

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Culiacán



TITULACIÓN INTEGRAL

Análisis y Diseño de un Vehículo Eléctrico de Tres ruedas con
Configuración 1-2 en CAD

ALUMNO(A):

Ricardo Ibañez Soto
Francisco Gabriel Gastelum Rios

CARRERA:

Ingeniería Mecatrónica

No. DE CONTROL:

19170407

19170395

Culiacán, Sinaloa



Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa 26/05/2026 8:23

C. RICARDO IBAÑEZ SOTO Y FRANCISCO GABRIEL GASTELUM RIOS
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
P R E S E N T E.

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

Presidente: Doctor en Ciencias de la Ingeniería
Omar Jhovany Payan Serrano
Secretario: Doctor en Ingeniería de Materiales
Ismael Díaz Peña
Vocal: Ingeniero Electrónico
José Ángel Alcaraz Vega

Cédula Profesional

11461565

9798300

3365548

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional titulado: **"ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN VEHICULO ELECTRICO DE TRES RUEDAS CON CONFIGURACIÓN 1-2 EN CAD"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®

CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Educación TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DEPARTAMENTO DE
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2026
año de
Margarita Maza



AGRADECIMIENTO

Agradecimiento Francisco Gastelum

Me gustaría agradecer al tecnológico de Culiacán a todos sus docentes y trabajadores que hicieron posible mi crecimiento personal en la institución y por haberme apoyado a lo largo de estos 5 años y medio para la culminación de mis estudios ya que sin su arduo trabajo yo no estaría aquí el día de hoy.

Agradezco de todo corazón a mi asesor Omar Jhovany Payán Serrano, el cual me impartió clases en mecánica de fluidos y robótica las cuales fueron materias que recuerdo con cariño todos los días, gracias a él tuve la oportunidad de participar en el innovatec además de participar en la feria de ingeniería en el centro de ciencias gracias por la oportunidad y por haberme dado tales experiencias.

Me encantaría dar un agradecimiento al Ing. José Ángel Alcaraz Vega, gracias por darnos por tan poco tiempo, pero haberme dejado un conocimiento enorme, le agradezco por el aprendizaje y su paciencia hacia nuestros proyectos y espero que en un futuro podamos trabajar juntos en otro proyecto.

Dedicatoria:

Quiero dedicarle todos mis esfuerzos a mi madre, la persona que siempre confió en mí e hizo que mi sueño de ser ingeniero pudiera hacerse realidad gracias por el amor, el cariño y la paciencia que me tuviste para poder terminar mis estudios y quiero que sepas que siempre agradeceré las horas extras de trabajo que hiciste para poder pagar mis estudios Me gustaría dar un agradecimiento a mi familia por creer en mí y en mi crecimiento personal, gracias a ellos soy una

mejor persona y he podido lograr cumplir mis metas, siempre estaré agradecido y siempre los voy a amar.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento Ricardo Ibañez

Expreso mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis: maestros, trabajadores de la institución, amigos y familiares, quienes de una u otra manera contribuyeron a que pudiera alcanzar esta meta. Sin su apoyo y acompañamiento, la culminación de esta etapa académica de mi vida no habría sido posible. A todos ellos les agradezco profundamente y les deseo lo mejor en sus vidas.

De manera especial, agradezco a mi asesor, el Dr. Jhovany Payán Serrano, quien además de haber sido mi asesor también fue mi profesor en la materia de Robótica. Gracias a su apoyo, paciencia y orientación fue posible llevar a cabo este proyecto. Le agradezco sinceramente la oportunidad y la guía brindada durante el desarrollo de este trabajo.

Dedico esta tesis

A mi madre, Irma Soto, por confiar siempre en mí, por tu apoyo incondicional y por cada esfuerzo que has hecho para ayudarme a seguir adelante en mi formación profesional. Tu confianza y dedicación han sido una gran motivación para continuar trabajando por mis sueños.

A mi padre, Lucio Ibañez, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida y en mi desarrollo profesional. Gracias por tu apoyo constante, por tus consejos y por el cariño que siempre me has brindado. Agradezco profundamente todos los sacrificios que hiciste para que nunca me faltara nada y para que pudiera alcanzar esta meta.

Finalmente, dedico esta tesis a mi pareja, Fernanda Estrada, gracias por tu comprensión, tu paciencia y por estar presente siempre, sobre todo durante este proceso. Gracias por escucharme en los momentos difíciles y por brindarme tus consejos con amor y sinceridad.

Análisis y Diseño de un Vehículo Eléctrico de Tres ruedas con Formato 1-2 en CAD

RESUMEN

El siguiente proyecto consiste en el diseño y análisis en CAD (SolidWorks) de un vehículo eléctrico de tres ruedas con disposición delta (Una rueda delantera y dos ruedas traseras), utilizando perfilería tubular comercial como material estructural principal. El objetivo del diseño fue alcanzar un nivel de detalle suficiente que permita la aplicación de análisis de cargas estáticas y evaluar la resistencia del Chasis ante condiciones reales de uso urbano.

Para esto, se investigaron los principios de estabilidad estática y las configuraciones geométricas adecuadas para este tipo de vehículos. A partir de esta información, se desarrolló un modelo tridimensional en SolidWorks, integrando los elementos estructurales bajo criterios de simetría, simplicidad y factibilidad usando materiales disponibles en el mercado nacional.

Se aplicaron simulaciones por método de elementos finitos (FEM) a diferentes zonas críticas del Chasis, considerando cargas equivalentes al peso del conductor, batería y otros componentes.

El diseño busca ser una base estructural confiable para proyectos de movilidad eléctrica ligera, validando que es posible alcanzar una configuración estable y resistente sin necesidad de construir un prototipo físico.

1 TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE AUTORIZACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	vii
2 INTRODUCCIÓN	1
2.1 Antecedentes	3
2.2 Descripción del problema.....	11
2.3 Hipótesis y preguntas de investigación	13
2.4 Objetivo general	14
2.5 Objetivos específicos	14
2.6 Justificación	15
2.7 Alcance	16
3 FUNDAMENTO TEÓRICO	18
3.1 Movilidad eléctrica y contexto global.....	18
3.2 Diseño estructural y materiales	20
3.3 Principios de estabilidad estática y distribución de cargas.....	21
3.4 Método de elementos finitos.....	22
3.5 Chasis	23
3.6 Tipos de chasis.....	24
3.7 Suspensión Automotriz	27
3.8 Suspensión Independiente.....	28
3.9 Batería	32
3.10 Cargas aplicadas a las estructuras	33

3.10.1	Torsión longitudinal.....	34
3.10.2	Flexión vertical.....	35
3.10.3	Flexión lateral	36
3.11	Análisis de elementos finitos	37
3.12	Tipos de elementos finitos.....	38
3.12.1	Elementos tipo shell	38
3.12.2	Elementos tipo viga.....	39
4	PROCEDIMIENTO	40
4.1	Recolección y análisis de información	40
4.1.1	Revisión de literatura técnica	40
4.1.2	Identificación de requisitos funcionales y contextuales.....	40
4.1.3	Planteamiento de objetivos	40
4.2	Definición de requerimientos del diseño	40
4.2.1	Determinación de cargas principales.....	40
4.2.2	Geometría base del vehículo	41
4.2.3	Ubicación de componentes críticos	42
4.3	Selección de materiales y perfilera	42
4.3.1	Material estructural elegido	42
4.3.2	Justificación de elección	42
4.4	Modelado tridimensional en software CAD	43
4.4.1	Modelado del croquis base	43
4.4.2	Construcción de la estructura tubular	43
4.5	Análisis por elementos finitos (FEM).....	44

4.5.1	Preparación del modelo para análisis.....	44
4.5.2	Densidad de mallado	46
4.5.3	Aplicación de cargas estáticas	46
4.5.4	Interpretación de resultados y factor de seguridad.....	46
4.6	Evaluación y ajuste del diseño	47
4.6.1	Comparación con hipótesis	47
4.6.2	Presentación de propuesta final de diseño	47
4.7	Posición de conducción del piloto.....	48
4.8	Geometría de la suspensión.....	49
4.9	Reestructuración del chasis	50
4.10	Determinación de cargas.....	51
5	RESULTADOS.....	60
5.1	Cargas aplicadas a las estructuras.....	60
5.1.1	Análisis torsión longitudinal	60
5.1.2	Flexión lateral	61
5.2	Simulación.....	61
5.3	Geometría del chasis.....	62
5.3.1	Dimensiones vista superior	62
5.3.2	Dimensiones vista lateral	63
5.3.3	Dimensiones vista frontal	64
6	CONCLUSIONES.....	65
7	COMPETENCIAS DESARROLLADAS	70
8	FUENTES DE INFORMACIÓN	71

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Tipos de triciclos.....	5
Figura 2: Relian Regan.....	7
Figura 3: Triciclo Reliant Robin.....	9
Figura 4: Chasis tubular.....	24
Figura 5: Chasis Monocasco	25
Figura 6: Chasis hibrido.....	26
Figura 7: Tubería redonda	26
Figura 8: Tubería cuadrada	27
Figura 9: Suspensión automotriz.....	28
Figura 10: Suspensión independiente	29
Figura 11: Suspensión Dubonnet.....	29
Figura 12: Suspensión de doble triangulo	30
Figura 13: Suspensión transversal	30
Figura 14: Suspensión McPherson	31
Figura 15: Suspensión Multilink	31
Figura 16: Batería de Vehículo eléctrico.....	32
Figura 17: Torsión longitudinal.....	34
Figura 18: Torsión vertical	35
Figura 19: Torsión lateral.....	36
Figura 20: Ejemplo de discretización o malla.....	37
Figura 21: Ejemplo tipo Shell	38
Figura 22: Ejemplo tipo viga.....	39
Figura 23: Tabla de pesos	41

Figura 24: Croquis de estructura del chasis.....	41
Figura 25: Acero tubular	42
Figura 26: Primer modelo del chasis	43
Figura 27: Análisis de elementos finitos	44
Figura 28: Comparativa de elementos finitos.....	44
Figura 29: superficies intermedias de elementos finitos	45
Figura 30: Creación de modelo humanoide	48
Figura 31: Posición del modelo humanoide	48
Figura 32: Modelo con humanoide	49
Figura 33: Cambio de chasis tubular	50
Figura 34: Transferencia de masa lateral	51
Figura 35: Transferencia de masa longitudinal	52
Figura 36: Resultados de esfuerzos.....	55
Figura 37: Resultados de Deformación	55
Figura 38: Distancia de Y	56
Figura 39: Distancia X	56
Figura 40: Resultados de esfuerzos.....	58
Figura 41: Resultados de deformaciones	58
Figura 42: Resultados de esfuerzos.....	59
Figura 43: Resultados de deformación.....	59
Figura 44: Dimensiones del chasis vista superior	62
Figura 45: Dimensiones del chasis vista lateral	63
Figura 46: Dimensiones del chasis vista frontal	64

2 INTRODUCCIÓN

Esta tesis profesional aborda el diseño estructural de un vehículo eléctrico de tres ruedas con una configuración de tipo Delta (Una rueda delantera y dos ruedas traseras), enfocado específicamente en el desarrollo de un modelo tridimensional con perfilería tubular comercial, apto para ser evaluado con análisis de cargas estructurales.

En un contexto donde la movilidad eléctrica se ha consolidado como una alternativa viable frente al transporte tradicional, han surgido nuevas propuestas de diseño orientadas a reducir costos, complejidad mecánica y ensamblaje. Los vehículos de tres ruedas representan una opción de bajo consumo energético y menor huella ambiental, siendo especialmente útiles en entornos urbanos y de transporte ligero.

Este proyecto se justifica en la necesidad de contar con un diseño de Chasis que pueda fabricarse con materiales accesibles y sin requerir herramientas especializadas. A través de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), se busca desarrollar una propuesta estructural detallada y factible que permita su validación mediante simulaciones de esfuerzos, aplicando el método de elemento finito (FEM).

La investigación parte del análisis de referencias académicas y técnicas sobre la estabilidad estática, distribución geométrica y resistencia de chasis para triciclos eléctricos. Posteriormente, se establecen criterios de diseño estructural, selección de materiales y configuración geométrica para el modelado en 3D. Finalmente, se evalúan los resultados de los análisis de carga para determinar la viabilidad estructural del diseño.

Esta tesis se enmarca en el área de diseño mecánico y simulación estructural aplicada al desarrollo de soluciones de movilidad eléctrica, contribuyendo con una propuesta que busca ser replicable y adaptada a las condiciones locales de manufactura y uso.

2.1 Antecedentes

En los últimos años, la movilidad eléctrica ha crecido de manera significativa como alternativa sustentable al transporte tradicional, impulsada por la necesidad de reducir emisiones contaminantes, mejorar la eficiencia energética y promover sistemas de transporte más sostenibles. Este crecimiento ha dado lugar al desarrollo de vehículos ligeros que buscan combinar el bajo consumo energético con costos de fabricación reducidos. (International Energy Agency, 2019).

Dentro de estas alternativas, en países como China han adquirido relevancia, siendo utilizados como vehículos urbanos de transporte a nivel ciudad. (Market Research Forecast, 2024).

Los vehículos de tres ruedas pueden clasificarse en dos configuraciones principales: Delta (Con una rueda delantera y dos traseras) y tadpole (Dos ruedas delanteras y una trasera). La configuración delta, aunque más sencilla y económica, representa retos en cuanto a estabilidad y la distribución de cargas, motivo por el cual su diseño estructural requiere una consideración especial. (Torres, 2020).

Entre los proyectos citados, pocos de estos consideran la posibilidad de utilizar perfilera tubular comercial como base del diseño del Chasis, lo cual representa una oportunidad para proponer soluciones viables en términos de simplicidad, costo y factibilidad de construcción local.

El tamaño del mercado de triciclos eléctricos se valoró en aproximadamente 1.44 mil millones de dólares en 2024. Se espera que el mercado de triciclos eléctricos crezca hasta alcanzar la cifra de 7 mil millones de dólares para el año 2035.

Se espera que la tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) del mercado de triciclos eléctricos se sitúe en torno al 8,3 % durante el período de pronóstico (2025-2035) (Emergen Research, 2025).

El mercado global de triciclos eléctricos está experimentando un crecimiento significativo impulsado por diversos factores. Uno de los principales impulsores del mercado es la creciente tendencia hacia opciones de transporte sostenible, a medida que los gobiernos de todo el mundo priorizan la reducción de las emisiones de carbono. (Research and Markets, 2024).

Muchos países están implementando políticas de movilidad urbana que fomentan la adopción de vehículos eléctricos, incluidos los triciclos, para combatir la contaminación y la congestión vehicular (International Energy Agency, 2019). Este respaldo regulatorio fomenta un entorno de mercado favorable para los triciclos eléctricos, atractivo para los consumidores con conciencia ambiental.

El mercado está experimentando innovaciones, como un diseño mejorado y la tecnología conectada, que atraen a los consumidores que buscan soluciones de movilidad modernas e inteligentes. En general, el mercado mundial de triciclos eléctricos está preparado para un crecimiento sustancial, respaldado por una combinación de respaldo regulatorio, avances tecnológicos y un cambio en el comportamiento del consumidor hacia opciones de transporte sustentables (Cognitive Market Research, 2024).

Los triciclos delta y tadpole (renacuajo) son dos tipos comunes de vehículos de tres ruedas que difieren en su diseño y características de rendimiento. La principal distinción entre estos dos tipos de triciclos es la posición de sus ruedas (Tricycle, s.f.).

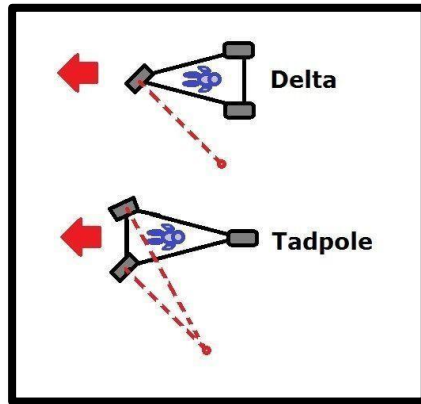


Figura 1: Tipos de triciclos

Tadpole: Una de las principales ventajas de los triciclos renacuajo es su estabilidad y equilibrio. Con dos ruedas delante y una detrás, es menos probable que vuelquen, incluso a altas velocidades o en terrenos irregulares. Esto los convierte en una excelente opción para los ciclistas que buscan una conducción segura.

Otra ventaja de los triciclos renacuajo es su posición de asiento cómoda y relajada. Un triciclo renacuajo ofrece una posición de conducción más reclinada, que puede ser más cómoda para los conductores con problemas de espalda o cuello, y el bajo centro de gravedad puede hacer que el triciclo se sienta más estable y seguro.

Delta: Una de las mayores ventajas de los triciclos delta es su velocidad y maniobrabilidad. Con una sola rueda delantera, son más ágiles y pueden tomar curvas y giros cerrados con mayor facilidad.

Otra ventaja de los triciclos delta es su visibilidad. Los triciclos Delta ofrecen una posición de conducción más erguida, con una sola rueda delantera y una posición de asiento más elevada, los ciclistas son más visibles para los demás usuarios de la carretera, lo que puede ser una importante característica de seguridad. Sin embargo, los triciclos delta presentan **problemas típicos** que limitan su desempeño:

- **Inestabilidad en curvas:** al girar, el peso se concentra en la rueda delantera, lo que aumenta el riesgo de vuelco, especialmente a velocidades más altas.
- **Frenado desigual:** el peso se concentra en la parte trasera, provocando derrapes o bloqueos peligrosos durante frenadas fuertes.
- **Dirección imprecisa:** la única rueda delantera soporta demasiado esfuerzo, generando vibraciones y pérdida de control en terrenos irregulares.
- **Distribución de peso desfavorable:** la parte frontal suele tener poca tracción, lo que puede causar patinajes al arrancar o inestabilidad en superficies mojadas.
- **Tendencia al vuelco lateral:** la combinación de curva + freno + velocidad puede provocar que el triciclo se ladee fácilmente, como ocurrió históricamente con vehículos delta famosos (ej. Reliant Robin).
- **Menor seguridad a alta velocidad:** están diseñados para bajas velocidades urbanas, pero a más de 50–60 km/h la conducción se vuelve arriesgada y poco cómodo.



Figura 2: Reliant Regal

Reliant Regal: El Reliant Regal fue un automóvil de tres ruedas producido por la británica Reliant Motor Company en Tamworth, Inglaterra, entre 1952 y 1973. La ley del Reino Unido lo clasificaba como “triciclo”; eso le permitía pagos fiscales más bajos y que se pudiera conducir con licencia de moto, algo clave para su popularidad en la posguerra. En total se fabricaron algo más de 110.000 unidades a lo largo de su vida comercial. En 1962 Reliant lanza el Regal Mk VII con chasis de acero nuevo y carrocería unitaria de fibra y, sobre todo, un nuevo motor OHV de aleación desarrollado por Reliant a partir del Standard SC de 803 cc. (Gutiérrez, 2021).

Diseño: Configuración de ruedas: 1 delantera (directriz) + 2 traseras (motrices), lo que se llama disposición “delta”.

Tren motor: Motor delantero (en las últimas series, de aleación) con propulsión trasera.

Estructura: Chasis de acero con carrocería de fibra, lo que daba peso en orden de marcha alrededor de 445–500 kg, muy por debajo de un utilitario convencional.

Gamas: turismo de dos puertas, estate, pick-up y furgonetas Supervan (estas últimas famosas por su presencia en la cultura popular británica).



Figura 2 : Triciclo Reliant Robin

Reliant Robin: Resurrección del nombre “Robin” en 1989: carrocería nueva de fibra, portón trasero completo en hatch, frenos mejorados, llanta de 12” y acabados (LX, SLX, BRG, Royale). Chasis galvanizado en esta etapa.

Configuración: delta (1 rueda delantera directriz; 2 traseras motrices). Motor delantero y tracción trasera (FMR).

Estructura: fibra de vidrio (cáscara ligera, barata de moldear) sobre chasis de acero; en Mk2/Mk3 se menciona chasis galvanizado, útil contra la corrosión.

Motorizaciones: OHV 748 cc (inicial), luego 848–850 cc Prestaciones y consumo: con 850 cc, 0–60 mph ~14–16 s, velocidad punta ~85 mph y hasta 60–70+ mpg imp

Entre sus principales ventajas los vehículos de 3 ruedas tienen:

- **Eficiencia y bajo costo:** requieren menos materiales y piezas que un automóvil convencional, lo que reduce su precio de adquisición y mantenimiento, además de un menor consumo de combustible o energía en el caso de los modelos eléctricos.
- **Facilidad de maniobra en ciudad:** al ser más compactos, permiten moverse con agilidad en calles estrechas y congestionadas, así como estacionarse en espacios reducidos.
- **Mayor estabilidad que una motocicleta:** la tercera rueda brinda más equilibrio, especialmente al arrancar, detenerse o circular a baja velocidad.
- **Versatilidad de uso:** existen configuraciones diseñadas tanto para pasajeros como para transporte de carga ligera o reparto urbano, lo que amplía su funcionalidad.
- **Accesibilidad y comodidad:** ofrecen posiciones de conducción diversas (más reclinadas en tadpole o más erguidas en delta) que pueden adaptarse a diferentes necesidades de confort y visibilidad.
- **Atractivo para la movilidad sostenible:** los triciclos eléctricos, en particular, suelen estar impulsados por políticas de apoyo gubernamental y resultan una opción ecológica frente al automóvil tradicional.

2.2 Descripción del problema

En los últimos años, la movilidad eléctrica ligera ha cobrado relevancia como una alternativa viable para el transporte urbano, gracias a su bajo impacto ambiental y sus costos de operación reducidos.

De acuerdo con la *International Energy Agency (IEA)*, en 2018 la flota mundial de autos eléctricos de pasajeros superó los 5.1 millones de unidades, lo que representó un crecimiento de casi el 63% respecto al año anterior (*Global EV Outlook 2019*, IEA).

Esta tendencia confirma una demanda creciente por soluciones de movilidad eléctrica accesibles y eficientes, dentro de las cuales los vehículos de tres ruedas en configuración delta (una rueda delantera y dos traseras) surgen como una opción viable por su simplicidad estructural y menor costo en comparación con vehículos de cuatro ruedas. Sin embargo, esta misma configuración presenta retos técnicos que deben atenderse para garantizar un diseño confiable, ya que factores como la distribución del peso, la ubicación del centro de gravedad y la geometría del chasis influyen directamente en la estabilidad estática y en la seguridad del vehículo.

A pesar de que existen múltiples proyectos y prototipos documentados en publicaciones científicas y técnicas, gran parte de ellos emplea materiales especializados o procesos de fabricación costosos, poco accesibles para una producción a menor escala.

Mientras la flota global de vehículos eléctricos sigue en expansión y se proyecta que crecerá de manera sostenida hacia 2030 (IEA, *Global EV Outlook 2019*), pocos estudios se han enfocado en Chasis que utilicen perfilera tubular comercial, pensados desde el inicio para resistir cargas mecánicas y mantener una base simétrica adecuada. Esta carencia limita la posibilidad de replicar diseños de manera práctica en entornos educativos, académicos o de manufactura básica.

Por todo esto, surge la necesidad de desarrollar un diseño tridimensional de Chasis tubular para un vehículo eléctrico de tres ruedas en disposición delta, que integre criterios de estabilidad estática y resistencia mecánica, con el nivel de detalle suficiente para permitir la aplicación de análisis por elementos finitos.

Este trabajo busca atender esa necesidad mediante un diseño en CAD realizado en SolidWorks, validado estructuralmente en simulación digital, que sirva como propuesta factible y replicable para condiciones urbanas con velocidades moderadas de hasta 60 km/h.

2.3 Hipótesis y preguntas de investigación

El diseño de un chasis tubular en configuración Delta, elaborado con perfilería tubular comercial y modelado en software CAD, es capaz de resistir las cargas estáticas correspondientes al peso del conductor, un pasajero, los componentes principales (Motor y batería) y posibles cargas detrás, manteniendo un factor de seguridad adecuado que garantice estabilidad estructural y operación segura en condiciones de ciudad a velocidades hasta 60 km/h.

Nuestras preguntas de investigación son las siguientes:

- ¿Qué geometría de chasis en configuración Delta proporciona mayor estabilidad estática y resistencia mecánica empleando perfilería tubular comercial?
- ¿Es posible validar, por FEM, que el diseño propuesto soporta las cargas de operación esperadas en condiciones de ciudad?
- ¿Cómo influye la distribución de peso en la ubicación del centro de gravedad en la estabilidad del vehículo, y cómo mejorar el diseño para maximizar dicha estabilidad?

2.4 Objetivo general

Desarrollar el diseño tridimensional de un chasis tubular para un vehículo eléctrico de tres ruedas en configuración Delta, utilizando perfilera tubular comercial, con el nivel de detalle necesario para permitir la aplicación de análisis de cargas mediante software CAD (SolidWorks), garantizando la viabilidad estructural y la estabilidad para operación en condiciones urbanas a velocidades moderadas.

2.5 Objetivos específicos

- **Analizar** los criterios de estabilidad estática y resistencia mecánica aplicables a vehículos eléctricos de tres ruedas en configuración delta, con base en literatura científica y antecedentes técnicos.
- **Definir** las especificaciones de diseño y los parámetros geométricos necesarios para un chasis fabricado con perfilera tubular comercial, adecuados para operación urbana a velocidades moderadas.
- **Desarrollar** el modelo tridimensional del chasis en software CAD, integrando las condiciones de estabilidad y resistencia previamente establecidas.
- **Validar** el desempeño estructural del chasis mediante simulaciones de cargas estáticas utilizando el método de elementos finitos (FEM), asegurando un factor de seguridad adecuado.
- **Proponer** un diseño final optimizado que sea factible de replicar en entornos educativos, académicos o de manufactura.

2.6 Justificación

El desarrollo de vehículos eléctricos de tres ruedas en configuración delta representa una alternativa llamativa para la movilidad urbana, al ofrecer una solución de transporte accesible, eficiente y con bajo impacto ambiental (Abreu et al., 2023). Sin embargo, uno de los principales retos de los vehículos con esta configuración es el diseño estructural del chasis, ya que debe garantizar estabilidad estática y resistencia mecánica sin elevar significativamente los costos de manufactura (Zamzam, 2025).

La presente investigación es relevante por que busca cubrir una brecha poco atendida en proyectos similares: La aplicación de perfilería tubular comercial en el diseño del chasis. Esto permite plantear una propuesta realista y viable para un contexto en el que los recursos económicos y técnicos están limitados para bajar los costos de producción, como instituciones educativas, entornos académicos o iniciativas de manufactura locales.

Los resultados de este trabajo aportarán un modelo 3D validado estructuralmente, que podrá servir como referencia para futuros desarrollos en el ámbito de la ingeniería en electromovilidad, diseño mecánico y formación académica. Con ello, se contribuye a la generación de conocimiento técnico aplicable y a la posibilidad de replicar proyectos de movilidad eléctrica de manera práctica, segura y sostenible.

2.7 Alcance

El presente proyecto se centra en el diseño tridimensional de un chasis tubular para un vehículo eléctrico de tres ruedas en configuración Delta, utilizando perfilera tubular comercial. El trabajo abarcará desde la revisión de teoría y antecedentes técnicos sobre estabilidad estructural y configuraciones geométricas, hasta el modelado del chasis en software CAD (SolidWorks) y su validación mediante análisis de cargas estáticas con el método de elementos finitos (FEM) (Ozcan & Ersoy, 2021; Yang & Ke, 2014).

El estudio se encuentra delimitado conceptualmente al diseño estructural del chasis, por lo que no contempla el desarrollo detallado de sistemas eléctricos, electrónicos o de control para el vehículo. Geográficamente, el proyecto se plantea bajo el contexto del mercado nacional mexicano, tomando como referencia la disponibilidad local de perfilera tubular comercial. En el ámbito temporal, el trabajo se limita al periodo de realización de la tesis, durante el cual se desarrollará el modelo 3D y se evaluará su desempeño estructural en condiciones de operación urbana (Aplicando análisis de esfuerzo con cargas varias simulando situaciones reales).

En el aspecto técnico y metodológico, el estudio se limita a cargas equivalentes al peso del conductor, un pasajero y los principales componentes (motor, batería y accesorios), validando la viabilidad estructural del diseño hasta velocidades urbanas aproximadas de 60 km/h. Se emplean herramientas de simulación digital como SolidWorks, sin extender el alcance a procesos de manufactura, normativas de homologación vehicular o pruebas de campo reales.

De esta forma, el proyecto busca establecer un marco de referencia técnico y práctico para futuros desarrollos, pero no pretende llegar a la construcción física del prototipo ni a la validación experimental en condiciones reales, limitándose al análisis computacional y a la propuesta de diseño.

Finalmente, es importante señalar que dentro de las limitaciones del proyecto no se abordan aspectos de viabilidad económica, eficiencia energética, impacto ambiental completo ni normativas legales de circulación.

El presente trabajo se enfoca exclusivamente en establecer una propuesta estructural académica factible, que sirva como base de referencia para futuros desarrollos en electromovilidad ligera.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

El desarrollo de un vehículo eléctrico de tres ruedas en configuración delta requiere el sustento de conceptos teóricos que permitan comprender su relevancia, limitaciones y posibilidades de implementación en contextos urbanos. Para ello, es necesario abordar el marco conceptual relacionado con la movilidad eléctrica, el diseño de vehículos triciclo, los criterios estructurales y de estabilidad, así como las metodologías de simulación aplicadas en ingeniería asistida por computadora (Ulrich & Eppinger, 2013; Mora, 2018).

3.1 Movilidad eléctrica y contexto global

La movilidad eléctrica se ha consolidado como una alternativa sostenible frente a los medios de transporte convencionales, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones contaminantes (IEA, 2023).

De acuerdo con la IEA (Agencia internacional de Energía), en 2018 la flota mundial de autos eléctricos superó los 5.1 millones de unidades, con una tendencia creciente hacia la electrificación del transporte urbano (IEA, 2019). Este fenómeno ha impulsado la búsqueda de soluciones más accesibles y ligeras, dentro de las cuales los triciclos eléctricos representan una opción viable por su bajo costo de operación y su simplicidad mecánica (Shaheen & Cohen, 2020).

A pesar de las recientes tensiones comerciales y los aranceles recíprocos impuestos por Estados Unidos a principios de abril, la movilidad eléctrica en México continúa mostrando resiliencia (Secretaría de Economía, 2025). Mientras que países como China, la UE y Corea del Sur enfrentan aranceles de hasta el 46%, México sigue excluido del acuerdo T-MEC, preservando una ventaja estratégica para su industria automotriz.

Según el Directorio Automotriz, solo se invirtieron \$78,6 millones en proyectos de movilidad eléctrica en el primer trimestre de 2025 —, una drástica caída del 97,4% en comparación con el mismo período del año pasado (Directorio Automotriz, 2025). Liderando el sector está la planta de Ford Motor Company en Hermosillo, ahora la más productiva de México con 87,857 unidades construidas de enero a marzo.

La instalación opera al 117,14% de su capacidad instalada e incluye variantes híbridas como la camioneta Maverick, mostrando la persistencia de movilidad eléctrica en México (Directorio Automotriz, 2025). El número de nuevos proyectos creció un 15,7%, lo que indica un cambio hacia inversiones más deliberadas y diversificadas. En total, México recibió 59 proyectos automotrices de 13 países en el primer trimestre de 2025, por un total de \$2.570 millones.

La movilidad eléctrica en México todavía enfrenta desafíos importantes, pero la combinación de política interna, protección comercial y crecientes capacidades tecnológicas posiciona al país como un centro automotriz resiliente y en evolución para América (Secretaría de Economía, 2025).

3.2 Diseño estructural y materiales

El chasis constituye el elemento fundamental en la seguridad y resistencia de un vehículo. Su función principal es soportar las cargas estáticas y dinámicas, distribuyendo esfuerzos hacia los diferentes puntos de la estructura (Gillespie, 1992).

En el caso de vehículos ligeros, el uso de **perfilería tubular comercial** resulta adecuado debido a su bajo costo, disponibilidad en el mercado y facilidad de manufactura. La perfilería tubular presenta una buena relación peso-resistencia, permitiendo diseños modulares y simples que se adaptan a las capacidades locales de construcción (Ashby, 2011).

Por definición, el perfil tubular (PT) es una pieza hueca de metal que se caracteriza por tener contorno redondo, cuadrado o rectangular y dos extremos abiertos. Suelen ser de acero aleado de calidad (No puro), para presentar un buen comportamiento ante una gran tracción, compresión y cortante, además de permitir la transmisión de calor y de corriente, y de ser relativamente ligero (Ferrosplan, 2023).

3.3 Principios de estabilidad estática y distribución de cargas

La estabilidad de un triciclo depende de la posición de su centro de gravedad, la base de sustentación y la distribución de pesos (Gillespie, 1992; Wong, 2008). En los triciclos delta, la rueda delantera es la directriz y concentra gran parte de las cargas en maniobras de giro, lo que incrementa el riesgo de vuelco si la geometría no se diseña adecuadamente (Wong, 2008).

Los parámetros más relevantes en la estabilidad estática son:

- **Centro de gravedad:** debe mantenerse lo más bajo y centrado posible.
- **Distancia entre ejes y ancho de vía:** influyen en la distribución de cargas y en la resistencia al vuelco.
- **Factor de seguridad estructural:** garantiza que el chasis resista las cargas esperadas sin deformaciones críticas.

Estos principios deben integrarse desde el modelado CAD para lograr una configuración segura en condiciones urbanas de hasta 60 km/h, límite razonable para triciclos eléctricos de bajo costo (UNECE, 2019).

3.4 Método de elementos finitos

El **método de elementos finitos (FEM)** constituye una de las herramientas más empleadas en ingeniería mecánica para predecir el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga (Cook et al., 2002). A través de un modelo computacional, la estructura se divide en elementos pequeños donde se calculan esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, permitiendo validar la viabilidad del diseño sin necesidad de prototipos físicos (Logan, 2011).

En el caso de los triciclos eléctricos, la aplicación del FEM permite:

- Simular cargas equivalentes al peso del conductor, pasajeros y batería.
- Identificar zonas críticas del chasis con mayores esfuerzos.
- Optimizar la geometría y espesor de los tubos estructurales (Logan, 2011).
- Garantizar un factor de seguridad adecuado antes de la construcción.

Modelado geométrico

Crear un modelo 3D fiel a la geometría de chasis con sus miembros tubulares, uniones, refuerzos, etc. Esto puede realizarse en software CAD como SolidWorks, con atención al espesor, diámetro, longitud y posición de los tubos (Shih, 2018).

Definición de propiedades del material

Asignar propiedades mecánicas como módulo de elasticidad (Young), coeficiente de Poisson, densidad, límite de fluencia, etc. (Callister & Rethwisch, 2020). Si usas perfiles comerciales, estas propiedades deben corresponder al material real (por ejemplo, acero estructural, aluminio, acero aleado).

3.5 Chasis

El chasis constituye la estructura principal del vehículo, siendo el elemento encargado de integrar y soportar los distintos sistemas que lo componen, además de contribuir a su correcto funcionamiento y confiabilidad operativa (Gillespie, 1992).

Dentro del proceso de diseño estructural, uno de los aspectos prioritarios es la protección de los ocupantes; por ello, el bastidor se configura con zonas específicas diseñadas para deformarse de manera controlada ante un impacto, permitiendo así la disipación progresiva de la energía generada (Hucho, 1998).

Durante condiciones de operación dinámica, como aceleraciones, frenadas y variaciones en la distribución de masas, la rigidez estructural del chasis adquiere un papel determinante. Una estructura con baja resistencia a la deformación puede comprometer el desempeño del sistema de suspensión, ya que altera las condiciones bajo las cuales fue calibrado, afectando la estabilidad y el control del vehículo (Gillespie, 1992).

Resulta fundamental considerar la manera en que las cargas, tanto estáticas como dinámicas, se transmiten a través de la estructura. Una adecuada distribución de los esfuerzos a lo largo del chasis permite mejorar la eficiencia estructural, lo que se traduce en una reducción del peso total y en una optimización de los costos de fabricación, al hacer un uso más eficiente de los materiales disponibles.

3.6 Tipos de chasis

Chasis tubular: Los chasis tipo bastidor espacial tubular se emplean principalmente en el ámbito del automovilismo, donde se requiere un alto desempeño estructural (Smith, 1978; Milliken & Milliken, 1995).

Este tipo de configuración también es adoptado en vehículos deportivos de alto nivel, utilizados por fabricantes reconocidos como Lamborghini, Ferrari y Jaguar, entre otros. Durante su diseño, se consideran factores clave como la reducción de masa, la rigidez estructural y la optimización de la posición del centro de gravedad, con el fin de maximizar el rendimiento dinámico del vehículo (Milliken & Milliken, 1995).

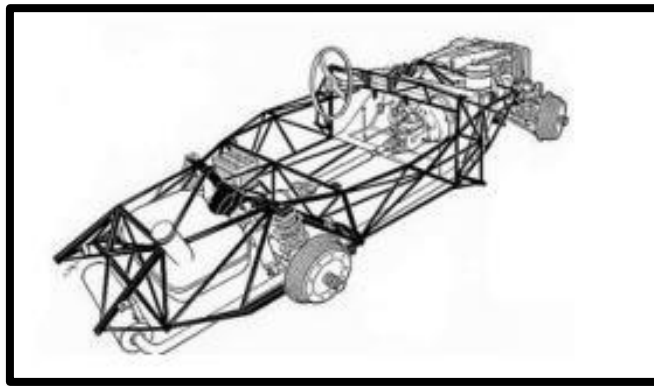


Figura 3: Chasis tubular

Chasis Monocasco: En comparación a las estructuras tubulares, en un chasis monocasco las cargas son absorbidas por la piel de este (Ashby & Jones, 2012). El chasis monocasco de fibra de carbono es una superficie continua de láminas encargadas de absorber y resistir los esfuerzos como se muestra en la figura 5.

Este diseño permite el desarrollo de un chasis extremadamente rígido y ligero. Las desventajas que presenta este tipo de chasis son las dificultades técnicas durante la producción y elevados costos; además, el difícil mantenimiento que se presenta en los materiales compuestos producto de agrietamiento o impactos repetitivos que causan la

degradación del material al separarse las fibras de la matriz, este efecto es conocido como delaminación (Ashby & Jones, 2012).



Figura 4 : Chasis Monocasco

Chasis Híbrido: Una de las principales ventajas de este tipo de configuración estructural radica en la integración de los beneficios más relevantes de dos sistemas constructivos distintos, permitiendo mitigar las limitaciones que cada uno presenta de manera individual (Milliken & Milliken, 1995).

En este enfoque, la sección frontal está constituida por una cabina tipo monocasco elaborada con materiales compuestos, como fibras de carbono, cuya finalidad es brindar protección y alojamiento al piloto. La parte posterior se compone de un chasis tubular, el cual cumple la función de soportar y permitir la correcta instalación de elementos mecánicos como el motor, el sistema de transmisión y el conjunto de la suspensión trasera.

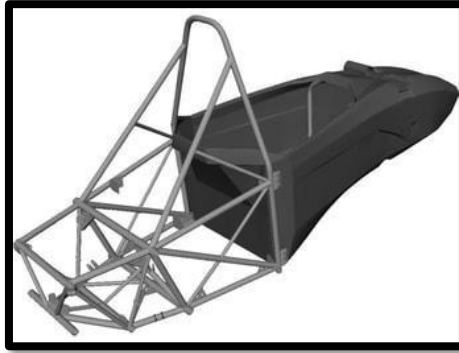


Figura 5: Chasis híbrido

Tubería

Tubería redonda: Los tubos mecánicos, que se producen según ASTM A513, realizan funciones amplias y de gran alcance, lo que los convierte en los más versátiles de todas las especificaciones de tubos (ASTM International, 2021b). Los tubos mecánicos se producen a partir de acero plano laminado progresivamente hasta obtener un tamaño y forma acabados. Una soldadura por resistencia eléctrica crea la costura.



Figura 6: Tubería redonda

Tubería cuadrada: Esta especificación cubre la mayoría de los HSS utilizados en la construcción, incluidas las formas redondas, rectangulares y cuadradas utilizadas para la construcción “soldada, remachada o atornillada de puentes y edificios, y para fines estructurales generales” (ASTM International, 2021a). Los HSS conformes al A500 son tubos de acero al carbono conformados en frío que se fabrican con un proceso soldado o sin costura.

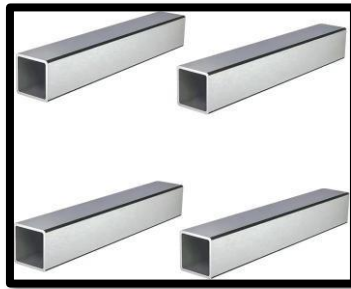


Figura 7 : Tubería cuadrada

3.7 Suspensión Automotriz

La suspensión automotriz es un conjunto de mecanismos que une la carrocería del vehículo a las ruedas (Gillespie, 1992). Es la acción y el efecto de levantar un objeto o elemento que, junto con componentes y mecanismos, consiguen dar elasticidad a la carrocería sobre las ruedas de un auto, conciliando el confort y la estabilidad del vehículo.

Las principales funciones de la suspensión automotriz son:

- Maximizar la tracción entre las llantas y el camino (Gillespie, 1992).
- Soportar el peso de la carrocería y las cargas.
- Absorber vibraciones e impactos desde la superficie del camino.
- Disminuir el balanceo de la carrocería y asegurar un apropiado nivel de comodidad durante el viaje (Milliken & Milliken, 1995).

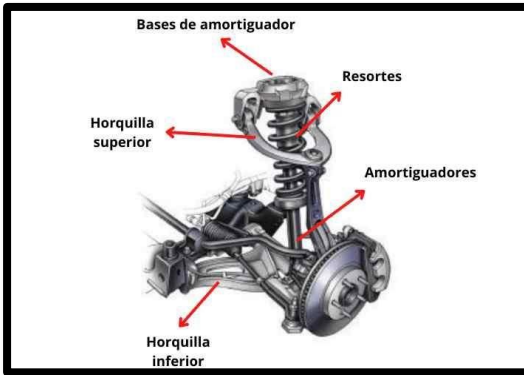


Figura 8: Suspensión automotriz

3.8 Suspensión Independiente

También conocida como Multilink (Trad. Lit. Multienlace), utiliza diferentes puntos de conexión con la carrocería y cada rueda. Al ser independiente, permite un mayor control de la carrocería y que una llanta no afecte a la otra si se encuentra con alguna irregularidad, brindando mayor confort, seguridad y control (Gillespie, 1992). A su vez, genera una menor masa no suspendida que hace más fácil que las ruedas estén siempre pegadas al camino. El resultado es una mayor estabilidad, un mejor agarre en curvas, además de un control superior del auto y un confort optimizado (Milliken & Milliken, 1995).

Pilar deslizante: Fue el primer sistema de suspensión independiente y su uso se relegó a los autos recreativos. Funcionan por medio de un pivote de dirección desarrollado (Gillespie, 1992).



Figura 9: Suspensión independiente

Suspensión Dubonnet: Se utilizó en décadas del 30' y 40'. Muy utilizado por General Motors, este sistema introdujo los brazos longitudinales para el control vertical de las velocidades de las ruedas (Gillespie, 1992).

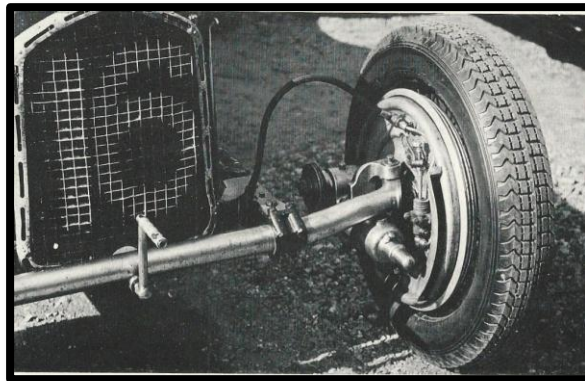


Figura 10: Suspensión Dubonnet

Suspensión de dobles triángulos: Se basó en principios de geometría de suspensión, que reconoce la disposición como la manera ideal para la suspensión (Milliken & Milliken, 1995). Consiste en dos brazos superpuestos de forma transversal y en forma de "A", articulados por un pivote que se conecta a las ruedas.



Figura 11: Suspensión de doble triángulo

Ballesta transversal: Es una evolución de la suspensión anterior. Se sustituyen los brazos por una ballesta que funciona a la vez como brazo y resorte. Se reduce tanto el peso como el volumen, y se compensa mejor a nivel geométrico el sistema suspensor (Gillespie, 1992).



Figura 12: Suspensión transversal

Suspensión McPherson: Funciona mediante un mecanismo de triángulo que se articula por un brazo inferior, el muelle-amortiguador y el chasis. Se utiliza en el eje delantero (Gillespie, 1992).

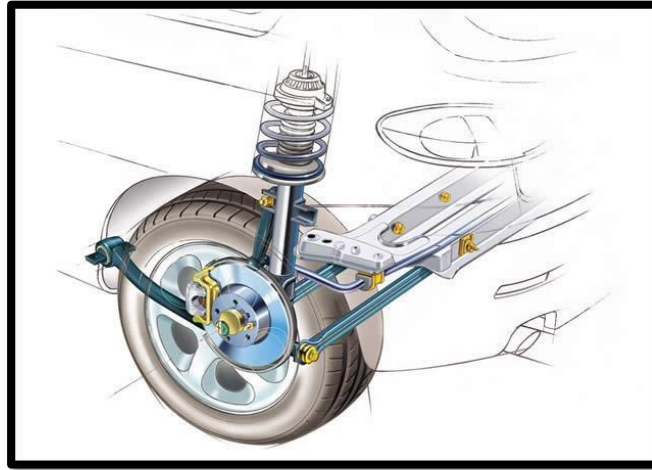


Figura 13: Suspensión McPherson

Suspensión Multilink: Es un sistema basado en un paralelogramo. Esta característica convierte a este sistema de suspensión independiente en el mejor modelo para poder configurar la estabilidad de las ruedas según el terreno por donde se maneje. Su introducción significa un plus de confort (Milliken & Milliken, 1995).



Figura 14: Suspensión Multilink

3.9 Batería

Un desarrollo de movilidad eléctrica permite al diseñador colocar todos los motores y el paquete de baterías en un chasis que parece una patineta, con una carrocería relativamente simple construida encima (Ehsani, Gao & Emadi, 2018).

El tamaño y la forma del chasis y la carrocería se pueden variar fácilmente para satisfacer diferentes necesidades, desde un pequeño coche de consumo hasta un modelo de lujo, un camión de reparto, una camioneta o incluso un vehículo de construcción todoterreno (Ehsani et al., 2018; Chan, 2007).

Todo esto se puede implementar utilizando variantes de la misma plataforma de patineta a una fracción del costo de un diseño de vehículo tradicional (Chan, 2007).



Figura 15: Batería de Vehículo eléctrico

3.10 Cargas aplicadas a las estructuras

Durante el proceso de diseño estructural del chasis, resulta fundamental identificar y caracterizar las cargas que actúan sobre la estructura, tanto en condiciones estáticas como dinámicas (Gillespie, 1992).

La respuesta del chasis ante estas sollicitaciones depende directamente de la magnitud y la distribución de dichas cargas, lo que provoca distintos comportamientos mecánicos en la estructura (Beer, Johnston, DeWolf & Mazurek, 2015).

Entre los modos de deformación más representativos en vehículos se encuentran la torsión a lo largo del eje longitudinal, así como las flexiones en dirección vertical, lateral y horizontal (Gillespie, 1992; Beer et al., 2015).

3.10.1 Flexión longitudinal

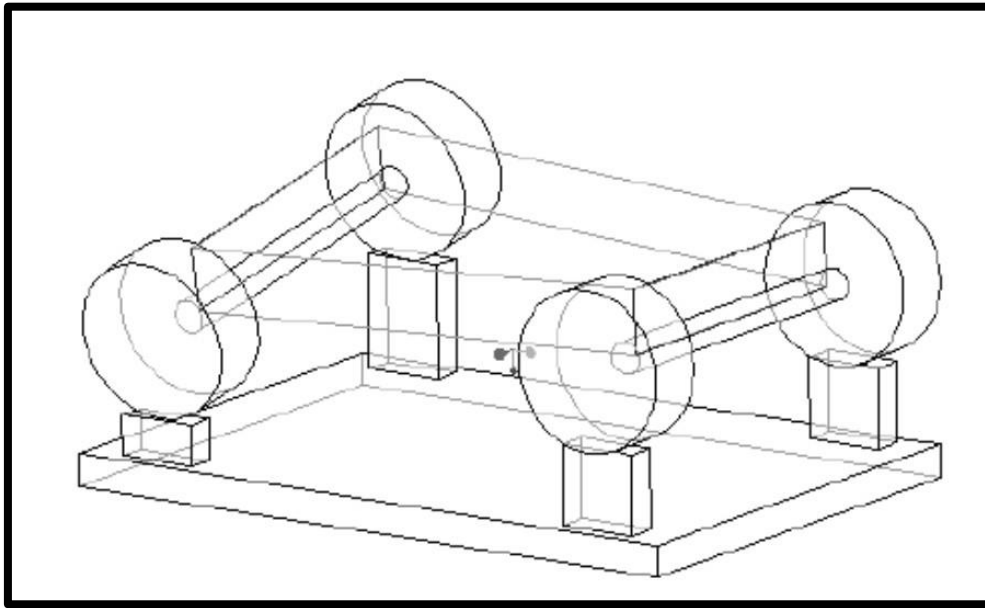


Figura 16: Flexión longitudinal

Este tipo de torsión se genera debido a que las fuerzas en direcciones opuestas se aplican sobre una o ambas ruedas del vehículo; es decir, corresponde al momento producido por un par de fuerzas que actúa en el eje delantero a lo largo del eje longitudinal del automóvil (Gillespie, 1992; Beer et al., 2015).

En este contexto, el chasis se modela como un elemento elástico cuya función es unir los puntos donde se transmiten las cargas provenientes del sistema de suspensión (Gillespie, 1992).

3.10.2 Flexión vertical

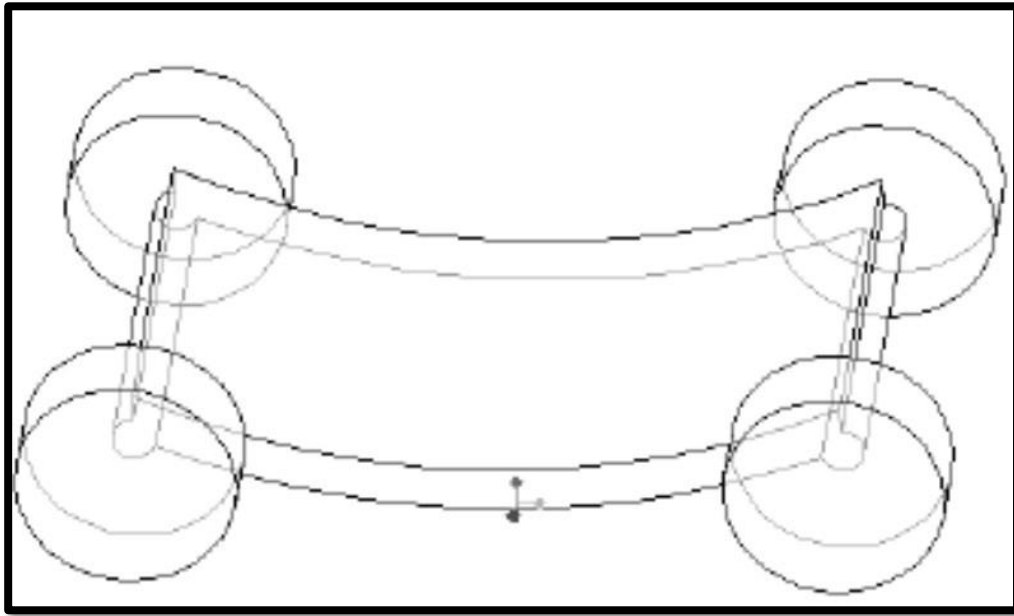


Figura 17: Flexión vertical

La flexión vertical corresponde a la deformación producida por la carga total de los componentes del vehículo instalados sobre el bastidor, tales como el motor, las baterías, el sistema de transmisión y el mecanismo de dirección, entre otros (Gillespie, 1992).

Estas cargas se reparten a lo largo de toda la estructura mediante los nodos, lo que origina esfuerzos de flexión en la mayoría de los elementos estructurales (Beer et al., 2015).

Las reacciones se presentan en los ejes, por lo que la mayor deformación tiende a concentrarse en la zona cercana al centro de gravedad (Gillespie, 1992).

3.10.3 Flexión lateral

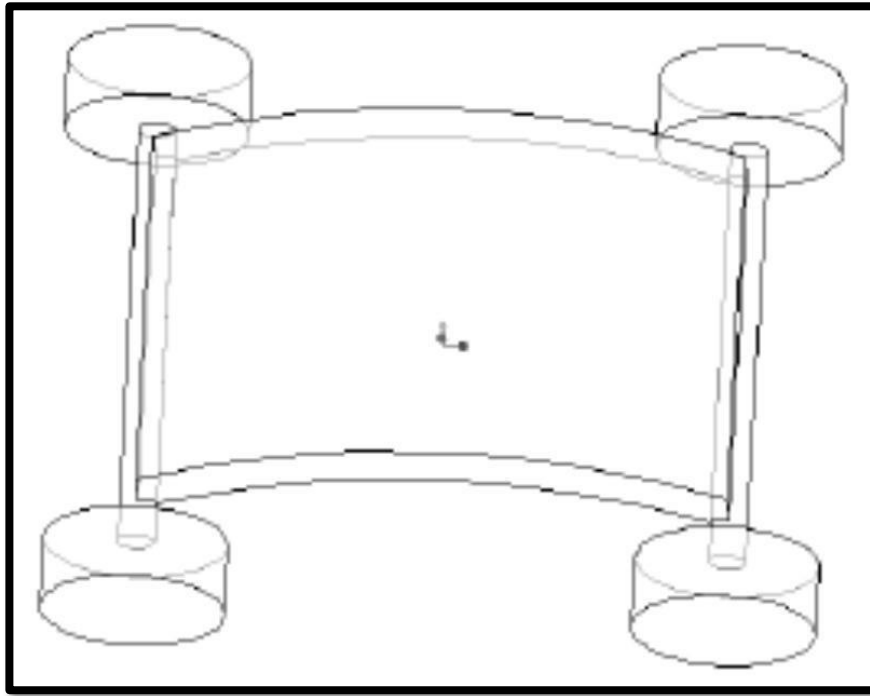


Figura 18: Flexión lateral

La flexión lateral se produce como consecuencia de las cargas generadas por fuerzas centrífugas y, en menor proporción, por la acción del viento lateral (Gillespie, 1992).

Estas solicitaciones se transmiten a lo largo de la estructura y son absorbidas por distintos elementos del bastidor, como los arcos de seguridad y las estructuras diseñadas para impactos laterales (Milliken & Milliken, 1995).

3.11 Análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos (FEA) es una técnica computacional utilizada en ingeniería para simular y analizar el comportamiento de estructuras y sistemas complejos bajo diversas condiciones físicas (Cook et al., 2002; Logan, 2011).

Este procedimiento se fundamenta en seccionar el cuerpo en un dominio en donde se definen ecuaciones integrales que describen el fenómeno físico del análisis en un conjunto de subdominios separados entre sí denominados elementos finitos (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2005).

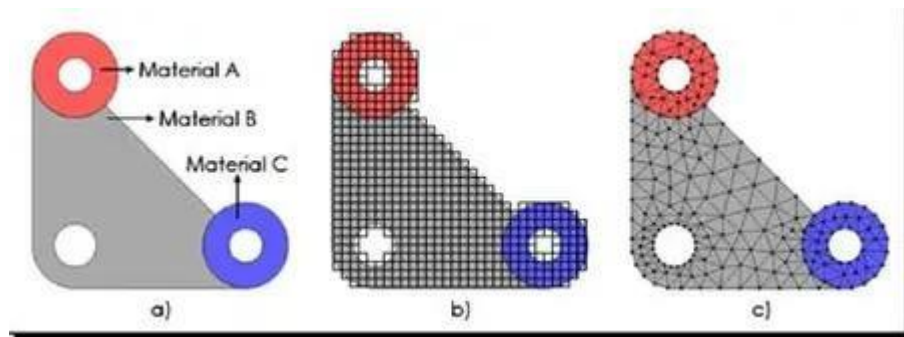


Figura 19: Ejemplo de discretización o malla

3.12 Tipos de elementos finitos

3.12.1 Elementos tipo Shell

Estos elementos son utilizados para el estudio de paneles o componentes estructurales de pared delgada, cuyo espesor es pequeño en relación con sus dimensiones generales (Cook et al., 2002; Logan, 2011).

En el proceso de mallado con elementos tipo *shell*, los programas de ingeniería asistida por computadora (CAE, Computer Aided Engineering) suelen trabajar a partir de superficies medias obtenidas de las distintas partes del modelo CAD (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2005).

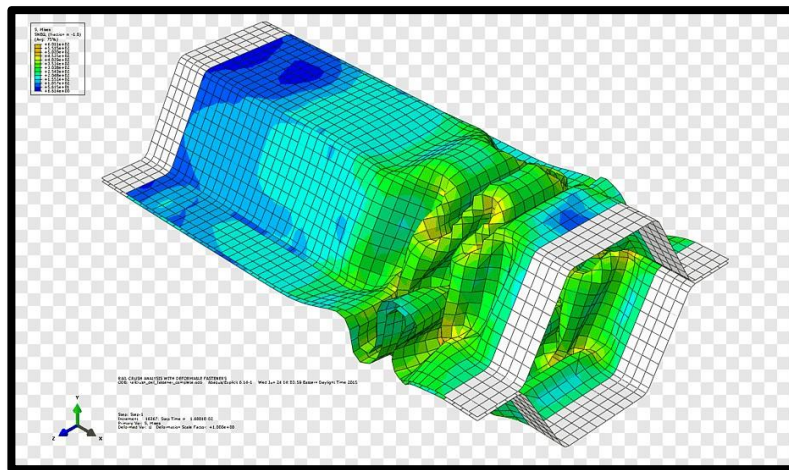


Figura 20: Ejemplo tipo Shell

3.12.2

3.12.3 Elementos tipo viga

Los elementos tipo viga son componentes estructurales cuya deformación ocurre principalmente en dirección perpendicular a su eje longitudinal (Logan, 2011).

Los esfuerzos que experimentan se calculan considerando parámetros geométricos como el área, la longitud y el momento de inercia, así como las propiedades mecánicas del material (Beer et al., 2015).

Cuando una viga presenta cambios en su sección transversal durante el análisis, es recomendable discretizarla en elementos finitos más pequeños, de modo que cada uno pueda asumirse con una sección constante (Cook et al., 2002).

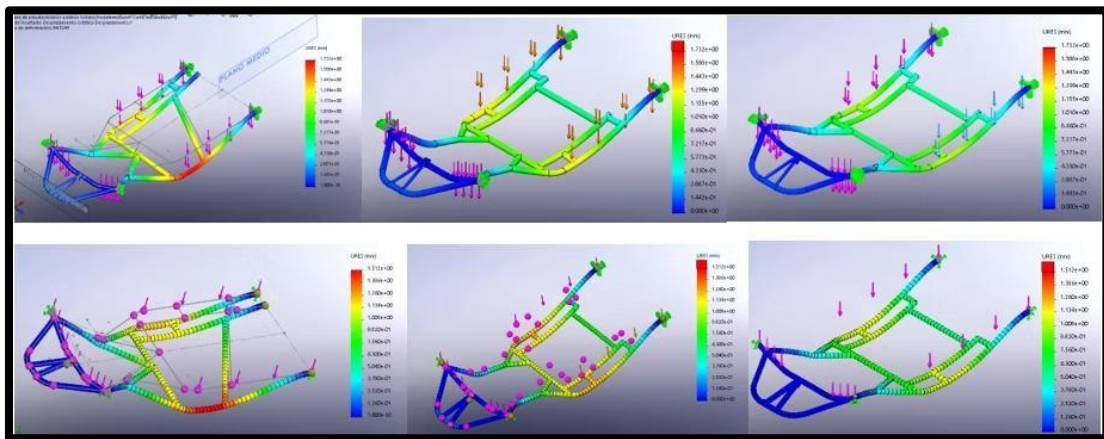


Figura 21: Ejemplo tipo viga

4 PROCEDIMIENTO

4.1 Recolección y análisis de información

4.1.1 Revisión de literatura técnica

Se realizó una revisión bibliográfica sobre vehículos eléctricos ligeros y triciclos en configuración delta, identificando criterios de estabilidad, distribución de cargas y dimensiones estructurales comunes. Esta revisión permitió comprender las limitaciones y ventajas de este tipo de vehículos en operación urbana.

4.1.2 Identificación de requisitos funcionales y contextuales

Se definió el contexto de uso del vehículo como el siguiente:

Transporte eléctrico urbano de dos personas con la capacidad de remolcar carga ligera. Se estableció una velocidad de operación máxima de hasta 60km/h y se consideró el uso del vehículo en superficies pavimentadas y condiciones estables.

4.1.3 Planteamiento de objetivos

Diseñar y construir un chasis tubular mediante software SolidWorks para el triciclo eléctrico. Esta estructura debe soportar las cargas producidas durante el funcionamiento, proporcionar seguridad al piloto y demás elementos del vehículo

4.2 Definición de requerimientos del diseño

4.2.1 Determinación de cargas principales

Se consideró un peso de usuario promedio de 70 a 80 kg por persona, con una distribución trasera predominante. Se añadió el peso estimado de baterías, motores, asientos y estructura, para determinar las cargas totales a soportar por el chasis, se muestra en la figura 23.

Componente	Masa (kg)
Conductor	80
Motor	12
Tren de fuerza	20
Sistema de dirección	10
Batería	60
Chasis	55
Total	237

Figura 22: Tabla de pesos

4.2.2 Geometría base del vehículo

Se estableció que el vehículo tendrá una postura baja para mantener el centro de gravedad cercano al suelo. Las tres ruedas serán de tamaño similar a las utilizadas en automóviles compactos, para garantizar estabilidad, disponibilidad comercial y soporte de carga.

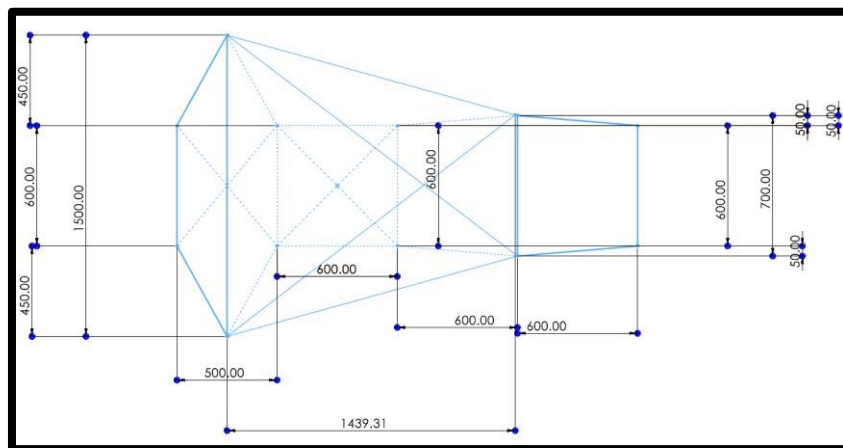


Figura 23: Croquis de estructura del chasis

4.2.3 Ubicación de componentes críticos

La batería se ubicará sobre la base central del chasis, con el objetivo de mantener un centro de gravedad bajo. Los motores hub se instalarán en las ruedas traseras, lo cual reduce la complejidad de la transmisión y distribuye el peso hacia la parte posterior del vehículo.

4.3 Selección de materiales y perfilería

4.3.1 Material estructural elegido

Se seleccionó tubería redonda de acero de perfilería comercial, debido a su adecuada relación entre costo, resistencia, facilidad de manufactura y disponibilidad en México.



Figura 24: Acero tubular

4.3.2 Justificación de elección

El acero tubular proporciona rigidez en torsión, algo crítico en triciclos delta, y permite soldaduras uniformes sin requerir procesos avanzados como los necesarios para aluminios de aleación alta. Se emplearán refuerzos diagonales en las zonas sometidas a mayor flexión como en el área del asiento y la unión frontal con la dirección.

4.4 Modelado tridimensional en software CAD

4.4.1 Modelado del croquis base

Se iniciará el modelado en SolidWorks trazando la geometría básica del chasis en 2D, considerando cotas reales de distancias entre ejes, ancho del soporte de ruedas traseras y altura del asiento.

Después de esto se levantará la estructura tridimensional, buscando una geometría con una estabilidad adecuada y considerando los fundamentos de geometría mencionados.

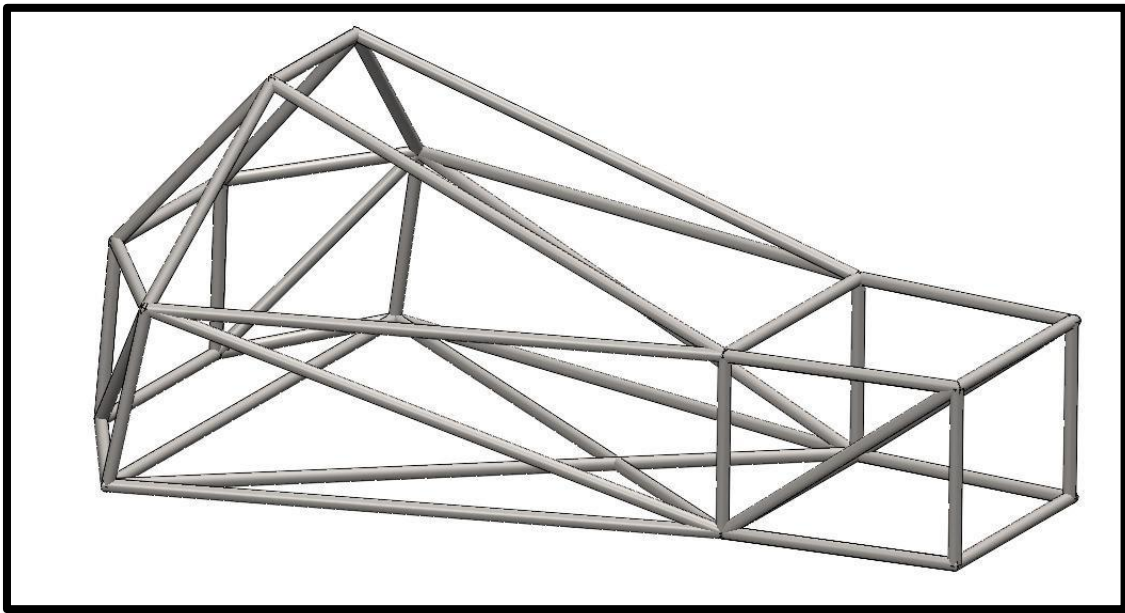


Figura 25: Primer modelo del chasis

4.4.2 Construcción de la estructura tubular

Con la herramienta Weldments se definirá el tamaño del perfil tubular seleccionado, aplicando cortes a inglete y uniones acorde con el ángulo de carga.

4.5 Análisis por elementos finitos (FEM)

4.5.1 Preparación del modelo para análisis

Con base al chasis realizado, se tomará su forma simplificada (Idónea para el análisis estructural) se definirán los puntos de carga y apoyos.

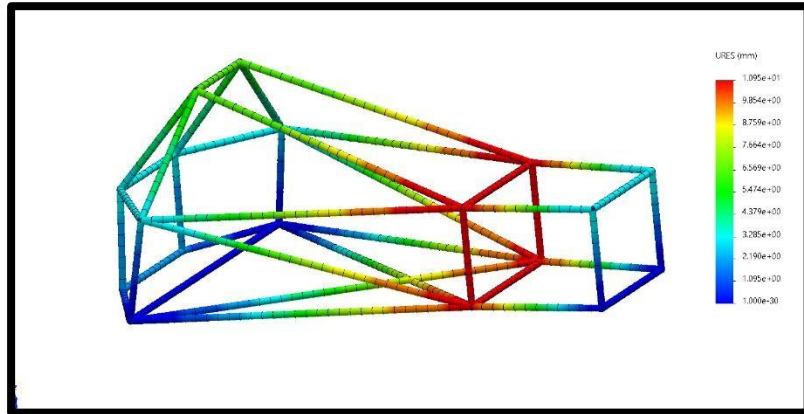


Figura 26: Análisis de elementos finitos

En los análisis estructurales CAE se emplean los siguientes tipos de elementos finitos: elementos tipo *beam* (viga) y elementos tipo *shell* (cascarón). Los elementos tipo *beam* se emplean en simulaciones rápidas en donde la distribución de esfuerzos se observa de forma global, mientras que en los elementos tipo *shell* muestran los resultados de forma puntual.

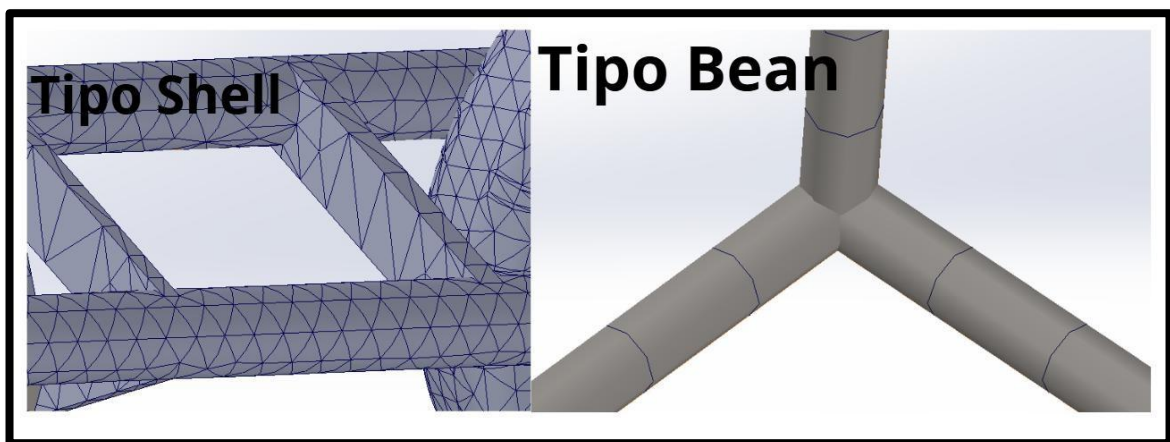


Figura 27: Comparativa de elementos finitos

El análisis se realiza aplicando elementos finitos tipo Shell los cuales generan una discretización o malla sobre una superficie delgada que carece de espesor, por lo cual es necesario generar superficies intermedias.

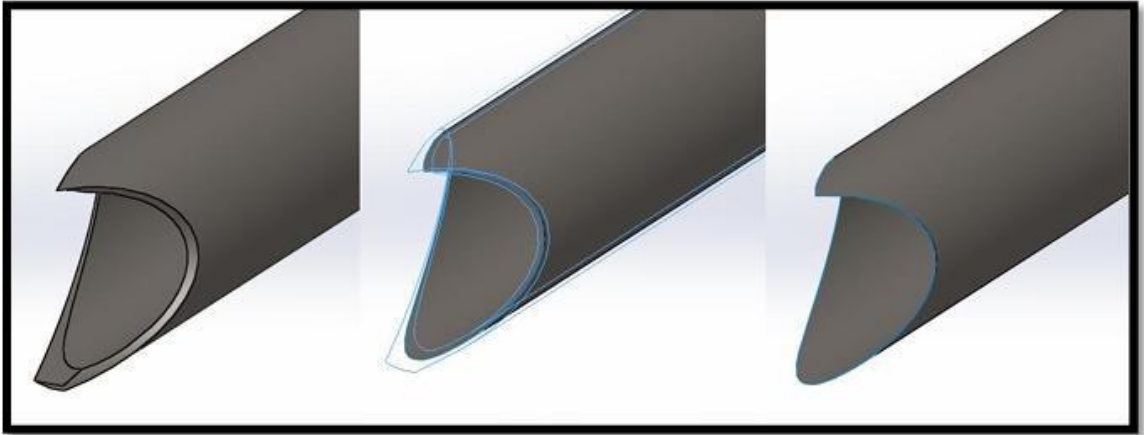


Figura 28: superficies intermedias de elementos finitos

Después de generar las superficies intermedias en todos los miembros de los elementos, se presenta un inconveniente donde no hay contacto por lo cual existen 2 soluciones a este problema, se puede extender las superficies hasta el siguiente elemento estructural o también se puede generar condiciones de contacto de bocas de pescado.

4.5.2 Densidad de mallado

La densidad de malla determina cuántos elementos y qué tan pequeños son los elementos en los que se divide el modelo para realizar los cálculos. Una de las principales razones por las que la densidad de malla es importante es que afecta directamente la precisión de los resultados.

Cuando la malla es demasiado gruesa, el modelo puede simplificar demasiado la geometría y las variaciones de esfuerzo o deformación, lo que puede provocar resultados poco exactos. En cambio, al utilizar una malla más fina, se puede captar con mayor detalle los cambios en esfuerzos, desplazamientos o deformaciones.

También es importante encontrar un **equilibrio adecuado**. Aunque una malla muy fina mejora la precisión, también incrementa el tiempo de cálculo y el uso de recursos computacionales. Por esta razón se crearán interacciones para buscar la menor fluctuación en los resultados.

4.5.3 Aplicación de cargas estáticas

Se aplicarán cargas equivalentes a:

- Peso de 2 ocupantes
- Peso de baterías
- Fuerzas de reacción a peso
- Fuerzas resultantes de frenado y giro suave

4.5.4 Interpretación de resultados y factor de seguridad

El análisis permitirá evaluar deformaciones, esfuerzos máximos y el factor de seguridad, el cual deberá ser mayor o igual a 2 para uso urbano.

4.6 Evaluación y ajuste del diseño

4.6.1 Comparación con hipótesis

Se verificará si el chasis diseñado resiste las cargas estáticas manteniendo estabilidad estructural.

Si el factor de seguridad es adecuado = Hipótesis confirmada.

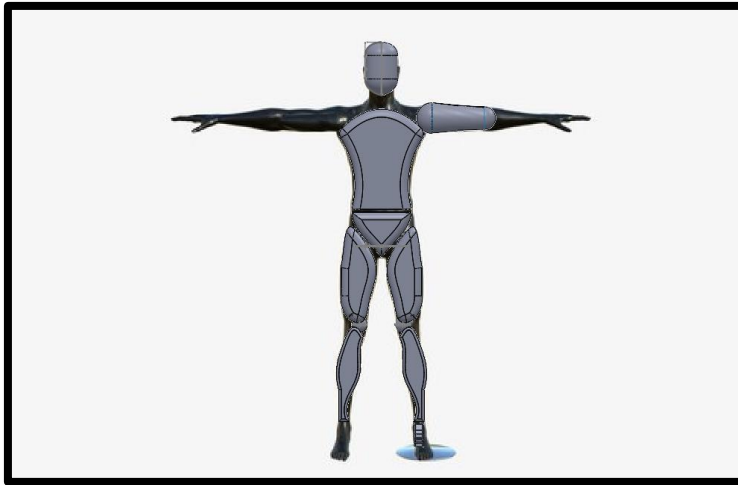
Si el factor de seguridad no es adecuado = Se modificarán espesores, refuerzos y/o geometría.

4.6.2 Presentación de propuesta final de diseño

Se documentará el modelo final, con planos e isometrías, para uso académico y posible manufactura

4.7 Posición de conducción del piloto

La posición del piloto se determina dependiendo el objetivo de la cabina, las dimensiones del torso del piloto fueron determinados por la altura de 1.85 m



Descripción	Dimensiones
Altura de pie	185 cm
Altura de Cadera	100 cm
Altura sentado	97 cm
Altura de hombros	64.5 cm
Ancho de hombros	50.5 cm
Ancho de caderas	40 cm
Longitud de brazo	71 cm
Longitud del pie	28 cm
Ancho del pie	11 cm

Figura 29: Creación de modelo humanoide

La posición de los pilotos se determinó dentro del centro de gravedad del vehículo para mantener la distribución de masas establecidas anteriormente en el vehículo

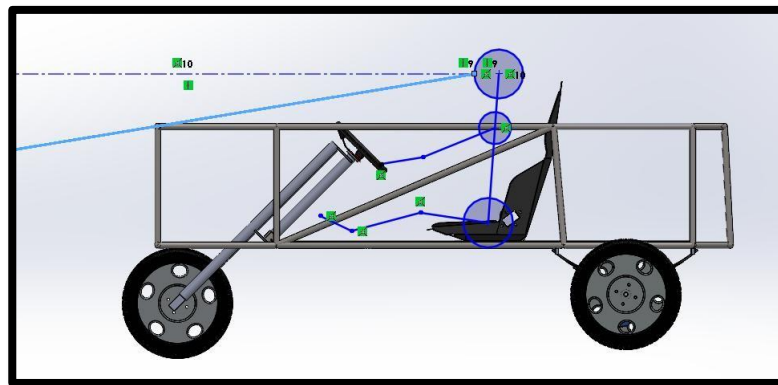


Figura 30: Posición del modelo humanoide

4.8 Geometría de la suspensión

Nuestro sistema de suspensión tratamos de diseñarlo junto con el chasis con el propósito de transferir las cargas al bastidor de forma concentrada en los nodos estructurales. Los puntos de anclaje de la suspensión los ubicamos a una distancia máxima de 20 cm respecto a dichos nodos.

La geometría de la suspensión participa activamente en el diseño del chasis, ya que define las dimensiones de las estructuras delantera y trasera.

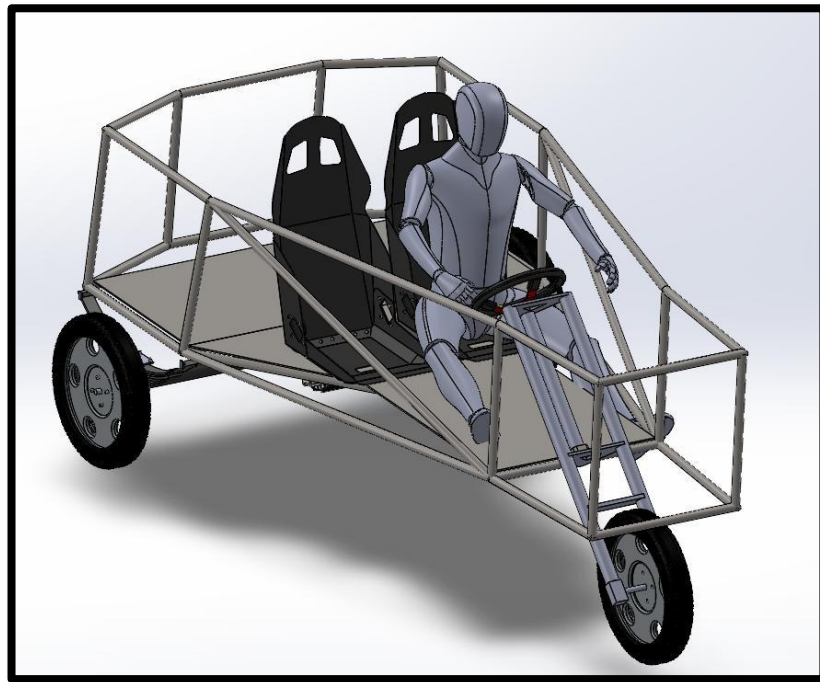


Figura 31: Modelo con humanoide

4.9 Restrukturación del chasis

Originalmente se consideraron distintos espacios de la estructura del chasis además se estableció el centro de gravedad mediante la distribución de masas, los puntos de anclaje del sistema de suspensión, además de la posición de conducción en conjunto con la ubicación del arco antivuelco.

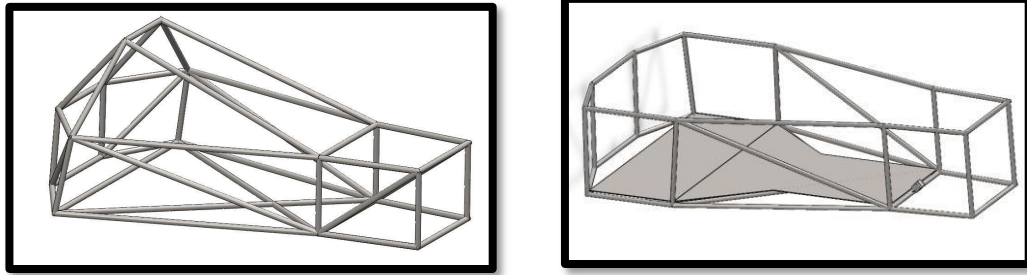


Figura 32: Cambio de chasis tubular

La estructura fue optimizada tomando en cuenta los siguientes criterios: facilidad de fabricación, peso y distribución de esfuerzos evaluados mediante el método de elementos finitos. La triangulación del chasis tiende a simplificarse conforme se mejora el diseño, logrando así una disminución del peso total.

4.10 Determinación de cargas

Procederemos a calcular las fuerzas resultado del desenvolvimiento en pista del vehículo como son: transferencia de masa lateral, transferencia de masa longitudinal y frenado

Transferencia de masa Lateral

Para analizar la estabilidad lateral del triciclo durante una maniobra de giro, se considera una aceleración lateral equivalente a 0.4G la cual actúa sobre el centro de gravedad cuya ubicación se propone con anterioridad.

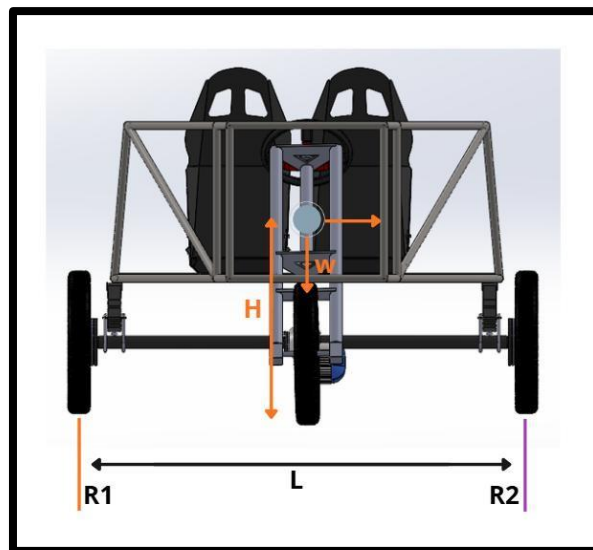


Figura 33: Transferencia de masa lateral

$$L = 1.74m$$

$$H = 0.75m$$

$$W = 237 \text{ kg} * 9.81/s = 2324.97N$$

$$F = m * 0.4g = 929.9N$$

$$/]W = (237 * 0.4g * 0.75) / 1.74 = 398.5N$$

$$R1 = 1162.5 + 199.25 = 1361.75N$$

$$R2 = 1162.5 - 199.25 = 963.25N$$

Transferencia de masa longitudinal y frenado

Para analizar el comportamiento dinámico del triciclo durante una maniobra de frenado, se considera la desaceleración generada al reducir la velocidad desde 60km/h hasta el reposo en solo 3 segundos.

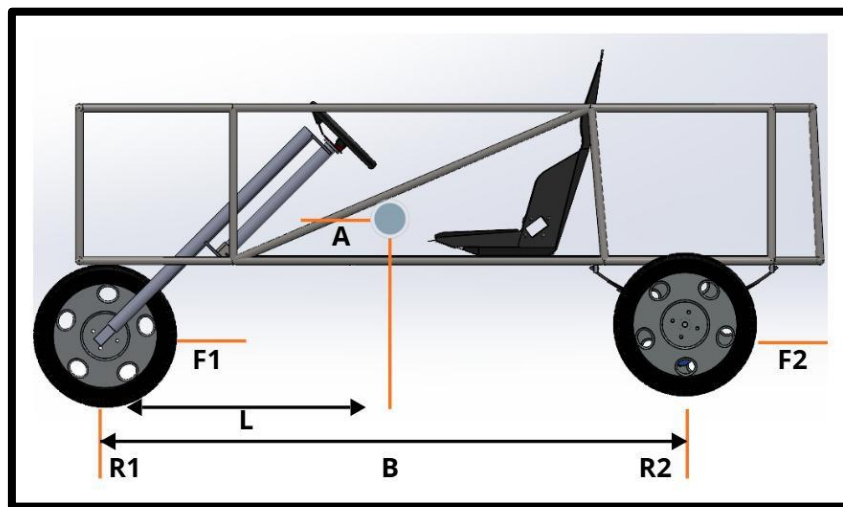


Figura 34: Transferencia de masa longitudinal

$$L= 1.13m$$

$$H= 0.75m$$

$$B= 2.26m$$

$$W= 237 \text{ kg} * 9.81/s = 2324.97N$$

$$Vo = 60 \text{ km/h} = 16.67m/s$$

$$V = 0$$

$$T = 3s$$

$$Cf = 0.57$$

$$F = 237 * 5.56 = 1317.7N$$

$$/J W = 1317.7 (0.75 / 2.26) = 437.2N$$

$$R1 = 1162.5 + (437.2/2) = 1382.2N$$

$$R2 = 1162.5 - (437.2/2) = 945N$$

La desaceleración del vehículo fue obtenida a partir de la reducción de velocidad de 60 km/h a reposo en un intervalo de 5.56m/s, equivalente a 0.57g.

Materiales

La elección del material es importante porque las simulaciones se basan en propiedades físicas y mecánicas reales para calcular el comportamiento de una pieza o estructura. Una correcta selección del material permite obtener resultados más realistas y confiables. Si se asigna un material incorrecto o con propiedades que no corresponden al material real de fabricación, los resultados del análisis pueden ser erróneos.

Para garantizar que el material cumpla con propiedades mecánicas específicas, se utilizan estándares de:

ASTM International

Define especificaciones para aceros estructurales y tubos mecánicos como:

- ASTM A500 (tubos estructurales)
- ASTM A513 (tubos mecánicos)
- ASTM A36 (acero estructural)

Análisis de rigidez torsional

La simulación se realiza aplicando un par torsional en el eje delantero y en sentido longitudinal al vehículo con una carga de 1000 N que actúa sobre los neumáticos del vehículo. Las cargas se aplican sobre los puntos de anclaje de la suspensión delantera y las sujeciones o restricciones del análisis se colocan en los puntos de anclaje del sistema de suspensión posterior. Los resultados de esfuerzo y deformación son los siguientes: 289 MPa y 2.3 mm como se indica en las figuras.

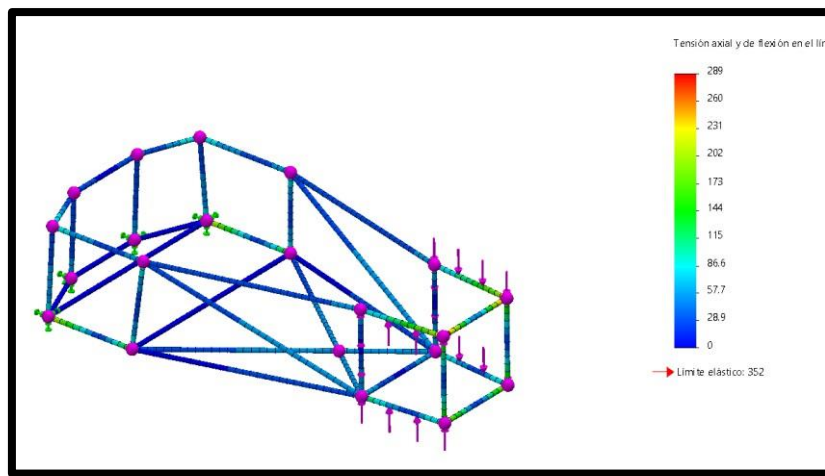


Figura 35: Resultados de esfuerzos

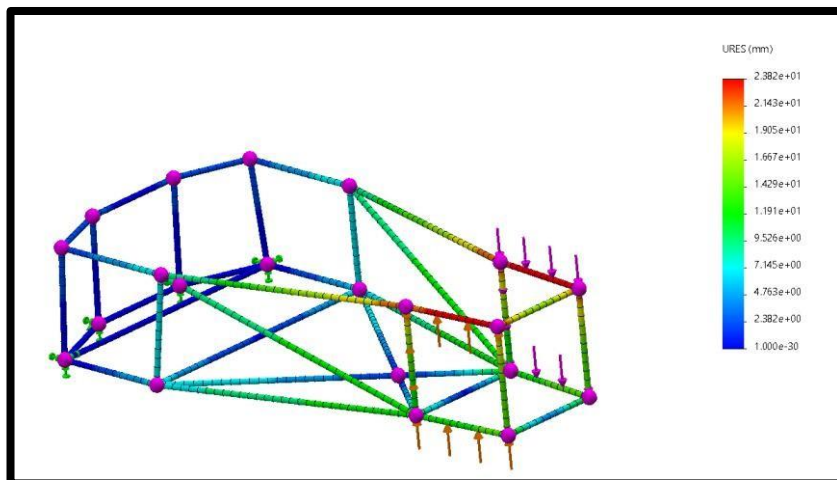


Figura 36: Resultados de Deformación

La rigidez torsional se define mediante la ecuación $K = T/\theta$ en donde θ es el ángulo de deformación máxima en el plano donde actúa el momento y T es el par torsional, el ángulo lo podemos definir por la ecuación $\theta = \tan^{-1} Y/X$

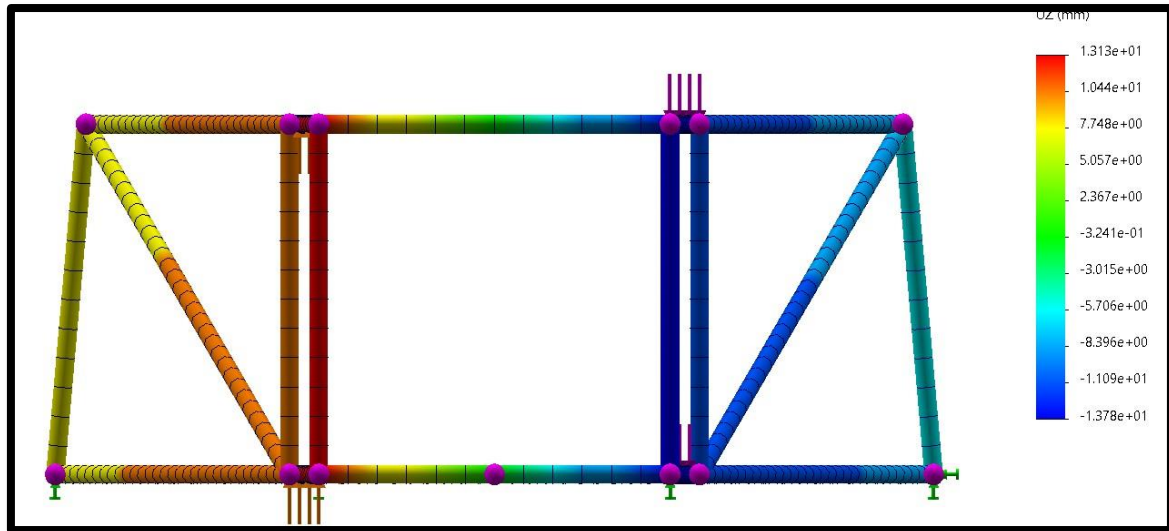


Figura 37: Distancia de Y

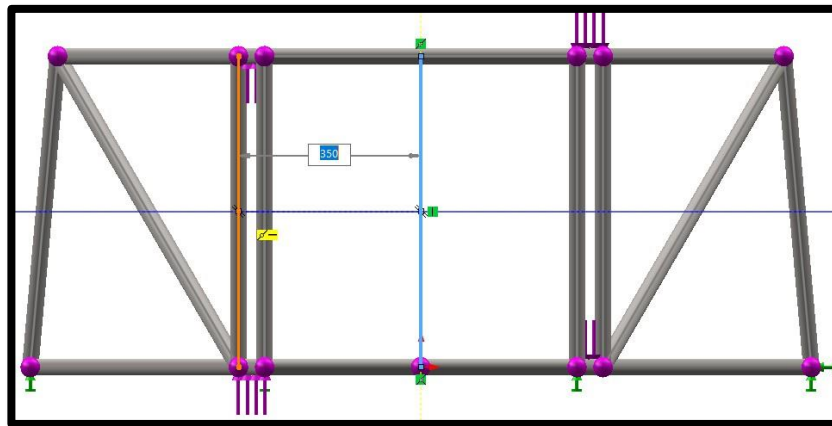


Figura 38: Distancia X

Al obtener los resultados de Y & X se procede a calcular el ángulo donde:

$$\theta = \tan^{-1} Y/X$$

$$\theta = \tan^{-1} 1.3/350$$

$$\theta = 0.2126 \text{ grados}$$

Una vez obtenido el ángulo de deformación se realiza el cálculo de rigidez torsional como se indica a continuación:

$$K = M/\theta$$

$$K = 696.75 \text{ Nm}/0.2126$$

$$K = 3277 \text{ grados}$$

Análisis de rigidez longitudinal

En este estudio se determina aplicando una carga vertical en los neumáticos la cual se genera durante el frenado con un valor de 1382 N. Esta carga y las restricciones de la estructura se aplican sobre los puntos de anclajes delanteros y posteriores del sistema de suspensión respectivamente. El valor máximo de esfuerzo y deformación alcanzados en la estructura son de 212MPa y 3.4mm.

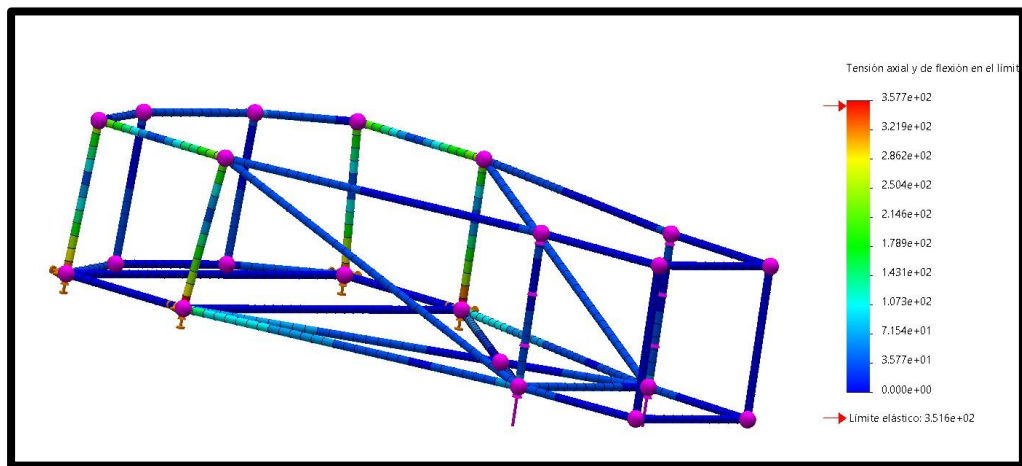


Figura 39: Resultados de esfuerzos

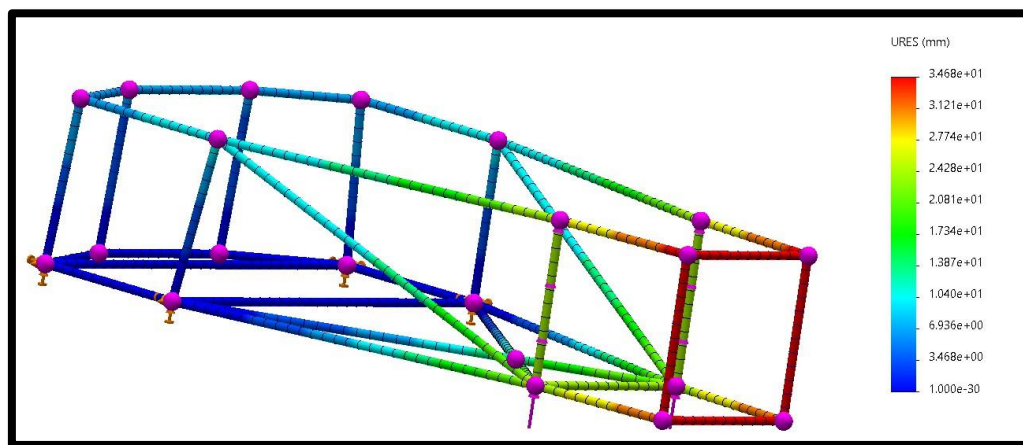


Figura 40: Resultados de deformaciones

Análisis de Frenado

En el desarrollo del análisis de frenado intervienen las cargas que actúan sobre la rueda delantera en sentido longitudinal al vehículo. Las cargas y las restricciones de la estructura se aplican sobre los puntos de anclaje delanteros y traseros del sistema de suspensión respectivamente; además, el valor de las fuerzas es de 1382 N en sentido vertical y 1317 N en sentido horizontal. Los resultados de los análisis se muestran en las siguientes figuras en donde se indican los valores de 424 MPa y 4,2mm.

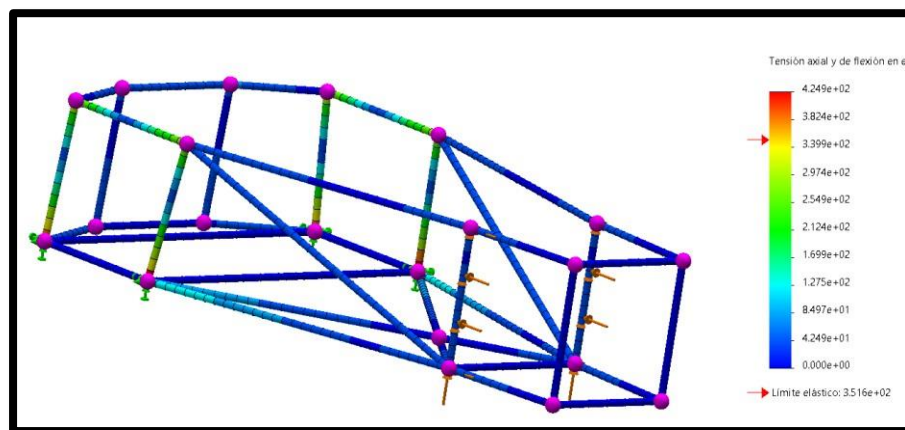


Figura 41: Resultados de esfuerzos

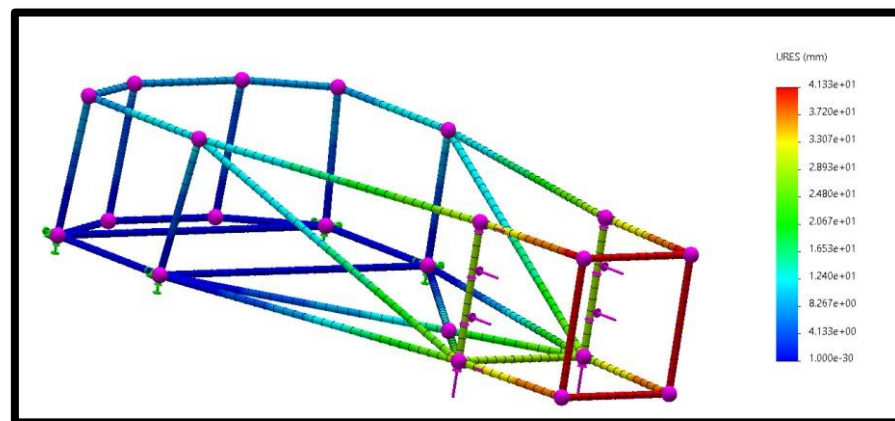


Figura 42: Resultados de deformación

5 RESULTADOS

5.1 Cargas aplicadas a las estructuras

Uno de los principales pasos durante el proceso de diseño es determinar los tipos de cargas que actúan sobre el chasis ya sea en estado dinámico o en reposo. El chasis se deforma de diversas maneras según la disposición de las cargas y la magnitud de estas. Las deformaciones comúnmente presentes en el vehículo son: torsión longitudinal, flexión lateral, flexión vertical y horizontal.

5.1.1 Análisis torsión longitudinal

El análisis de la carga longitudinal permitió evaluar la respuesta del triciclo ante esfuerzos generados durante la aceleración y el frenado. Los resultados obtenidos indican que la estructura soporta una torsión máxima de 212MPa, concentrándose principalmente en la sección frontal del chasis como se muestra en la figura 41.

Esta concentración de esfuerzos se debe a la configuración de tres ruedas del vehículo, donde una sola rueda delantera absorbe una proporción significativa de las cargas longitudinales. A pesar de esta condición, los valores obtenidos se mantienen dentro de los límites permisibles del material, garantizando la seguridad estructural bajo condiciones normales de operación.

5.1.2 Flexión lateral

El análisis de carga lateral se realizó con el fin de evaluar el comportamiento del triciclo ante fuerzas generadas durante maniobras de giro. Se observó que la estructura presenta una flexión máxima de 289MPa localizada principalmente en los elementos laterales frontales del chasis como se muestra la figura 37.

Debido a la geometría del triciclo, este tipo de carga representa un escenario crítico, ya que la estabilidad depende en gran medida de la distribución del peso entre las tres ruedas. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que la estructura mantiene su integridad, sin alcanzar niveles de deformación que comprometan su funcionamiento.

5.2 Simulación

Con el objetivo de validar los resultados analíticos, se realizaron simulaciones utilizando el software SolidWorks. Estas simulaciones permitieron visualizar la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura del triciclo bajo diferentes condiciones de carga.

Los resultados obtenidos en el entorno de simulación presentan una alta correlación con los cálculos teóricos, lo que respalda la confiabilidad del modelo desarrollado. Se identificaron zonas de mayor concentración de esfuerzos, principalmente en la parte frontal del chasis, sin que estas superen los límites permisibles del material.

5.3 Geometría del chasis

5.3.1 Dimensiones vista superior

Las dimensiones del chasis determinan las distancias entre las subestructuras principales y las diferentes medidas transversales a lo largo del chasis. Las dimensiones se pueden apreciar en la figura 44.

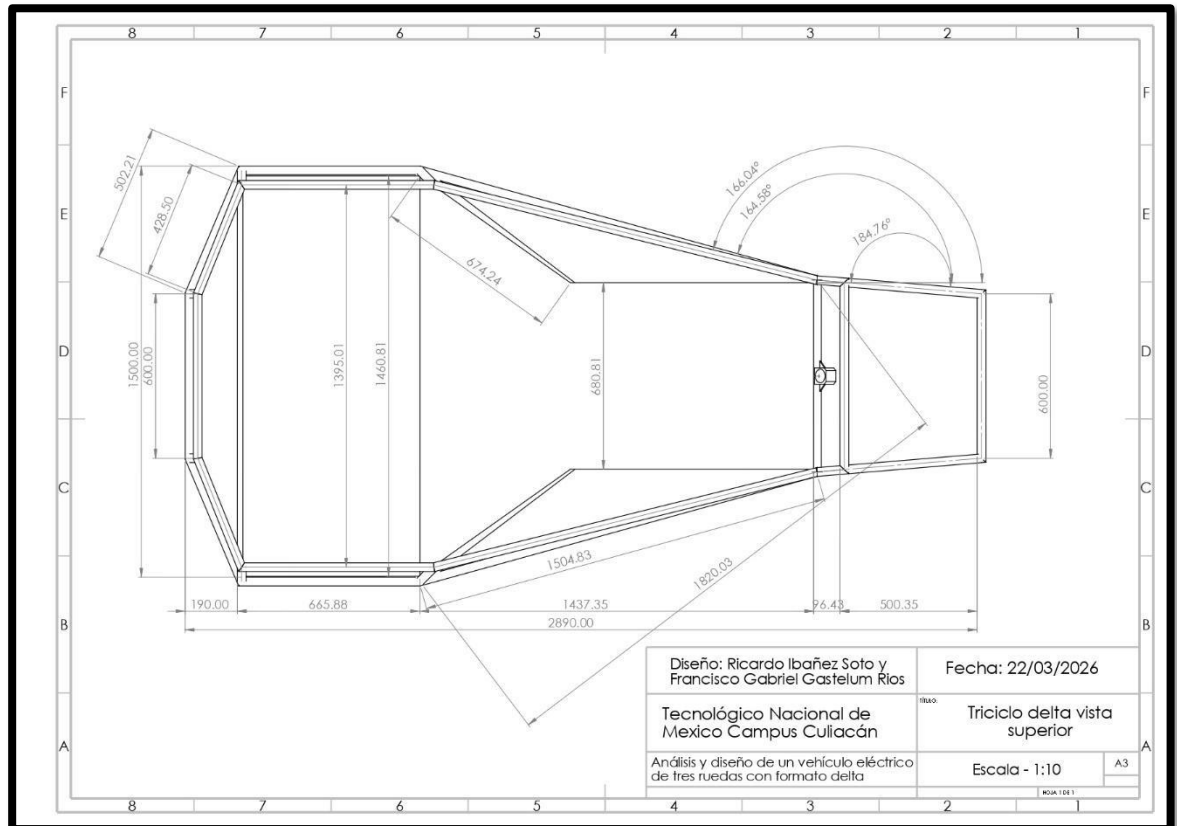


Figura 43: Dimensiones del chasis vista superior

5.3.2 Dimensiones vista lateral

Este plano comprende las alturas de los nodos principales. Las ubicaciones de dichos nodos determinan la disposición y longitud de cada miembro estructural se observan en la figura 45.

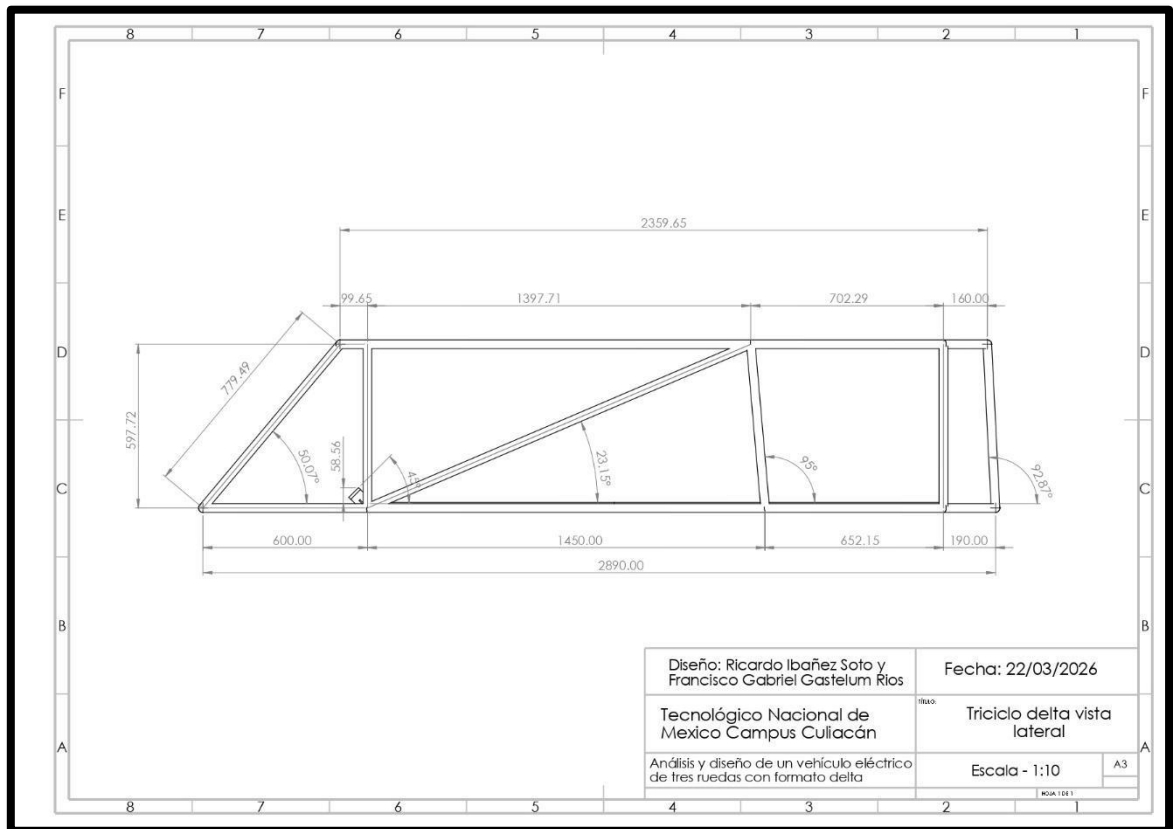


Figura 44: Dimensiones del chasis vista lateral

5.3.3 Dimensiones vista frontal

En este plano se identifica las dimensiones de la estructura desde su vista frontal. La distribución y longitud de cada miembro estructural se observan en la figura 46.

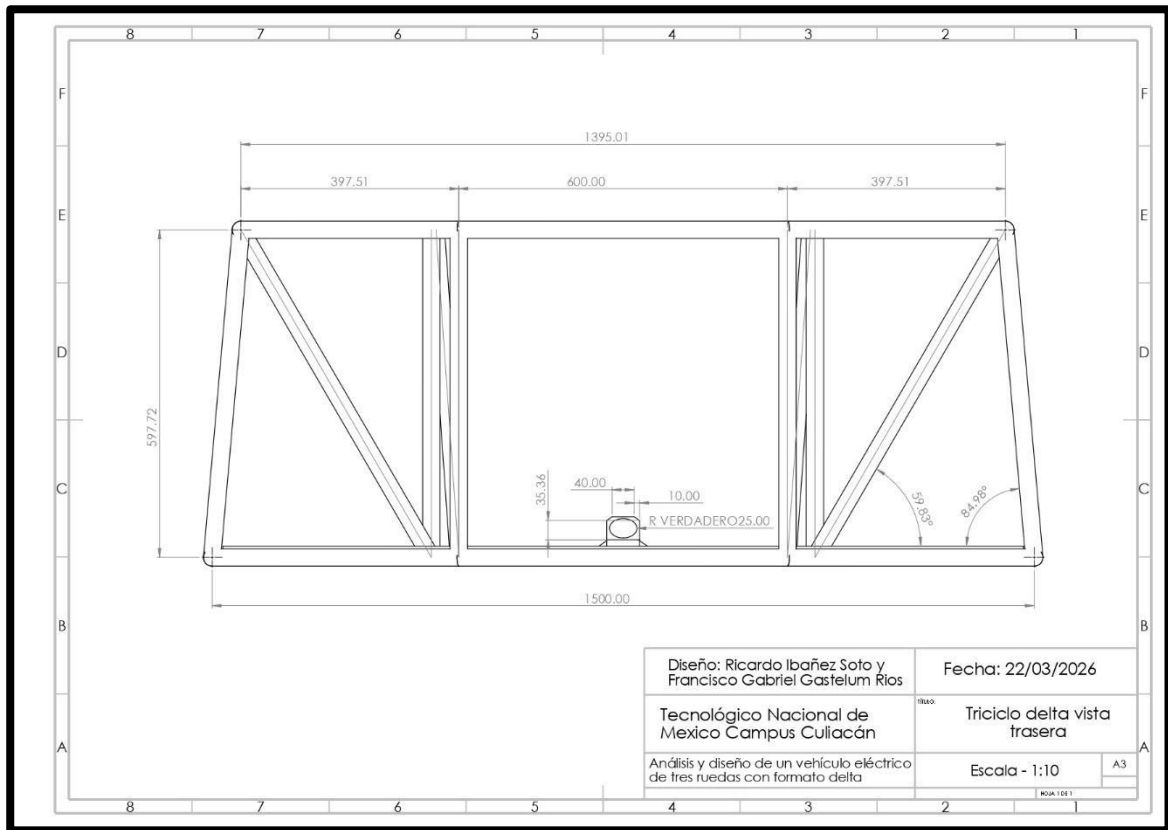


Figura 45: Dimensiones del chasis vista frontal

6 CONCLUSIONES

Ricardo Ibañez Soto:

En el desarrollo de la presente tesis, una de las principales tareas fue la creación del modelo tridimensional del vehículo, el cual permitió integrar de manera clara y estructurada los diferentes componentes que conforman el sistema. El uso de estos CAD facilitó la visualización, ajuste, validación geométrica de la estructura antes de cualquier posible proceso de fabricación.

A través de SolidWorks, fue posible definir con precisión la disposición de la perfilería tubular, así como la ubicación de los elementos estructurales que conformaron el chasis. Esto permitió desarrollar un diseño simétrico y funcional, optimizando la distribución de los componentes, considerando los aspectos importantes como el espacio para los pasajeros, el sistema de baterías y los elementos mecánicos del vehículo.

El diseño también nos permitió realizar modificaciones de forma eficaz durante el proceso de diseño, evaluando distintas configuraciones estructurales hasta obtener una propuesta que cumpliera con los criterios buscados, estos siendo de simplicidad constructiva, resistencia estructural y viabilidad de manufactura. De esta manera es bastante acertado concluir que el entorno CAD es una herramienta fundamental para el desarrollo iterativo del diseño.

Este modelo 3d también sirvió como base para la posterior realización de los análisis estructurales mediante el método de análisis de elementos finitos, permitiendo simular diferentes condiciones de carga y analizar el comportamiento del chasis tubular bajo escenarios representativos. Esto representa la importancia de modelar tridimensionalmente como etapa previa en procesos de análisis, validación estructural y diseño.

El trabajo realizado demuestra que el uso de herramientas modernas de diseño y simulación permite desarrollar propuestas de vehículos de forma eficiente, reduciendo y dejando la necesidad de pruebas físicas solamente para etapas más avanzadas de realización de un proyecto de diseño, facilitando la optimización desde etapas tempranas del proyecto.

Francisco Gabriel Gastelum Ríos:

En esta tesis tuvimos como objetivo principal el desarrollo del diseño de un triciclo en configuración delta. A partir de los resultados obtenidos, es posible afirmar que se logró cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados.

Se logró establecer un conjunto de parámetros geométricos y estructurales adecuados para un vehículo de uso urbano, considerando condiciones reales de operación, como el transporte de dos ocupantes, la presencia de baterías y componentes mecánicos, así como esfuerzos derivados de maniobras de frenado y giro. La selección de perfilera tubular comercial como material estructural demostró ser una decisión acertada, ya que ofrece una adecuada relación entre resistencia, peso, costo y disponibilidad en el contexto nacional.

El desarrollo del modelo permitió integrar todos los elementos estructurales bajo criterios de simetría, simplicidad y factibilidad de fabricación. A través del uso de herramientas de modelado como SolidWorks, se logró representar de manera precisa la estructura tubular del chasis, incluyendo refuerzos estratégicos en zonas críticas.

Gracias al método de elementos finitos, pudimos evaluar el comportamiento del chasis bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados obtenidos en los análisis de torsión longitudinal, flexión lateral y condiciones de frenado indican que la estructura es capaz de soportar los esfuerzos generados durante la operación urbana sin presentar deformaciones críticas. Los valores de esfuerzo máximo registrados 212 MPa en torsión, 289 MPa en flexión lateral y hasta 424 MPa en condiciones de frenado se mantienen dentro de los límites permisibles del material seleccionado, lo que confirma la viabilidad estructural del diseño.

Asimismo, las deformaciones obtenidas en las simulaciones se consideran aceptables dentro del comportamiento esperado para este tipo de estructuras, lo que indica que el chasis presenta una rigidez adecuada para su aplicación. La correlación observada entre los resultados teóricos y las simulaciones refuerza la confiabilidad del modelo desarrollado, validando el uso del análisis por elementos finitos como una herramienta eficaz en el proceso de diseño.

Con base en estos resultados, se puede confirmar que es viable la creación de un triciclo en configuración delta, utilizando perfilera comercial, capaz de resistir las cargas estáticas asociadas al funcionamiento del vehículo y mantener un factor de seguridad adecuado para su operación en condiciones urbanas. Esto representa una contribución importante, ya que demuestra la factibilidad de desarrollar vehículos de 3 ruedas con la capacidad de remplazar un vehículo de 4 ruedas.

No obstante, es importante reconocer las limitaciones del presente estudio. El análisis realizado se centra exclusivamente en cargas estáticas y condiciones ideales de operación, sin considerar efectos dinámicos más complejos como vibraciones, fatiga de materiales o impactos reales. Asimismo, el proyecto no contempla la construcción de un prototipo físico ni la validación experimental, lo que representa una oportunidad para trabajos futuros.

En cuanto a futuras líneas de investigación, se propone ampliar el alcance del proyecto hacia el diseño integral del vehículo, incluyendo sistemas eléctricos, electrónicos y de control. Asimismo, resulta de interés analizar el impacto de diferentes configuraciones geométricas en la estabilidad y desempeño del vehículo. Otra línea relevante sería la evaluación de la viabilidad económica y ambiental del diseño, considerando su implementación en contextos reales de movilidad urbana.

El documento cumple con los objetivos planteados, además que también aporta una base técnica sólida para el desarrollo de futuras soluciones en el ámbito de la movilidad eléctrica ligera, especialmente en contextos donde se busca optimizar recursos sin comprometer la seguridad y el desempeño estructural.

7 COMPETENCIAS DESARROLLADAS

Competencias actitudinales adquiridas:

El desarrollo del proyecto para tesis a lo largo de este tiempo contribuyó significativamente al fortalecimiento de habilidades intrapersonales, tales como la responsabilidad y la disciplina. Aunque este proyecto se llevó a cabo bajo la supervisión de un asesor, fue gestionado en gran medida por los estudiantes, lo que implicó el cumplimiento de metas a corto plazo y un acercamiento constante al objetivo final.

Para lograrlo, resultó fundamental poner en práctica habilidades de administración del tiempo, priorización de tareas y delegación de actividades cuando fue necesario. Este periodo representó una etapa de transición de estudiante a profesional, en la cual, si bien se permite el error como parte del aprendizaje, se enfatiza la importancia de dar siempre lo mejor de uno mismo y mantener una actitud de mejora continua.

Competencias procedimentales adquiridas:

El proyecto de Tesis constituye el ejercicio integrador más relevante en la carrera, ya que permite aplicar de manera práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica. De esta manera, los conceptos dejan de ser únicamente teóricos para incorporarse al quehacer profesional cotidiano. Asimismo, se fortalecen habilidades clave como la investigación y el pensamiento crítico, desarrolladas durante la trayectoria universitaria.

El desarrollo del proyecto implicó trabajar con conceptos que inicialmente no eran familiares; sin embargo, mediante la documentación constante y la práctica, se logró alcanzar un dominio funcional de los mismos.

8 FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Abreu, V. H., D'Agosto, M., Angelo, A. C., Marujo, L. G., & Carneiro, P. J. (2023). Action plan focused on electric mobility: A tool for assessment of the potential environmental benefits of urban mobility. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151310218>
2. Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
4. ASTM International. (2021a). *ASTM A500/A500M – Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes*.
5. ASTM International. (2021b). *ASTM A513 – Standard specification for electric-resistance-welded carbon and alloy steel mechanical tubing*.
6. Autodesk. (s.f.). *Fusion 360 Help*. <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ESP>
7. Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanics of materials* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
8. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
9. Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718.
10. Cognitive Market Research. (2024). *Electric tricycle market report*. <https://www.cognitivemarketresearch.com/electric-tricycle-market-report>

11. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons.
12. Directorio Automotriz. (2025). *Reporte trimestral de inversión automotriz en México*.
13. Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (3rd ed.). CRC Press.
14. Emergen Research. (2025). *Electric tricycles market report*.
<https://www.emergenresearch.com/industry-report/electric-tricycles-market>
15. E-Mobility Engineering. (2021). *EV skateboard platforms*.
<https://www.emobility-engineering.com/ev-skateboard-platforms/>
16. Ferros Planes. (2023, 28 de octubre). *El perfil tubular para la construcción*.
<https://ferrosplanes.com/perfil-tubular-construccion/>
17. Ferrosplan. (2023). *Perfil tubular: características y aplicaciones*.
<https://ferrosplan.com>
18. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International.
19. Gutiérrez, A. (2021). *Reliant Robin: un coche destinado al fracaso*. Memo Lira. <https://memolira.com/noticias/reliant-robin-un-coche-destinado-al-fracaso>
20. Hucho, W. H. (1998). *Aerodynamics of road vehicles: From fluid mechanics to vehicle engineering* (3rd ed.). SAE International.
21. International Energy Agency. (2019). *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>

22. International Energy Agency. (2023). *Global EV Outlook 2023*.
23. Krishna, P. (s.f.). *Transferencia de carga lateral delantera*. FormulaDen.
<https://www.formuladen.com/es/transferencia-de-carga-lateral-delantera-formula/Formula-32773>
24. Logan, D. L. (2011). *A first course in the finite element method* (5th ed.). Cengage Learning.
25. Market Research Forecast. (2024). *Electrically operated tricycles market report*. <https://www.marketresearchforecast.com/reports/electrically-operated-tricycles-128508>
26. Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race car vehicle dynamics*. SAE International.
27. Mora, D. F. (2018). *Método de elemento finito*. Universidad Nacional Autónoma de México.
https://virtual.cuautitlan.unam.mx/ingenieriafesc/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf
28. Nordsim. (2021). *FEA: análisis por elementos finitos*.
<https://nordsim.es/es/fea-analisis-por-elementos-finitos>
29. Ozcan, F., & Ersoy, S. (2021). Analysis of the vehicle: applying finite element method of 3D data. *Journal of Vibroengineering*.
30. Reliant Regal. (s.f.). https://en.wikipedia.org/wiki/Reliant_Regal
31. Reliant Robin. (s.f.). https://en.wikipedia.org/wiki/Reliant_Robin
32. Research and Markets. (2024). *Global electric three-wheeler market report*.
<https://www.globenewswire.com/news-release/2024/02/08/2826180/0/en/Global-Electric-Three-Wheeler-Market-Report-2023-2028-Industry-Driven-by-Sustainability-Urban-Mobility-Demands.html>

33. Santiago, E. (2020, 8 de octubre). *La suspensión independiente*.
<https://topmotor.com.ar/index.php/2020/10/11/la-suspension-independiente>
34. Secretaría de Economía. (2025). *Panorama de la industria automotriz en México*. Gobierno de México.
35. Shaheen, S., & Cohen, A. (2020). *Shared micromobility policy toolkit*. University of California Berkeley.
36. Shih, R. H. (2018). *Parametric modeling with SolidWorks*. SDC Publications.
37. Smith, C. (1978). *Tune to win*. Aero Publishers.
38. SolidWorks. (2022). *Meshing tips*.
https://help.solidworks.com/2022/spanish/solidworks/cworks/c_Meshing_Tips.htm
39. Torres, A. (2020). *Longitudinal vehicle dynamics*. ResearchGate.
40. Tricycle. (s.f.). *Wheel configurations*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tricycle>
41. Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5ª ed.). McGraw-Hill.
42. UNECE. (2019). *Vehicle category definitions and regulations for L-category vehicles*. United Nations Economic Commission for Europe.
43. WiseGuyReports. (2024). *Electric tricycles market size and forecast*.
<https://www.wiseguyreports.com/es/reports/electric-tricycles-market>
44. Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). John Wiley & Sons.
45. Wong, J. E. (2021). *Reliant Regal: el pequeño gladiador inglés*. Excelencias del Motor.
46. Yang, C., & Ke, J. (2014). Structural analysis of a tractor chassis via FEM. *Applied Mechanics and Materials*.

47. Zamzam, O. (2025). Structural analysis of an electric vehicle chassis using finite element analysis. *Journal of Engineering Advances and Technologies for Sustainable Applications*.
48. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (6th ed.). Elsevier.