura.

8.3 Análisis de las pruebas del vehículo

Los elementos del sistema de suspensión soportaron los esfuerzos a los que fueron sometidos en las pruebas, por lo cual, el resultado de las simulaciones estáticas concuerda con lo ocurrido en la realidad, ya que, no se presentaron deformaciones visibles en los elementos del sistema de suspensión.

El movimiento que presentaron el mecanismo de suspensión trasero y el mecanismo de suspensión delantero del vehículo, concordó con lo establecido en el diseño, ya que no se presentaron interferencias que los volvieran rígidos o que limitara su desplazamiento con respecto a lo diseñado.

9 Conclusiones

Se logró construir el sistema de suspensión del vehículo BAJA SAE UAM 2024. El reducir el diámetro o espesor de los elementos del sistema, sí contribuyó a una reducción de peso, además. La suspensión del vehículo soportó los esfuerzos a los que fue sometida en la prueba que se realizaron (tal como se observó en las simulaciones), por lo cual, puede llegar a ser viable reducir aún más el diámetro de las piezas. Los puntos de apoyo de los amortiguadores en la jaula lograron reducir peso con respecto al vehículo 2023, ya que, en él, fue necesaria la construcción de miembros estructurales adicionales a la jaula para los amortiguadores. Por lo anterior, el punto de apoyo de los amortiguadores al FBM adelante y al FAB atrás, es recomendable mantenerlo para futuros vehículos. El sistema de suspensión de doble horquilla en la parte delantera funcionó bien, manteniendo pocas variaciones en el ángulo de la llanta, y permitiendo una fácil alineación de estas. En el caso de la suspensión trasera, si bien, su diseño fue satisfactorio, los desplazamientos angulares de la llanta fueron mayores, e incluso cambiaba significativamente su ángulo al subirse el piloto. Lo anterior, pudo deberse a qué el brazo oscilante no mantiene sujetado al portabaleros en dos puntos, si no, en uno solo, otro motivo que pudo causarlo es el punto de apoyo del amortiguador en ese sistema, siendo el portabaleros, lo que causa mayores desplazamientos angulares de la llanta. Con lo ya mencionado, es recomendable que en futuros vehículos se analice la viabilidad con las contras de peso y costo del sistema de introducir un sistema de doble horquilla en la parte trasera del vehículo.

10 Referencias Bibliográficas

- [1] Society of Automotive Engineers, 2023, "BAJA SAE Mexico Competition," [Online]. Available: <https://www.saemx.org/bajasaemexico>. [Accessed: Jul. 27, 2024].
- [2] SADECO, 2024, "Camber o ángulo de caída del neumático," [Online]. Available: <https://www.gruposadeco.com/blog/camber-o-angulo-de-caida-del-neumatico/>. [Accessed: Jul. 27, 2024].
- [3] Bautista Popoca, A., Carrillo Espejel, J. N., and Flores Galindo, E., 2023, "Diseño y construcción de un sistema de suspensión y dirección para un vehículo BAJA SAE UAM 2023," Proyecto de integración, Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 20-150.
- [4] Díaz Ruiz, S. A., 2022, "Prevención de fallas mecánicas para un vehículo BAJA SAE México 2022," Artículo, Universidad Iberoamericana Puebla, pp. 2-5.
- [5] Sánchez Guzmán, A., and Contreras Nava, 2014, "Análisis dinámico de la suspensión de un vehículo de tipo fórmula SAE," Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 8-36.

- [6] CCNNSST, 2008, "Equipo de protección personal-selección, uso y manejo en los centros de trabajos," NOM-017-STPS-2008.
- [7] CCNNSST, 1993, "Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los edificios, locales, instalaciones y áreas de los centros de trabajo," NOM-001-STPS-1993.
- [8] CCNNTT, 2017, "Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal," NOM-012-SCT-2-2017.
- [9] MAPFRE, "Suspensiones para el coche," *Motor MAPFRE*, [Online]. Available: <https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-mantenimiento/suspensiones-para-el-coche/>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [10] Studocu, "Consulta de los tipos de suspensiones," Instituto Superior Tecnológico Luis Rogerio González, [Online]. Available: <https://www.studocu.com/ec/document/instituto-superior-tecnologico-luis-rogerio-gonzalez/medicina/consuta-de-las-tipos-de-suspensiones/45907766>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [11] Autocosmos, "¿Qué es la suspensión McPherson?," *Autocosmos Noticias*, May 21, 2009. [Online]. Available: <https://noticias.autocosmos.com.mx/2009/5/21/que-es-la-suspension-mcpherson>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [12] AS USA, "Suspensión Multilink o Multibrazo: ¿Cómo funciona y qué ventajas tiene?," *AS Autos*, [Online]. Available: <https://us.as.com/autos/curiosidades/suspension-multilink-o-multibrazo-como-funciona-y-que-ventajas-tiene/>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [13] Mazda Vardi, "Amortiguadores para carros," *Mazda Vardi Noticias*, [Online]. Available: <https://www.mazdavardi.com.co/noticias/amortiguadores-para-carros/>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [14] FRAMMEX, "Tipos de amortiguadores," *FRAMMEX*, [Online]. Available: <https://frammex.mx/tipos-de-amortiguadores>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [15] Mitsubishi Motors, "Tipos de amortiguadores para vehículo," *Mitsubishi Motors Perú*, [Online]. Available: <https://www.mitsubishi-motors.com.pe/blog/tipos-amortiguadores-vehiculo/#1-Amortiguadores-de-doble-tubo>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [16] Trust for the Americas, "Aula Virtual - Tipos de Amortiguadores," *Trust for the Americas*, [Online]. Available: <https://aulavirtual.trustfortheamericas.org/mod/page/view.php?id=40418>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [17] Patricio Ruiz, "Tabla de tipos de roscas," *Patricio Ruiz Ingeniería*, [Online]. Available: <https://www.patricioruiz.es/wp-content/uploads/Tabla-de-tipos-de-roscas.pdf>. [Accessed: Jan. 31, 2025].
- [18] Pérez, J., and Gómez, M., *Métodos de Fabricación en Ingeniería Metalmecánica*, 3rd ed., Editorial Alfa, 2022.

- [19] Dodge. "¿Cuáles son las partes de una suspensión?" Dodge México Blog. [Online]. Disponible en: <https://www.dodge.com/mx/blog/noticias/cuales-son-las-partes-de-una-suspension.html>. [Accedido: 30 de enero de 2025].
- [20] EuroTaller. "¿Qué es un brazo de suspensión del coche y cuáles son sus funciones?" EuroTaller Noticias. [Online]. Disponible en: <https://www.eurotaller.com/noticia/que-es-un-brazo-de-suspension-del-coche-y-cuales-son-sus-funciones>. [Accedido: 30 de enero de 2025].
- [21] E-Auto. "Rótulas: función, tipos y componentes." E-Auto Noticias. [Online]. Disponible en: <https://www.e-auto.com.mx/enev/index.php?view=article&id=3524-rotulas-fincion-tipos-y-componentes>. [Accedido: 31 de enero de 2025].
- [22] Sadi Transmisiones. "Tipos de mecanismos." Sadi Transmisiones. [Online]. Disponible en: <https://saditransmisiones.com/tipos-de-mecanismos/>. [Accedido: 28 de enero de 2025].
- [23] Intelligy. "Los 5 pasos a seguir para un estudio estático en simulación." Intelligy Blog, 26 de marzo de 2018. [Online]. Disponible en: <https://intelligy.com/blog/2018/03/26/los-5-pasos-a-seguir-para-un-estudio-estatico-es.simulacion/>. [Accedido: 25 de enero de 2025].
- [24] UNAM. "Documento técnico." Repositorio Universitario Digital UNAM. [Online]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000691240/3/0691240.pdf>. [Accedido: 17 de diciembre de 2024].
- [25] Control Automático Educación. "Análisis de sistemas: función de transferencia." Control Automático Educación. [Online]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/funcion-de-transferencia/>. [Accedido: 30 de enero de 2025].

11 Apéndices

Apéndice 1 brocas y machuelos UNC.

Rosca (UNC)	Diámetro del Machuelo (pulg.)	Broca Recomendada (pulg.)	Broca Recomendada (mm)
4-40 UNC	0.112	0.089	2.3
6-32 UNC	0.138	0.106	2.7
8-32 UNC	0.164	0.136	3.5
10-24 UNC	0.190	0.149	3.8
1/4-20 UNC	0.250	0.201	5.1
5/16-18 UNC	0.312	0.257	6.5
3/8-16 UNC	0.375	0.312	7.9
7/16-14 UNC	0.438	0.368	9.3
1/2-13 UNC	0.500	0.421	10.7
9/16-12 UNC	0.562	0.484	12.3
5/8-11 UNC	0.625	0.531	13.5
3/4-10 UNC	0.750	↓ 0.41	16.3

Apéndice 2 brocas y machuelos UNF.

Rosca (UNF)	Diámetro del Machuelo (pulg.)	Broca Recomendada (pulg.)	Broca Recomendada (mm)
4-48 UNF	0.112	0.093	2.4
6-40 UNF	0.138	0.107	2.7
8-36 UNF	0.164	0.140	3.5
10-32 UNF	0.190	0.159	4.0
1/4-28 UNF	0.250	0.213	5.4
5/16-24 UNF	0.312	0.272	6.9
3/8-24 UNF	0.375	0.332	8.4
7/16-20 UNF	0.438	0.390	9.9
1/2-20 UNF	0.500	0.453	11.5
9/16-18 UNF	0.562	↓ 0.15	13.0

Apéndice 3 Tolerancias dimensionales [18].

TABLA II.3
TOLERANCIAS PRINCIPALES
 Valores en micras (0.001 mm) Temperatura de referencia 20° C

Diámetros en mm	< 3	> 3 a 6	> 6 a 10	> 10 a 18	> 18 a 30	> 30 a 50	> 50 a 80	> 80 a 120	> 120 a 180	> 180 a 250	> 250 a 315	> 315 a 400
	AGUJEROS											
H 6	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0	+ 13 0	+ 16 0	+ 19 0	+ 22 0	+ 25 0	+ 29 0	+ 32 0	+ 36 0
H 7	+10 0	+ 12 0	+ 15 0	+ 18 0	+ 21 0	+ 25 0	+ 30 0	+ 35 0	+ 40 0	+ 46 0	+ 52 0	+ 57 0
H 8	+14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0	+ 46 0	+ 54 0	+ 63 0	+ 72 0	+ 81 0	+ 89 0
H 9	+25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0	+ 74 0	+ 87 0	+ 100 0	+ 115 0	+ 130 0	+ 140 0
H 11	+60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 110 0	+ 130 0	+ 160 0	+ 190 0	+ 220 0	+ 250 0	+ 290 0	+ 320 0	+ 360 0
ARBOLÉS												
g 5	- 2 - 6	- 4 - 9	- 5 - 11	- 6 - 14	- 7 - 16	- 9 - 20	- 10 - 23	- 12 - 27	- 14 - 32	- 15 - 35	- 17 - 40	- 18 - 43
h 5	0 - 4	0 - 5	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 15	0 - 18	0 - 20	0 - 23	0 - 25
i _s 5	+ 2 - 2	+2.5 -2.5	+ 3 - 3	+ 4 - 4	+4.5 -4.5	+ 5.5 - 5.5	+ 6.5 - 6.5	+ 7.5 - 7.5	+ 9 - 9	+ 10 - 10	+ 11.5 - 11.5	+ 12.5 - 12.5
k 5	+ 4 0	+ 6 + 1	+ 7 + 1	+ 9 + 1	+ 11 + 2	+ 13 + 2	+ 15 + 2	+ 18 + 3	+ 21 + 3	+ 24 + 4	+ 27 + 4	+ 29 + 4
f 6	- 6 -12	- 10 - 18	- 13 - 22	- 16 - 27	- 20 - 33	- 25 - 41	- 30 - 49	- 36 - 58	- 43 - 68	- 50 - 79	- 56 - 88	- 62 - 98
g 6	- 2 - 8	- 4 - 12	- 5 - 14	- 6 - 17	- 7 - 20	- 9 - 25	- 10 - 29	- 12 - 34	- 14 - 39	- 15 - 44	- 17 - 49	- 18 - 54
h 6	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 16	0 - 19	0 - 22	0 - 25	0 - 29	0 - 32	0 - 36
i _s 6	+ 3 - 3	+ 4 - 4	+4.5 -4.5	+ 5.5 - 5.5	+ 6.5 - 6.5	+ 8 - 8	+ 9.5 - 9.5	+ 11 - 11	+ 12.5 - 12.5	+ 14.5 - 14.5	+ 16 - 16	+ 18 - 18
m 6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11	+ 35 + 13	+ 40 + 15	+ 46 + 17	+ 52 + 20	+ 57 + 21
p 6	+12 + 6	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 29 + 18	+ 35 + 22	+ 42 + 26	+ 51 + 32	+ 59 + 37	+ 68 + 43	+ 79 + 50	+ 88 + 56	+ 98 + 62
e 7	-14 -24	- 20 - 32	- 25 - 40	- 32 - 50	- 40 - 61	- 50 - 75	- 60 - 90	- 72 - 107	- 85 - 125	- 100 - 146	- 110 - 162	- 125 - 182
f 7	- 6 -16	- 10 - 22	- 13 - 28	- 16 - 34	- 20 - 41	- 25 - 50	- 30 - 60	- 36 - 71	- 43 - 83	- 50 - 96	- 56 - 108	- 62 - 119
h 7	0 -10	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30	0 - 35	0 - 40	0 - 46	0 - 52	0 - 57
e 8	-14 -28	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106	- 72 - 126	- 85 - 148	- 100 - 172	- 110 - 191	- 125 - 214
f 8	- 6 -20	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 64	- 30 - 76	- 36 - 90	- 43 - 106	- 50 - 122	- 56 - 137	- 62 - 151
h 8	0 -14	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 46	0 - 54	0 - 63	0 - 72	0 - 81	0 - 89
d 9	-20 -45	- 30 - 60	- 40 - 76	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174	- 120 - 207	- 145 - 245	- 170 - 285	- 190 - 320	- 210 - 350
e 9	-14 -39	- 20 - 50	- 25 - 61	- 32 - 75	- 40 - 92	- 50 - 112	- 60 - 134	- 72 - 159	- 85 - 185	- 100 - 215	- 110 - 240	- 125 - 265
d 11	-20 -80	- 30 -105	- 40 - 130	- 50 - 160	- 65 - 195	- 80 - 240	- 100 - 290	- 120 - 340	- 145 - 395	- 170 - 460	- 190 - 510	- 210 - 570
h 11	0 -60	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190	0 - 220	0 - 250	0 - 290	0 - 320	0 - 360
i _s 11	+30 -30	+ 37 - 37	+ 45 - 45	+ 55 - 55	+ 65 - 65	+ 80 - 80	+ 95 - 95	+ 110 - 110	+ 125 - 125	+ 145 - 145	+ 160 - 160	+ 180 - 180

Apéndice 4. Juegos y aprietes [18].

AJUSTES PRINCIPALES UTILIZAR DE PREFERENCIA LOS DE LOS CIRCULOS			Arboles (Posi- ción)	AGUJEROS Y CALIDAD DE LOS ARBOLES				
				H 6	H 7	H 8	H 9	H 11
AJUSTES CON JUEGO	JUEGO AMPLIO	Ensamblajes cuyo funcionamiento requiere juego amplio por dilataciones, mal alineamiento, cojinetes grandes, etc.	c				9	11
			d				9	11
	JUEGO MEDIANO	Piezas que giran o deslizan con una buena lubricación.	e		7	8	9	
			f	6	6 7	7		
JUEGO PEQUEÑO	Piezas con guía precisa y movimientos de pequeña amplitud.	g	5	6				
AJUSTE EXACTO		h	5	6	7	8		
AJUSTES CON APRIETE	APRIETE DEBIL	El ensamble se puede hacer a mano, la unión no puede transmitir esfuerzos. Se puede montar y desmontar.	Ensamble a mano	js	5	6		
				k	5			
	APRIETE MEDIANO		Ensamble a mano auxiliándose de un mazo	m		6		
				p		6		
	APRIETE FUERTE	Imposible desmontar sin deterioro. La unión puede transmitir esfuerzos.	Ensamble a prensa	s			7	
			Ensamble a prensa o por dilatación (verificar los esfuerzos internos).	u			7	
x						7		
			z			7		

12 Entregables comprometidos en la propuesta

Para consulta de los libros, páginas de internet, archivos de planos y simulaciones, ponerse en contacto con asesores y co-asesores de este proyecto.

Ing. Pérez Moreno Romy

romy@azc.uam.mx

Dr. Beltrán Carbajal Francisco

fbeltran@azc.uam.mx

Dr. González Uribe Iván

igu@azc.uam.mx