



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

Carrera Ingeniería en Mecánica Automotriz

Diseño generativo del chasis de una moto eléctrica de trayecto urbano

Trabajo de Titulación previo, a la
obtención del Título de Ingeniero
Mecánico Automotriz

AUTOR:

Alexi Favian Jiménez Jiménez

DIRECTOR:

Ing. Diego Vinicio Díaz Sinche, Mg.Sc.

Loja - Ecuador

2023

Certificación.

Loja, 08 de septiembre de 2023

Ing. Diego Vinicio Díaz Sinche, Mg.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño generativo del chasis de una moto eléctrica de trayecto urbano**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecánico Automotriz**, de la autoría del estudiante **Alexi Favian Jiménez Jiménez**, con **cédula de identidad Nro. 1105600306**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Diego Vinicio Díaz Sinche, Mg.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría.

Yo, **Alexi Favian Jiménez Jiménez**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105600306

Fecha: 09 de noviembre del 2023

Correo electrónico: alexi.jimenez@unl.edu.ec

Teléfono: 0981550870

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo **Alexi favian Jiménez Jiménez** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño generativo del chasis de una moto eléctrica de trayecto urbano**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Mecánico Automotriz**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los nueve días del mes de noviembre del dos mil veintitrés.

Firma:

Autor: Alexi Favian Jiménez Jiménez

Cédula: 1105600306

Dirección: Loja (Víctor Emilio Valdivieso)

Correo electrónico: alexi.jimenez@unl.edu.ec

Teléfono: 0981550870

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo Titulación: Ing. Diego Vinicio Díaz Sinche, Mg.Sc.

Dedicatoria.

Quiero dedicar este Trabajo de Titulación a las personas más importantes en mi vida, con un cariño especial hacia mi familia en especial a mis padres, merecen un agradecimiento profundo, ya que su amor inquebrantable y sacrificio han sido pilares fundamentales en mi desarrollo académico. Mi hijo, quien ha sido una fuente constante de inspiración, ha iluminado mi camino hacia el logro con su ternura y alegría. Este trabajo es un testimonio de mi sincero agradecimiento por su invaluable contribución y apoyo.

Alexi Favian Jiménez Jiménez

Agradecimiento.

Primeramente, quiero agradecer a Dios por darme la gracia del conocimiento y la experiencia de vivir una carrera universitaria, en el transcurso de este arduo proceso de investigación y redacción, me he sentido profundamente agradecido por el apoyo y la inspiración que he recibido.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mi tutor de Trabajo de Titulación, Ing. Diego Vinicio Díaz Sinche, Mg. Sc, por su orientación y su dedicación incansable a lo largo de este proyecto. Su sabiduría y consejo fueron fundamentales para dar forma y mejorar esta investigación.

Quiero extender mi reconocimiento a mis amigos, quienes me brindaron apoyo emocional y motivación en cada paso del camino. Asimismo, agradezco a mis compañeros de clase y a todas las personas que participaron en este estudio, por su colaboración y contribuciones valiosas.

Finalmente, este trabajo no habría sido completo sin la ayuda de las numerosas fuentes de investigación que proporcionaron los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental en la culminación de este proyecto. Su apoyo y confianza en mí son un motor para seguir avanzando en mi camino académico y personal.

Alexi Favian Jiménez Jiménez

Índice de contenido.

Portada.....	i
Certificación.....	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenido.....	vii
Índice de tablas:	x
Índice de figura:	xi
Índice de anexos:	xv
Índice de símbolos	xvi
1. Título.....	1
2. Resumen.	2
Abstract.....	3
3. Introducción.....	3
4. Marco Teórico.....	9
4.1 Vehículos eléctricos de dos ruedas.....	9
4.2 Tipos de estructuras en motocicletas.....	9
4.2.1 Chasis simple de cuna cerrado.....	9
4.2.2 Chasis simple cuna abierto o interrumpido.....	10
4.2.3 Chasis de doble cuna.....	11
4.2.4 Chasis multitubulares.....	11
4.2.5 Chasis monocasco.....	12
4.2.6 Chasis Doble Viga Perimetral.....	13
4.2.7 Chasis Tipo Omega.....	13
4.3 Principios básicos de la dinámica de la motocicleta	14
4.3.1 Frenado y aceleración	14
4.3.2 Centro de gravedad	15
4.3.3 Determinación del centro de masa del vehículo	16
4.3.4 Geometría de la motocicleta	18

4.4	Cargas estáticas de la motocicleta	21
4.5	Diseño preliminar	21
4.5.1	Ergonomía.....	22
4.5.2	Dimensiones antropométricas	22
4.5.3	Herramientas computacionales	23
4.5.4	Aspectos de las propiedades mecánicas.....	24
4.5.5	Materiales más usuales en el empleo de estructuras de motocicletas	26
4.5.6	Acero.....	26
4.5.7	Aluminio	27
4.5.8	Titanio	27
4.5.9	Fibra de carbono	27
4.5.10	Propiedades de materiales empleadas en la fabricación del Chasis.....	28
4.5.11	Materiales locales.....	31
4.5.12	Método de los elementos finitos en las herramientas computacionales.....	36
4.6	Diseño generativo.....	53
4.7	Diseño conceptual	54
4.7.1	Fabricación de la estructura	55
4.7.2	Procesos plegados de tubo estructural	56
4.7.3	Acabados.....	61
5.	Metodología.....	67
5.1	Metodología y construcción del chasis de la motocicleta eléctrica.....	67
5.1.1	Análisis de la posición del conductor	68
5.2	Acciones dinámicas y estáticas del bastidor.....	69
5.2.1	Centro de gravedad	69
5.2.2	Diseño geométrico	72
5.2.3	Acciones estáticas	75
5.3	Selección del material	77
5.3.1	Etapas de selección.....	78
5.4	Elementos Finitos	85
5.4.1	ANSYS	100
5.4.2	ANSYS APDL	102

5.5	Validación del modelo.....	105
5.6	Fabricación del chasis estructural de una moto eléctrica.	106
5.6.1	Recubrimiento superficial.....	112
6.	Resultados.....	116
6.1	Resultados en ANSYS APDL Y WORKBENCH	123
7.	Discusión.....	127
8.	Conclusiones.....	129
9.	Recomendaciones y trabajos futuros.	130
10.	Bibliografía.....	131
11.	Anexos.....	137

Índice de tablas:

Tabla 1. Dimensiones antropométricas.....	23
Tabla 2. Propiedades de los Materiales más aptos en la fabricación de chasis de motos	28
Tabla 3. Clasificación de los materiales	29
Tabla 4. Características estructurales de la sección circular IPAC para la construcción.....	32
Tabla 5. Tipo de elementos	38
Tabla 6. Especificaciones generales de motocicletas.....	69
Tabla 7. Dimensiones obtenidas a partir de modelo establecido.....	71
Tabla 8. Parámetros para la geometría.....	74
Tabla 9. Tubo estructural redondo AISI 1015	83
Tabla 10. Parámetros para el análisis mediante el MEF	87
Tabla 11. Análisis Comparativo entre el Software Ansys APDL y Workbench	126

Índice de figura:

Figura 1. Chasis simple cuna abierto.....	10
Figura 2. Chasis simple cuna abierto.....	10
Figura 3. Chasis de tipo doble cuna.....	11
Figura 4. Chasis de tipo multitubulares	12
Figura 5. Chasis autoportante.....	12
Figura 6. Chasis de tipo doble viga perimetral	13
Figura 7. Chasis de tipo doble viga perimetral	14
Figura 8. Posición longitudinal	17
Figura 9. Medida de la altura del centro de gravedad.....	17
Figura 10. Geometría de la motocicleta.....	19
Figura 11. El trail	20
Figura 12. Dimensiones estructurales del cuerpo humana.....	22
Figura 13. La tecnología computacional	24
Figura 14. Procedimiento para la selección del material	33
Figura 15. Diagramas de Ashby.....	35
Figura 16. Malla de elementos finitos	37
Figura 17. Elemento de barra unidimensional	37
Figura 18. Matriz de rigidez método directo	39
Figura 19. Análisis de rigidez.....	39
Figura 20. Convención de signos	45
Figura 21. Grados de libertad en la viga.....	46
Figura 22. Deformación unitaria en la viga.....	47
Figura 23. Deformación en el eje y	48
Figura 24. Deformación mediante giros unitarios en la coordenada i.....	50
Figura 25. Deformación mediante giros unitarios en la coordenada j.....	51

Figura 26. Diseño generativo	54
Figura 27. Doblado de tubos	57
Figura 28. Doblado por estiramiento.....	58
Figura 29. Doblada a tracción	58
Figura 30. Doblado por comprensión.....	59
Figura 31. Doblado en prensa.....	59
Figura 32. Doblado a tres rodillos	60
Figura 33. Dobladora manual.....	61
Figura 34. Plegados hidráulicos	61
Figura 35. Acabados de recubrimiento.....	62
Figura 36. Pigmentos sólidos	63
Figura 37. Pigmentos metálicos	63
Figura 38. Pigmentos perlados	64
Figura 39. Recubrimiento de acabado monocapa.....	65
Figura 40. Recubrimiento de acabado bicapa.....	66
Figura 41. Recubrimiento de acabado tricapa	66
Figura 42. Metodología a emplear en el trabajo de la investigación.....	67
Figura 43. Presentación de las posiciones fundamentales del conductor	68
Figura 44. Centro de gravedad en la posición longitudinal	70
Figura 45. Altura del centro de gravedad	71
Figura 46. Acciones dinámicas de la geometría	75
Figura 47. Distribución de cargas y masas puntuales	76
Figura 48. Diagrama de flujo para la selección de materiales	78
Figura 49. Componentes estructurales.....	79
Figura 50. Tubos circulares	79
Figura 51. Optimización de la capacidad de resistencia de la deformación de materiales	81

Figura 52. Módulo de flexión entre la densidad	82
Figura 53. Módulo de cortadura entre la densidad	83
Figura 54. Parámetro de la estructura para el análisis de elemento finitos	86
Figura 55. Simulación CAE	94
Figura 56. Diagrama de flujo para el diseño generativo	96
Figura 57. Proceso de diseño generativo en ANSYS.....	97
Figura 58. Distribución de esfuerzos en el volumen del chasis	98
Figura 59. Resultados de diseño generativo	98
Figura 60. Diseño obtenido a partir de la optimización topológica	99
Figura 61. Condiciones de carga en la estructura del chasis	99
Figura 62. Modelo final de la estructura.....	100
Figura 63. Distintas formas de mallado.....	101
Figura 64. Geometría empleada en APDL	103
Figura 65. Extrucción mediante diferentes diámetros	103
Figura 66. Refinamiento de malla en Ansys APDL	105
Figura 67. Diagrama de flujo para la construcción del chasis	107
Figura 68. Proceso de corte	108
Figura 69. Proceso de doblado	109
Figura 70. Estructura de madera.....	109
Figura 71. Proceso de soldadura.....	110
Figura 72. Proceso de mecanizado en software	111
Figura 73. Proceso de mecanizado en fresadora.....	112
Figura 74. Pulido de la estructura.....	113
Figura 75. Aplicación del componente Wash Primer	114
Figura 76. Fondo para el chasis.....	114
Figura 77. Producto final de la estructura.....	115

Figura 78. Método de mallado tetraedro empleado en el volumen	116
Figura 79. Método de mallado hexaedro empleado en el volumen.....	117
Figura 80. Deformación total de la estructura	118
Figura 81. Esfuerzos equivalente de Von-Mises	118
Figura 82. Factor de seguridad.....	120
Figura 83. Número de iteraciones en el objetivo de convergencia	121
Figura 84. Número de iteraciones de convergencia en respuesta de la masa	122
Figura 85. Análisis de vibraciones	122
Figura 86. Deformaciones en ANSYS APDL	124
Figura 87. Deformación de ANSYS WORKBENCH	124
Figura 88. Esfuerzo de Von-Mises ANSYS APDL.....	125
Figura 89. Esfuerzos de Von-Mises en ANSYS WORKBENCH.....	125

Índice de anexos:

Anexo 1. Cálculos empleando el software Mathcad.....	137
Anexo 2. Piezas de la estructura del chasis	138
Anexo 3. Elaboración de plantilla de la parte frontal del chasis	138
Anexo 4. Elaboración de plantillas de la parte posterior del chasis	139
Anexo 5. Elaboración de plantillas de la parte inferior del chasis	139
Anexo 6. Elaboración de plantillas de componentes de soporte de la estructura	140
Anexo 7. Planos de componentes de sujeción de la motocicleta	140
Anexo 8. Planos del chasis vista isométrica	141
Anexo 9. Planos del chasis vista lateral.....	141
Anexo 10. Plano del chasis vista superior	142
Anexo 11. Ensamble de componentes en el chasis de la moto eléctrica	142
Anexo 12. Certificado de la traducción del abstract	143

Índice de símbolos

b = Distancia al centro de gravedad en el eje x

m_{rf} = Peso de la motocicleta de la rueda frontal

m_{total} = Masa total de la motocicleta

H = Altura de elevación de la moto

p = Distancia entre ejes

Z_{Gf} = Centro de gravedad en el eje Z

α = Ángulo de inclinación de la moto

m'_p = Masa frontal con la base frontal elevada

m_{rp} = masa de la rueda posterior

$r_{estático}$ = radio estático del neumático

d = Offset

a = Trail

a_n = Normal Trail

θ = Ángulo de avance

R_r = Radio de la rueda trasera

R_f = Radio de la rueda delantera

t_r = Radio de la sección transversal del neumático trasero

t_f = Radio de la sección transversal del neumático delantero

K = Matriz de rigidez

A = Grados de libertad

B = Son las fuerzas externas para el análisis de la estructura

L = Longitud de la Viga

σ = Esfuerzo

ε = Deformación unitaria

E = Módulo de elasticidad

F = Fuerza

A = Área

ΔL = Variación de la longitud

LT = Longitud total de la Viga

K = Rigidez del elemento

μ = Deformación

δ = deformación axial

w = velocidad angular

v = velocidad

r = radio

f = frecuencia

U = es el vector de desplazamiento global

F = es el vector de fuerza

K = es la matriz de rigidez global

u_e = son el vector de desplazamiento de elementos

X_e = Matriz de rigidez elemental

N = es el número de elementos utilizados para discretizar el dominio de diseño

P = es la potencia de penalización

$V(x)$ = es el volumen del material a la densidad elemental requerida

V_0 = el volumen del dominio de diseño

m = es la fracción de volumen

K_0 = matriz de rigidez global

1. Título

Diseño generativo del chasis de una moto eléctrica de trayecto urbano

2. Resumen.

En este estudio se presenta un enfoque innovador que utiliza el diseño generativo para optimizar el chasis de una motocicleta eléctrica diseñada específicamente para trayectos urbanos. El diseño generativo se define como un proceso que emplea algoritmos computacionales con el propósito de explorar una amplia gama de soluciones de diseño, teniendo en cuenta restricciones y objetivos específicos. El objetivo principal de este diseño consiste en maximizar la eficiencia estructural y mejorar el rendimiento dinámico de la motocicleta eléctrica. Para lograrlo, se utiliza un software de diseño generativo que se apoya en algoritmos avanzados basados en inteligencia artificial y optimización topológica. El proceso se inicia definiendo las restricciones del diseño, tales como las cargas aplicadas, las condiciones de manejo y las especificaciones de los componentes eléctricos. A partir de estos parámetros, el software genera automáticamente una amplia variedad de diseños de chasis, explorando diversas formas, estructuras y distribuciones de material. Posteriormente, se lleva a cabo una evaluación de rendimiento para cada diseño generado, utilizando simulaciones de elementos finitos. Se analizan características como la rigidez, la resistencia a la fatiga y la respuesta dinámica. Con base en estos resultados, se seleccionan los diseños más prometedores para su refinamiento y optimización. Esto conduce a un chasis optimizado en términos de peso, rigidez y distribución de carga, lo cual mejora la eficiencia energética y el rendimiento dinámico de la motocicleta eléctrica.

***Palabras Clave:** Diseño generativo, optimización topológica, funciones de maximización, funciones de minimización, chasis moto eléctrica.*

Abstract.

This study presents an innovative approach using generative design to optimize the chassis of an electric motorcycle designed specifically for urban commuting. Generative design is defined as a process that employs computational algorithms for the purpose of exploring a wide range of design solutions, taking into account specific constraints and objectives. The main objective of this design is to maximize the structural efficiency and improve the dynamic performance of the electric motorcycle. To achieve this, a generative design software is used that relies on advanced algorithms based on artificial intelligence and topological optimization. The process starts by defining the design constraints, such as applied loads, handling conditions and electrical component specifications. From these parameters, the software automatically generates a wide variety of chassis designs, exploring various shapes, structures and material distributions. A performance evaluation is then carried out for each generated design using finite element simulations. Characteristics such as stiffness, fatigue strength and dynamic response are analyzed. Based on these results, the most promising designs are selected for refinement and optimization. This leads to an optimized chassis in terms of weight, stiffness and load distribution, which improves the energy efficiency and dynamic performance of the electric motorcycle.

***Keywords:** Generative design, topological optimization,, maximization functions, minimization functions, electric motorcycle chassis.*

3. Introducción.

En los últimos años se presenta un acelerado crecimiento de los vehículos dependientes de combustibles fósiles, esto conlleva problemas relacionados con la contaminación de la

calidad del aire y repercusiones en la salud (Kudale et al., 2022). En los últimos 5 años se tiene 753 837 vehículos de dos ruedas con motores a gasolina, para el mismo periodo los vehículos de propulsión eléctrica corresponden a 522. Según informes de AEADE, (2022) indica una caída del 11.2% en la comercialización de motos eléctricas a nivel de Ecuador para el año 2022 en relación al periodo 2020. Por otro lado, las motocicletas a gasolina presentaron un incremento del 10% para el periodo 2022. El instituto nacional de estadísticas y censos (INEC) de la zona 7, registra 64 338 motocicletas con dependencia de combustibles convencionales. En el ámbito de investigación centrado en la provincia de Loja, durante el periodo correspondiente a 2021, se ha registrado un total de 13,970 motocicletas con motorización a gasolina que han sido matriculadas. Según los datos estadísticos presentados, se proyecta un incremento del 15.17% en comparación con el periodo del año precedente, (INEC, 2021).

Los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) durante los últimos meses del año 2023 señalan que la calidad del aire en la ciudad de Loja cumple con valores dentro de los límites aceptables en lo que respecta a la concentración de varios contaminantes atmosféricos. Los niveles registrados son los siguientes: para el monóxido de carbono (CO) se encuentra en 366 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), el dióxido de azufre (SO₂) se sitúa en 1,572 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el dióxido de nitrógeno (NO₂) se registra en 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el material particulado con un tamaño promedio de 2.5 micras (MP2.5) presenta una concentración de 6.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ICA, 2023). Los altos niveles de contaminación de aire pueden causar daños significativos a la salud, asociados con la quema de combustibles fósiles. Aunque los datos establecidos no representan riesgo a la contaminación atmosférica, se debe preveer y precautelar la calidad del aire, con la propuesta de sistemas de transporte sostenible.

En el estudio de Fonseca Herreo et al., (2019) asociado a las emisiones contaminantes que generan las motocicletas de combustión interna con una cilindrada menor a 250 cc en la ciudad de Ocaña, Colombia, ha identificado que las emisiones de CO son de 3569 kg, los compuestos orgánicos volátiles (COV) 860 kg, emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de 129 kg, y 12.9 kg de MP2.5, obteniendo 4571 kg/día de agentes contaminantes asociado con alto índice de contaminación. Todo ello contribuye a la degradación del medio ambiente por efectos de la huella de carbono y emisiones contaminantes emanadas por fuentes móviles terrestres. Las soluciones actuales se orientan a la implementación de una movilidad sostenible, donde el

vehículo eléctrico tiene un gran interés. Andersen et al., (2009) argumenta que los vehículos ligeros de propulsión eléctrica reducen en un 20% las emisiones contaminantes relacionados con los gases de efecto invernadero (GEI) y pueden alcanzar hasta un 40%, si la electricidad proviene de energías renovables. Incentivos económicos y energéticos de gobierno, cada vez hacen más atractiva la implementación de vehículos eléctricos, así como el desarrollo de infraestructuras de carga con un énfasis especial en ciudades metropolitanas, disminuyendo los niveles de ruido y emisiones contaminantes (Nayak et al., 2023), (Habibie & Sutopo, 2020), (Shital et al., 2019).

Ecuador dispone de tres variantes de combustibles denominadas como Extra, Súper y Eco-país, donde la calidad está sujeta a la norma NTE INEN 2204, (2017). Durante el transcurso del año 2021, se ha observado un incremento en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de aproximadamente 7,108 megatoneladas, lo cual representa un aumento del 20,89% en relación al año 2020. Las emisiones de CO₂ correspondientes al año 2021 se estiman en 41,141 megatoneladas, lo que sitúa a Ecuador en el puesto 124 dentro del ranking de países según sus niveles de emisiones de CO₂. Este ranking engloba a un total de 184 naciones, ordenadas de manera ascendente en función de sus niveles de contaminación (Dominica, 2021). Por el tipo de orografía en Ecuador según AEADE, (2022), se evidencia un crecimiento acelerado del 53% en motocicletas de segmento utilitario, donde destaca con una mayor presencia el fabricante Shineray, la cual corresponde a la categoría motocicletas de acuerdo con la norma RTE INEN 136.

La contaminación vehicular se configura como uno de los principales desafíos que impacta en la salud y bienestar de las personas. Entre los principales contaminantes provenientes del sector automotriz, específicamente de los vehículos con motor de combustión interna (MCI), se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de carbono (CO₂) y los hidrocarburos (HC). Estos compuestos contribuyen significativamente a la contaminación ambiental, representando el CO₂ un 77%, los NO_x un 8% y los HC un 14% del total, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), los gases expulsados por los vehículos con motor de combustión se identifican como la principal causa de la contaminación atmosférica. Estos gases tienen un impacto directo en el sistema cardiovascular y pulmonar, incrementando el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares

y cerebrovasculares (Alarcón, 2018). Ante ello la posibilidad del desarrollo de transportes alternativos menos dependientes de combustibles fósiles, son cada vez más estudiados.

El presente estudio se centra en el análisis de la estructura primaria de soporte de un vehículo, denominada chasis o bastidor, cuya función principal radica en la capacidad de resistir cargas tanto estáticas como dinámicas que surgen durante su operación. El diseño del chasis se revela como un factor determinante para alcanzar un óptimo rendimiento de la motocicleta, garantizando así una experiencia de conducción ergonómica, una dirección precisa y segura. De esta manera, el chasis se erige como un componente esencial que influye de manera significativa en la experiencia global de manejo de la motocicleta (Khan et al., 2022), (Ahmad & Dorlikar, 2021), (Palanivendhan et al., 2020). A pesar de los continuos avances tecnológicos he innovaciones, los vehículos eléctricos de dos ruedas todavía tienen limitaciones que deben superarse para mejorar su rendimiento general. La principal área de preocupación se centra en el tamaño y peso de los sistemas y componentes del vehículo, ya que estos factores afectan directamente su alcance, velocidad, capacidad de carga y autonomía, por esta razón se debe enfocar las investigaciones en criterios de optimización y rendimiento de los vehículos eléctricos, con un énfasis especial en las motocicletas eléctricas (Rege et al., 2017), (Arnob et al., 2022).

Es evidente que un problema de optimización requiere considerar un gran número de datos para encontrar la mejor configuración posible. Sin embargo, debido al gran número de variables y sus posibles combinaciones, el número de casos que deben ser analizados se vuelve demasiado grande para ser manejado de manera práctica, esto incluye un coste computacional y de cálculo elevado. Por lo tanto, para optimizar el diseño, es esencial utilizar algoritmos de búsqueda automática que permitan encontrar soluciones viables de manera más eficiente (Scappaticci et al., 2017).

La distinción entre el chasis de una motocicleta convencional y una motocicleta eléctrica reside fundamentalmente en el sistema de propulsión empleado. La motocicleta convencional incorpora motores de combustión interna, lo que implica un incremento en su peso total, dado que el sistema de propulsión se integra plenamente en la estructura del chasis. Por otro lado, en el caso de la motocicleta eléctrica, se emplean motores eléctricos y acumuladores de energía, en los cuales los componentes propulsores no se integran en la estructura del bastidor,

principalmente por consideraciones de seguridad (Jelani et al., 2019). Por tal razón el diseño estructural que se pretende estudiar, debe tener la capacidad de brindar protección adicional a estos elementos.

En consecuencia, este trabajo de titulación presenta un diseño generativo del chasis estructural de una moto eléctrica, utilizando un software comercial de Elementos Finitos (FE), para evaluar propiedades mecánicas en función de las solicitaciones de trabajo que se transmiten por el contacto de la rueda y calzada, así como la optimización de la cantidad de masa que se puede reducir para mejorar la autonomía del vehículo (Jelani et al., 2019).

En el estudio realizado por Singh Thakur et al., (2020) se presenta una propuesta para desarrollar dos prototipos con el propósito de actualizar una motocicleta convencional y convertirla en una motocicleta de propulsión eléctrica. Esta propuesta se enfoca en la evaluación de dos diseños distintos: uno que minimice las pérdidas en la transmisión de potencia y otro que se caracterice por un chasis con un centro de masa bajo. Además, se explora una combinación de elementos de enrejado y un diseño de chasis tipo Cuna Doble. Sin embargo, las soluciones propuestas carecen de un análisis del comportamiento dinámico para la definición de las solicitaciones de trabajo.

En su estudio de Rege et al., (2017) plantea un diseño y análisis de chasis para una moto eléctrica que considera la resistencia, seguridad y rendimiento óptimo del vehículo. En el primer paso, modela el bastidor en el software SolidWorks teniendo en cuenta consideraciones estructurales y ergonómicas, y se determinan las cargas que actúan sobre él. En el segundo paso se analiza las tensiones con el software Altair Hypermesh y se realiza modificaciones de diseño para reducir el peso sin afectar la resistencia estructural, enfocándose en los puntos más críticos del montaje de la batería. Aunque, el estudio fija una geometría inicial que supone que cumpla con los criterios de diseño, más aún no se considera parámetros dinámicos para las solicitaciones de carga y un diseño generativo de la estructura.

Jeyapandiarajan et al., (2018) evalúa el bastidor de un vehículo alrededor de sus puntos de suspensión delanteros, considerando las fuerzas que actúan sobre él, incluyendo el peso del conductor, la batería, el motor y la aceleración. Utiliza el software de análisis ANSYS, comparando la resistencia, el factor de seguridad y la deformación de diferentes materiales para determinar el más adecuado en términos de resistencia, costo y peso. A pesar de tener el estudio

como objetivo final el garantizar un diseño estructuralmente estable, se cree que se podría mejorar estas condiciones estableciendo masas puntuales y cargas distribuidas sobre el elemento estructural, esto se puede lograr con una consideración de nodos en los puntos de aplicación de la carga.

Para el diseño y la optimización de motocicletas eléctricas, establece las condiciones dinámicas y estáticas con el fin de influir en el rendimiento y comportamiento de estos vehículos, esto garantiza la seguridad y el rendimiento integral de una motocicleta eléctrica, para ello se debe implementar una metodología sólida que establezca las condiciones de fabricación. Específicamente, el diseño y la producción del chasis estructural representan etapas cruciales en el proceso de construcción, que abarca desde la parte inicial del diseño hasta llegar a la fabricación del chasis, empleando los materiales adecuados y las técnicas de ensamblaje pertinentes.

Para lograr la construcción exitosa de este tipo de vehículos, se torna fundamental determinar cuáles serán los parámetros de la geometría del chasis bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas. Asimismo, se plantea la interrogante sobre la metodología adecuada que se debe seguir con el propósito de concretar la construcción de un prototipo de bastidor de moto eléctrica destinado a la movilidad sostenible.

4. Marco Teórico.

4.1 Vehículos eléctricos de dos ruedas.

El tipo de vehículo en este campo se atribuye a la moto eléctrica, el cual para su desplazamiento precisa de propulsión eléctrica, el sistema incluye: un motor eléctrico (Motor de rueda HUB y el Motor central), acumuladores (Plomo-ácido y Iones de litio), y como parte de recuperación de suministro de energía se emplea (SafPow 42V/2A, Tangsfire 42V/2A, YZPower 54.6V/4A, STIO 54.6V/2A, Vemote USB 6.8A, Tailg 72V/4A) las cuales se pueden cargar en enchufes convencionales como los del hogar o en puntos de carga destinados, en un tiempo de carga que suele tardar de 4 a 8 horas, ofreciendo una gran fiabilidad al momento de su utilización dentro de la ciudad (Vogel, 2009).

4.2 Tipos de estructuras en motocicletas

En el ámbito de los vehículos de dos ruedas, se pueden identificar varios tipos de chasis, los cuales presentan formas específicas y se diseñan de acuerdo con su uso previsto, asegurando parámetros técnicos y mecánicos de rigidez y masa. Desde los chasis de tipo "cuna" hasta los "multitubulares", existe una amplia gama de opciones disponibles, cada una de las cuales se adapta a las diversas prestaciones requeridas en el contexto de la motocicleta. Entre las variantes más comunes se incluyen las siguientes:

Las motocicletas eléctricas y las de gasolina se distinguen notablemente en sus diseños de chasis. Las motocicletas eléctricas tienden a utilizar materiales avanzados, como la fibra de carbono, en la fabricación de cuadros ligeros. Por otro lado, las motocicletas de gasolina emplean estructuras convencionales de acero o aluminio, diseñadas específicamente para soportar la carga del motor, mejorando así la estabilidad y el manejo del vehículo (Pabón, 2020).

4.2.1 Chasis simple de cuna cerrado

El chasis de simple cuna cerrado se caracteriza por la disposición de perfiles en un plano vertical único que se extiende desde la cabeza de dirección hasta la zona correspondiente al basculante, como se puede apreciar en la Figura 1. Específicamente, se evidencia la presencia de un solo tubo que desciende desde la columna de dirección y forma una estructura en forma de cuna al pasar por debajo del motor. Esta estructura presenta una continuidad de perfil desde la cabeza de dirección hasta la región del basculante. En la actualidad, los modelos de

motocicletas que adopta este tipo de chasis han experimentado una disminución significativa en su producción y se encuentran prácticamente en desuso (Arias Paz, 2003).

Figura 1.

Chasis simple cuna abierto



Nota. El gráfico representa el tipo de chasis de simple cuna cerrado, continuo desde la cabeza de dirección hasta la zona del basculante, Reproducida de (Casajús, 2012).

4.2.2 Chasis simple cuna abierto o interrumpido

Este chasis se caracteriza por una particularidad que posee en su perfil, ubicada en la parte inferior, donde el motor desempeña el papel fundamental de completar y cerrar esta sección como se observa en la Figura 2. Estos chasis son conocidos por su atractivo coste económico y se encuentran ampliamente difundidos en motocicletas de cilindrada más pequeñas, además de ser una elección común en la mayoría de las motocicletas de tipo Trail (Casajús, 2012).

Figura 2

Chasis simple cuna abierto



Nota. la figura muestra la integración del motor como componente clave del chasis, mejorando su rigidez de forma considerable. Reproducida de (Casajús, 2012).

4.2.3 Chasis de doble cuna

El chasis de doble cuna consta de dos tubos que descienden desde el cabezal de dirección y atraviesa la parte inferior del motor, formando una estructura de cuna que rodea lateralmente el cárter del motor y llega al punto de anclaje del basculante de manera independiente. Estos chasis son más rígidos que los de simple cuna, ya que proporcionan una estructura más sólida como se ilustra en la Figura 3. En muchos casos, la cuna de chasis se sujeta con tornillos para facilitar el desmontaje, lo que simplifica la instalación del motor (Arias Paz, 2003).

Figura 3

Chasis de tipo doble cuna



Nota. Este tipo de chasis es una elección frecuente en motocicletas tipo Custom y ha sido tradicionalmente característico en vehículo de altas cilindradas. Reproducida de (Casajús, 2012).

4.2.4 Chasis multitubulares

Este sistema estructural se encuentra configurado mediante la incorporación de dos vigas ubicadas en ambos lados del grupo motriz, estableciendo una conexión entre el componente de dirección y al eje del basculante. Estas vigas presentan secciones transversales de forma circular y se fabrican a partir de una aleación de acero con cromo y molibdeno, otorgando de esta manera una notable robustez al chasis como se observa en la Figura 4. En términos generales, estos elementos tubulares se diseñan con la finalidad exclusiva de funcionar en situaciones de tracción o compresión adicionalmente el motor se utiliza como componente estructural (Arias Paz, 2003).

Figura 4

Chasis de tipo multitubulares



Nota. El gráfico representa el chasis de tipo tubular utilizado en la construcción de motos de material de acero al carbono, Reproducida de (Casajús, 2012).

4.2.5 Chasis monocasco

Este tipo de chasis, denominado monocasco autoportante, se constituye mediante chapa estampada y desempeña una doble función: sirve como soporte y a la vez como estructura de la carrocería como se ilustra en la Figura 5. Si bien esta técnica es predominante en el diseño de automóviles y se conoce como “carrocerías autoportantes”, es poco común en otros modelos de motocicletas, a excepción de ciertas motos deportivas como la Kawasaki. En estos vehículos de dos ruedas, el chasis se fabrica en aleación de aluminio y también forma parte de la caja de admisión (Arias Paz, 2003).

Figura 5

Chasis autoportante



Nota. El gráfico representa el tipo de chasis autoportante, Reproducida de (Casajús, 2012)

4.2.6 Chasis Doble Viga Perimetral

Este tipo de chasis es extremadamente empleado en motocicletas de corte deportivo. La configuración estructural de este chasis se define por la presencia de dos vigas de notable sección, dispuestas simétricamente a ambos lados del motor, las cuales se extienden desde el cabezal de dirección hasta la región del eje del basculante como se muestra en la Figura 6. Estas vigas envuelven el motor en su parte superior y suelen ser confeccionadas principalmente con aleaciones de aluminio. Además, incorporan soportes destinados a la sujeción del motor y, en ocasiones presentan aberturas en las vigas para facilitar el flujo de aire hacia el sistema de admisión (Arias Paz, 2003).

Figura 6

Chasis de tipo doble viga perimetral



Nota. En el gráfico se evidencia que el cabezal de dirección y la región de anclaje del basculante experimentan mayores esfuerzos, lo que conduce a su fabricación habitual mediante fundición, Reproducida de (Casajús, 2012).

4.2.7 Chasis Tipo Omega

Este tipo de chasis se caracteriza por la presentar de una horquilla delantera con una forma similar a la de un basculante, como se muestra en la Figura 7. Esta disposición habilita la maniobrabilidad y ajuste de dirección mediante la utilización de elementos tubulares destinados a brindar sustento al conjunto de dirección. A pesar de su aplicación reducida, este chasis se

encuentra presente en modelos particulares de motocicletas, como la Yamaha GTS (Arias Paz, 2003).

Figura 7

Chasis de tipo doble viga perimetral



Nota. El gráfico muestra un chasis Omega que utiliza estructuras tubulares entramadas para respaldar el conjunto de dirección, Reproducida de (Casajús, 2012).

4.3 Principios básicos de la dinámica de la motocicleta

Como punto de partida para el estudio destinado a comprender las demandas operativas de un vehículo de dos ruedas, se considera esencial la comprensión de su dinámica longitudinal, que resulta de la interacción de diversas fuerzas a las que se encuentra expuesto este tipo de vehículo. Se otorga una relevancia significativa a la configuración geométrica del vehículo, ya que esta influye directamente en su comportamiento y estabilidad durante su funcionamiento. Se han evaluado situaciones críticas, como las fuerzas de frenado y aceleración, que representan condiciones particularmente desafiantes para la motocicleta durante su operación (Pérez Villanueva, 2019).

4.3.1 Frenado y aceleración

El análisis de frenado y aceleración se consideran las partes más críticas en el estudio de la distribución de pesos en la motocicleta, abordándolos desde una perspectiva estática.

Cuando se ejecuta una maniobra de frenado en una motocicleta, se induce una modificación en la distribución de las cargas. En otras palabras, durante una frenada brusca, la totalidad de la masa del vehículo se desplaza hacia la rueda delantera, lo que ocasiona una redistribución de la tracción en la rueda trasera. Para esto, se tiene en cuenta la posición del

centro de gravedad, cuyo objetivo es optimizar la distribución de las cargas para mantener un equilibrio adecuado (Pérez Villanueva, 2019).

La transferencia de carga durante la aceleración en las motocicletas presenta similitudes con otros vehículos motorizados, ya que involucra los mismos parámetros que se consideran en el proceso de frenado. Sin embargo, la diferencia principal reside en que, en lugar de evaluar la altura del centro de gravedad, se debe determinar o seleccionar su posición horizontal. Es decir, si se desplaza el centro de gravedad hacia atrás con respecto al plano horizontal, se incrementará significativamente la carga en la rueda trasera en comparación con la rueda delantera, lo que resultará en el levantamiento de la rueda delantera. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta la ubicación equitativa del centro de gravedad con respecto a ambos ejes (Foale, 2002).

La distribución de carga durante la frenada de motocicletas para carreteras generalmente se divide en un 70% de peso en la rueda delantera y un 30% en la rueda trasera. Estos porcentajes pueden variar dependiendo del modelo específico de la motocicleta (Díez Berja, 2020).

4.3.2 Centro de gravedad

Conforme a las investigaciones de Foale (2006), el aumento de la altura del centro de gravedad en una motocicleta conlleva una transferencia de carga, incluso en frenadas a baja velocidad la rueda trasera puede separarse del suelo debido a factores como la adherencia de los neumáticos y la geometría de la motocicleta. Es fundamental destacar que cuando el centro de gravedad supera el 55% de la distancia entre ejes, la transferencia de carga puede ser perjudicial para el conductor, comprometiendo la estabilidad. En esta situación, la rueda trasera no contribuye de manera efectiva al proceso de frenado, generando una carga desequilibrada en la rueda delantera. Por otro lado, mantener el centro de gravedad por debajo del 45% de la distancia entre ejes permite que una parte de la carga repose en la rueda trasera.

La asignación de la carga sobre las dos ruedas en situaciones de inmovilidad se caracteriza por presentar diferencias notables dependiendo del tipo de motocicleta. En el contexto de las motocicletas de competición, es común observar una mayor carga en la rueda delantera, con porcentajes oscilando entre el 50 y el 57%, mientras que la rueda trasera soporta una carga menor, situada en el rango del 43 al 50%. Por otro lado, en el caso de las motocicletas de turismo o deportivas, la distribución de la carga se revierte, siendo predominante en la rueda trasera, con valores que se sitúan en el rango del 50 al 57%, mientras que la rueda delantera

asume una proporción más reducida, oscilando entre el 43 y el 50% consideradas para nuestro estudio debido a su diseño, geometría, posición del conductor, carga y frenado. Esto puede contribuir a su estabilidad, tracción y control en diferentes situaciones de conducción (Cossalter, 2006).

La ubicación del centro de gravedad de una motocicleta ejerce un impacto sustancial en el comportamiento dinámico de la motocicleta. La posición de dicho centro se encuentra determinada por la distribución y magnitud de las masas de los componentes individuales que conforman la estructura del vehículo de dos ruedas especificadas en las ecuaciones (1) y (3) (Pérez Villanueva, 2019).

4.3.3 Determinación del centro de masa del vehículo

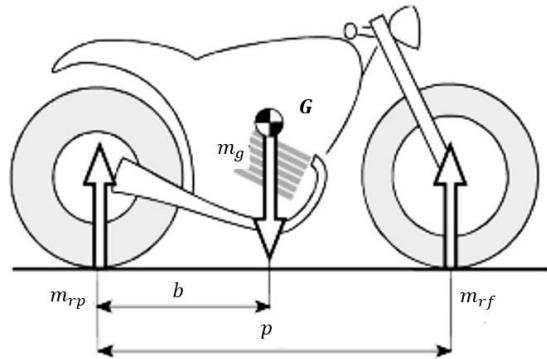
La ubicación del centro de gravedad (CG) de vehículos de carretera según la norma ISO 10392, (2011), presenta un método para determinar las coordenadas del CG en el plano horizontal, junto con dos enfoques para calcular su altura sobre el suelo. Los dos métodos más comunes para esta medición son la elevación del eje y el péndulo estable.

La dinámica lateral de una motocicleta se ve influida por factores claves, como la dirección lateral y la ubicación del centro de gravedad. Esta dinámica determina la habilidad de la motocicleta para girar mientras se mantiene estable. La altura del centro de gravedad es especialmente crítica; cuando se sitúa demasiado alta, la motocicleta se inclina con mayor facilidad y corre el riesgo de perder el equilibrio al tomar curvas. Además, la geometría de la dirección, el tamaño de los neumáticos, la rigidez del chasis y el peso total del vehículo son otros factores que ejercen una influencia significativa en la dirección lateral de la motocicleta. Todos estos aspectos desempeñan un papel crucial en la capacidad de la motocicleta para maniobrar de manera segura y efectiva en diversas situaciones de conducción.

La medida de la distancia longitudinal b cómo se manifiesta en la Figura 8, que se extiende desde el punto de contacto de la rueda trasera hasta el centro de gravedad, se puede obtener de manera conveniente a través de la medición de la masa completa de la motocicleta y las fuerzas ejercidas sobre la rueda cuando se encuentran en un estado estático, considerando tanto la carga frontal (m_{rf}) como la carga trasera (m_{rp}) (Cossalter, 2006).

Figura 8

Posición longitudinal



Nota. En la presente figura se ilustra el procedimiento para calcular el centro de gravedad en la parte horizontal del vehículo de dos ruedas. Reproducida de (Cossalter, 2006)

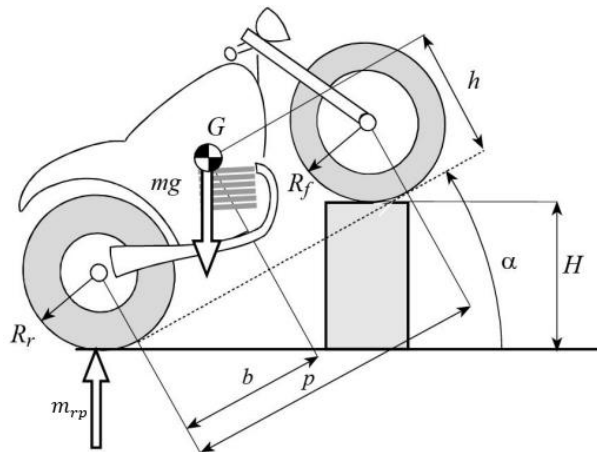
La distancia horizontal entre el centro del eje delantero y el eje centro de gravedad puede ser definida mediante la siguiente Ecuación (1).

$$b = \frac{m_{rf} \cdot p}{m_{total}} \quad (1)$$

La altura del centro de gravedad influye significativamente en el comportamiento dinámico de una motocicleta, particularmente durante las etapas de aceleración y frenado por la elevada transferencia de carga, como se ilustra en la Figura 9.

Figura 9

Medida de la altura del centro de gravedad



Nota. La altura óptima del centro de gravedad está condicionada por el coeficiente de tracción y frenado entre el neumático y la superficie de la carretera. Reproducida de (Cossalter, 2006)

Para determinar la altura del centro de gravedad, se requiere considerar la elevación de la motocicleta con el propósito de derivar el ángulo de inclinación, tal como se describe en la ecuación (2). A partir de dicha ecuación, es posible obtener los parámetros necesarios para el cálculo del centro de gravedad en la altura de la motocicleta, como se expone en la ecuación (3).

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{H}{p}\right) \quad (2)$$

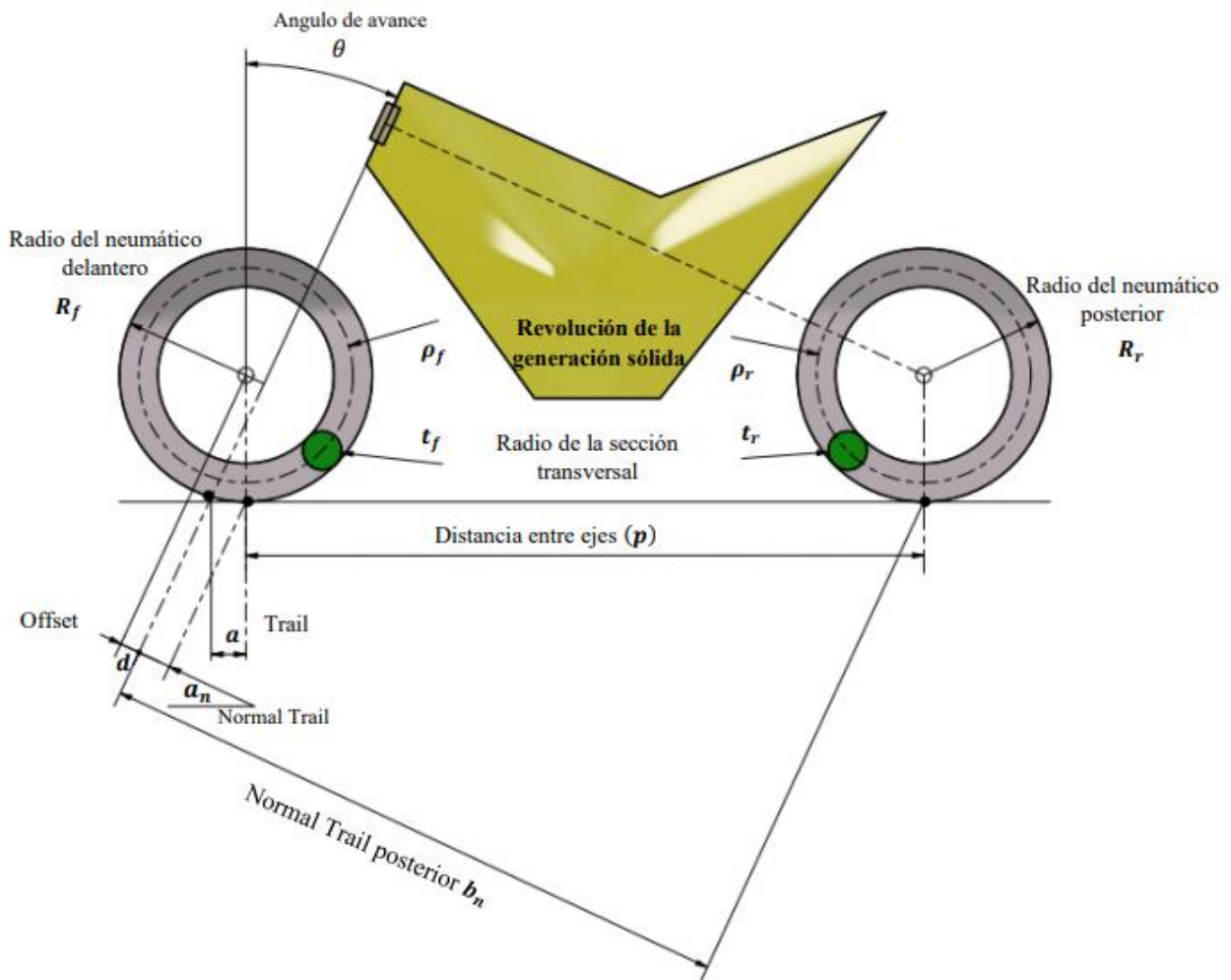
$$Z_{Gf} = p \left(\frac{m'_p - m_{rp}}{m_{total} \tan(\alpha)} \right) + r_{estático} \quad (3)$$

4.3.4 Geometría de la motocicleta

El análisis dinámico de la geometría de una motocicleta eléctrica es un proceso fundamental para comprender el comportamiento del vehículo durante el movimiento y mejorar su rendimiento. Para realizar este análisis, es esencial considerar varios factores importantes, como la distancia entre ejes, el desplazamiento de la horquilla, el ángulo de avance. Además, es crucial evaluar las características del sistema de suspensión, la distribución del peso y la geometría de las ruedas. Incluir estos aspectos, permite realizar ajustes precisos a la geometría de la motocicleta, mejorando la maniobrabilidad, seguridad y confort en la conducción. En la Figura 10, se presenta los parámetros geométricos y dimensionales como resultado de un análisis dinámico y las condiciones de partida para el diseño estructural del chasis de una motocicleta eléctrica de circulación urbana (Arias Paz, 2003).

Figura 10

Geometría de la motocicleta



Nota. La configuración geométrica de la motocicleta abarca la totalidad de los factores vinculados con la dinámica del vehículo. Fuente: Autor.

4.3.4.1 La distancia entre ejes (p)

La distancia entre ejes se define como la dimensión que abarca desde el centro del neumático delantera hasta el centro del neumático trasero del vehículo, este parámetro tiene un impacto significativo en la estabilidad de la motocicleta. Una distancia entre ejes considerablemente larga favorece una mayor estabilidad en trayectorias rectas, mientras que una distancia entre ejes reducida contribuye (Bonilla Bonilla & Jaque Paucar, 2015).

4.3.4.2 Offset (d)

Se refiere a la distancia que existe entre el eje de dirección y un eje que es paralelo a la dirección y que pasa a través de la rueda. En otras palabras, representa la medida de la separación entre el eje de la rueda y la dirección. Este parámetro se considera como uno de los ajustes principales utilizados para alterar el avance de dirección (Tamarit Caudeli, 2018).

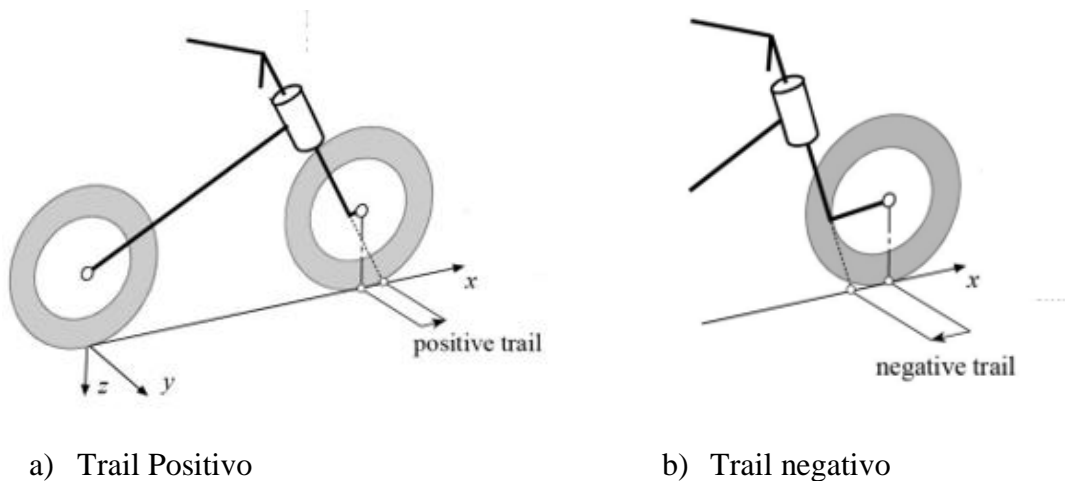
4.3.4.3 Trail (a)

El “Trail” se define como la distancia entre el punto de contacto de la rueda delantera de una motocicleta y el punto donde el eje del cabezal de dirección se encuentra con la superficie de la carretera, siendo esta modificación en el plano horizontal (Cossalter, 2006).

Una particularidad destacada de las motocicletas reside en su sistema de dirección, cuya función principal consiste en generar la fuerza lateral necesaria para cambiar la dirección de la motocicleta o mantener su equilibrio. Estos parámetros permiten calcular el valor del “normal Trail” (a_n) como se manifiesta en la Figura 11, que representa la distancia perpendicular entre el punto de contacto y el eje del cabezal de dirección de la motocicleta (Cossalter, 2006).

Figura 11

El trail



Nota. En la figura a) representa la rueda delantera con un Trail positivo y en la Figura b) un Trail Negativo, Reproducida de (Cossalter, 2006).

En esta circunstancia, se experimenta una fuerza debida a la fricción que opera en una dirección opuesta, pero coincide con la velocidad. En este contexto, cuando se presenta un valor positivo de Trail, esta fuerza genera un momento que es directamente proporcional al valor del

Trail normal y tiene como propósito alinear la rueda delantera de la motocicleta. Sin embargo, en el caso de que el Trail se negativo, la fuerza origina un momento que aumenta la rotación de la rueda y, en consecuencia, compromete la estabilidad del vehículo de dos ruedas (Aleman Brito, 2020).

4.3.4.4 El ángulo de avance (ϵ)

El ángulo de avance se crea mediante la relación entre el eje de dirección y el eje vertical. Su relevancia es significativa ya que, en conjunto con otras dimensiones y componentes, influyen en la capacidad de la motocicleta para efectuar giros y tomar curvas. Un ángulo de dirección excesivamente pequeño podría ocasionar dificultades adicionales en la capacidad del vehículo para realizar giros y maniobrar apropiadamente en curvas (Pérez Villanueva, 2019).

4.4 Cargas estáticas de la motocicleta

En el análisis estático del chasis de una motocicleta, se evalúa su resistencia a la deformación bajo cargas estáticas para asegurar la estabilidad y la capacidad de una respuesta óptima. Se examinan las fuerzas en los puntos críticos del chasis y se analiza la disposición de los componentes en su geometría. Este análisis permite simular desplazamientos, fuerzas de reacción, tensiones y deformaciones en modelos tridimensionales con condiciones de contorno definidas, también evalúa el factor de seguridad y posibilita rediseñar en zonas con altas tensiones (Núñez Gamoneda, 2016). Se basa en dos premisas fundamentales:

- **Carga estática:** Se efectúa en condiciones estáticas, aplicando gradualmente cargas hasta el valor máximo, excluyendo fuerzas inerciales y amortiguamiento.
- **Comportamiento lineal:** posee deformaciones proporcionales a los esfuerzos aplicados. Facilita comprender la deformación bajo cargas conocidas, considerando las propiedades mecánicas y detectando puntos de fallo y sus causas.

4.5 Diseño preliminar

El diseño de una motocicleta eléctrica implica la evaluación de múltiples factores, que incluyen la ubicación de la batería, tanto en términos de su dinámica como de su estática. Los bocetos iniciales desempeñan un papel fundamental, ya que establecen la dirección para el desarrollo del diseño, incluyendo aspectos de ergonomía y la utilización de software computacionales especializados que serán empleados en la configuración del chasis.

4.5.1 Ergonomía

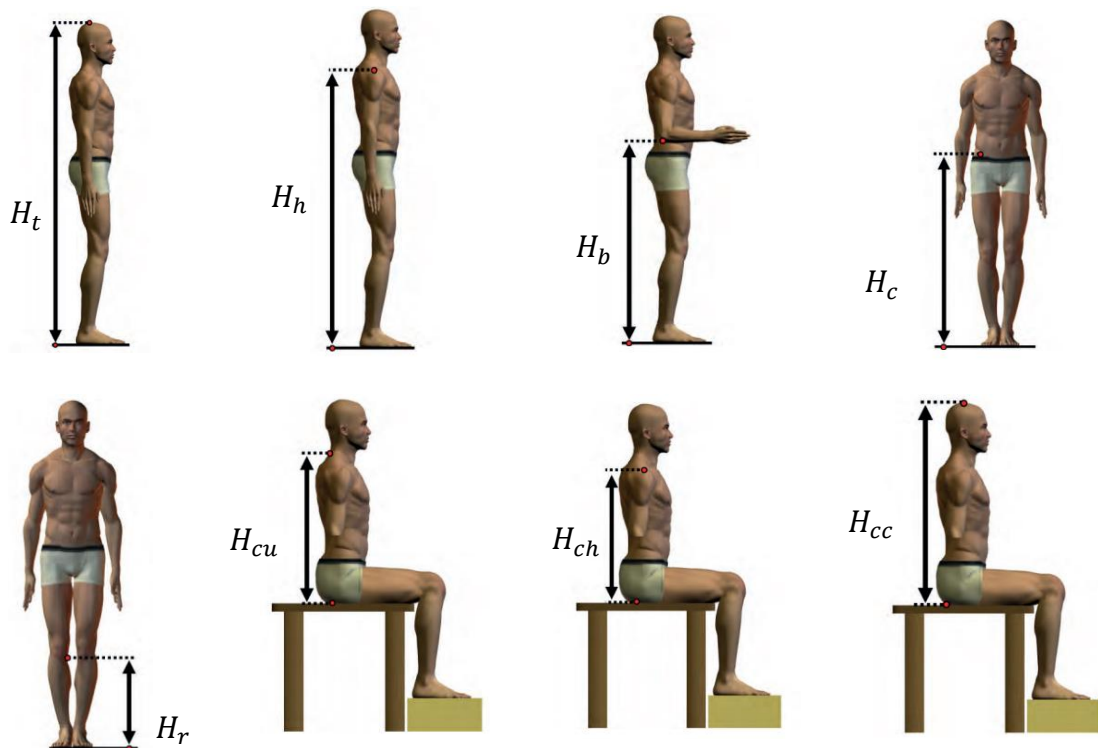
Ninguna definición nos proporciona una comprensión completa de la verdadera amplitud de esta técnica de considerable significado, la cual nos capacita para analizar la máxima concordancia posible entre las condiciones idóneas de comodidad y seguridad (Ochoa Palacios & Salamea González, 2016).

4.5.2 Dimensiones antropométricas

La evaluación de las medidas antropométricas, conforme a la norma ISO 7250, (2017), se define como un procedimiento orientador para la toma de dichas medidas como se observa en la Figura 12 se presenta un esquema de dimensiones de la estatura del cuerpo humano. Esta norma proporciona al diseñador información crucial acerca de los fundamentos antropométricos y los principios de medición aplicables en la resolución de tareas de diseño. A partir de las características geométricas de la postura del individuo.

Figura 12

Dimensiones estructurales del cuerpo humana



Nota. Adaptado de *definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico*, por la norma ISO 7250, (2017).

Con base en el estudio antropométrico realizado por Ávila Chaurand et al., (2007), que abordó las mediciones pertinentes para el diseño, conforme a las directrices expuestas por Mondelo, (2006), y tomando en consideración las proposiciones formuladas por Bhise, (2012) en relación al uso del percentil 95 para la confección de vehículos, se derivan los siguientes datos, tal como se presenta en el Tabla 1.

Tabla 1

Dimensiones antropométricas

Medida antropométrica	Longitud (mm)
Altura total (H_h)	1700
Altura hombros de pie (H_h)	1459
Altura codo de pie (H_b)	1065
Altura cintura de pie (H_c)	910
Altura rodilla de pie (H_r)	480
Altura cuello sentado (H_{ch})	570
Altura hombros de sentado (H_{ch})	470
Altura cabeza de sentado (H_{ch})	790

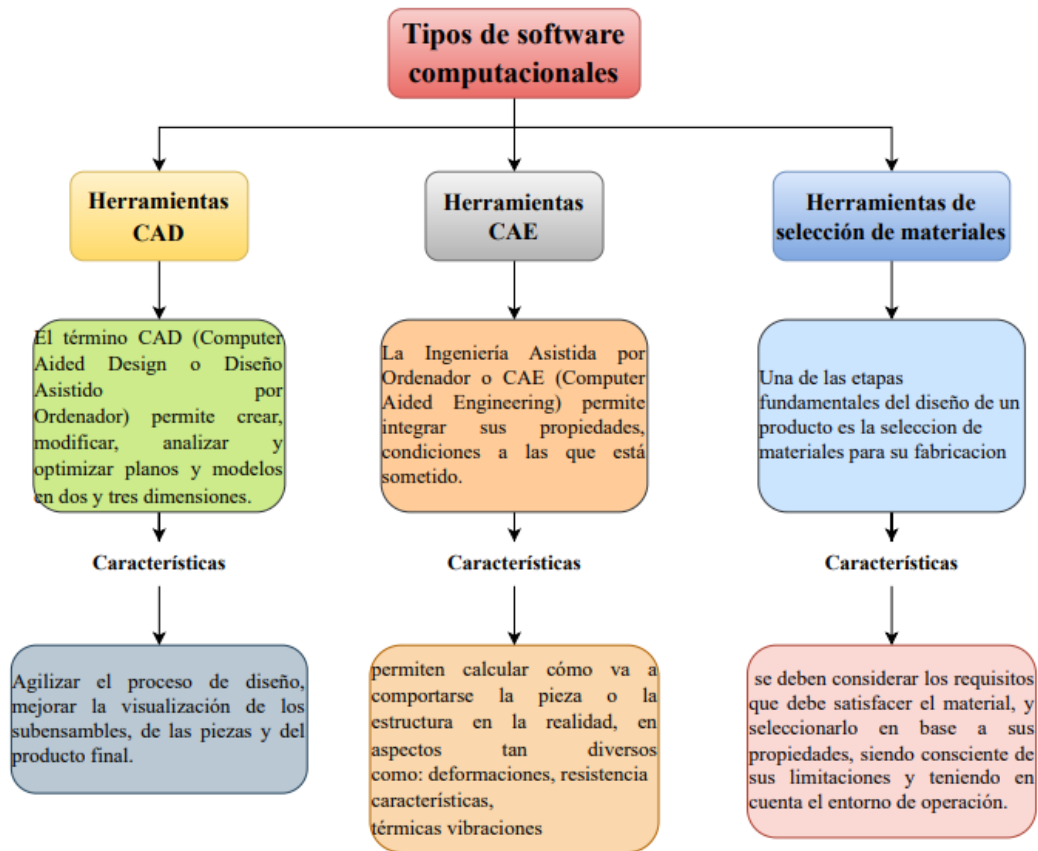
Nota. Adaptado de *definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico*, por la norma ISO 7250, (2017).

4.5.3 Herramientas computacionales

El empleo de la tecnología computacional ha experimentado una evolución substancial en el contexto de la ingeniería, lo cual ha capacitado a los ingenieros para concebir diseños de mayor complejidad y precisión, así como para llevar a cabo simulaciones y análisis numéricos mediante el uso de instrumentos avanzados. Las características esenciales de las tecnologías consideradas en el proyecto se presentan en la Figura 13.

Figura 13

La tecnología computacional



Nota. Adaptada de *El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina* por Erazo Arteaga, (2022)

4.5.4 Aspectos de las propiedades mecánicas

Los materiales empleados para la construcción del chasis de la moto eléctrica dependen de factores como el presupuesto, peso, resistencia, rigidez y proceso de fabricación para garantizar funcionalidad, seguridad y fiabilidad, es por ello que se debe realizar una selección del material considerando su rigidez, cargas y el peso, los materiales más comunes utilizados en la fabricación de chasis de motos eléctricas son: acero, aluminio, titanio y fibras de carbono.

Masa: este factor adquiere una considerable relevancia, dado que ejerce un impacto significativo en el comportamiento dinámico de la motocicleta. La reducción del peso conlleva una disminución de la inercia, lo que se traduce en una experiencia de conducción más cómoda

y mejor desempeño en maniobras tales como la toma de curvas, el frenado y la aceleración. El peso de una motocicleta eléctrica ejerce una influencia sustancial en su maniobrabilidad y autonomía, debido en gran medida a que estas motocicletas tienden a ser más pesadas que sus contrapartes de combustión interna debido a la presencia de baterías. Sin embargo, este aumento de peso puede proporcionar ventajas en términos de estabilidad y tracción, particularmente a velocidades elevadas, gracias a una mayor capacidad para contrarrestar dicho aumento de peso, lo que se traduce en una autonomía extendida (Rege et al., 2017).

Rigidez: El chasis, como elemento fundamental de la motocicleta, desempeña un papel crucial al soportar los componentes y resistir los esfuerzos generados durante su funcionamiento normal, tales como frenados y aceleraciones. Por ende, resulta de vital importancia diseñar una estructura que asegure la integridad estructural, preservando los parámetros geométricos, sistema de seguridad al usuario y los elementos internos de los componentes de la motocicleta dentro de un rango de valores adecuado, sin exceder el límite elástico del material utilizado. La seguridad en carretera en motocicletas eléctricas se ve vinculada a la rigidez de su chasis debido a su peso, la rigidez estructural y la autonomía derivado de las baterías (Iparraguirre, 2010)..

Cargas: La estructura y la geometría del chasis de una motocicleta, debe ser capaz de soportar tanto las cargas dinámicas como estáticas, sin comprometer su integridad geométrica y sin llegar a plastificar el material (Montesdeoca, 2022).

4.5.4.1 Selección del material

La selección de materiales es un proceso de alta relevancia, ya que desempeña un papel decisivo en la definición de los parámetros de diseño y construcción de la estructura del bastidor, así como puntos de partida para el diseño preliminar. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, se requiere la consideración de catálogos, fichas técnicas y un riguroso conjunto de procesos de selección, disponibles en la internet, basados en las solicitudes de trabajo y una comprensión a la interpretación de los resultados con el empleo de diagramas de Ashby. El objetivo central de este proceso es identificar el material idóneo que cumpla con los requisitos necesarios para la construcción del chasis en base a algunos criterios técnicos. (Castillo Gutiérrez et al., 2018).

4.5.5 *Materiales más usuales en el empleo de estructuras de motocicletas*

Es de vital importancia realizar una selección adecuada del material, ya que este desempeña un papel determinante en la viabilidad económica del proyecto y en la obtención de valores óptimos de rigidez. Además, la elección del material también ejerce influencia en el costo final y el peso total de la motocicleta. En general, a medida que el material posea propiedades mecánicas superiores y sea más liviano, su precio tiende a incrementarse (Budynas & Keith Nisbett, 2012).

En la fabricación de un chasis de motocicleta se emplean diversos materiales, los cuales deben cumplir con una serie de características fundamentales, como rigidez, densidad, ductilidad, resistencia, vida útil bajo fatiga, así como consideraciones de costos tanto del material como del proceso de fabricación (CEDE, 2002). Es importante considerar que la elección del material para el chasis de una motocicleta turística dependerá de diversos factores, como el diseño específico, las características deseadas de rigidez y peso, así como los requisitos de costos y fabricación. Cada material tiene sus propias ventajas y desventajas, y su selección dependerá de una evaluación cuidadosa de estas consideraciones. En el caso específico de la construcción de un chasis para una motocicleta de uso turístico, se analizarán los materiales más comúnmente utilizados para este tipo de condiciones, que son los siguientes:

4.5.6 *Acero*

El acero es un material ampliamente utilizado en la fabricación de chasis para motocicletas debido a sus propiedades destacadas, como su resistencia, maleabilidad y facilidad de soldadura, así como su bajo costo de producción. Este material está compuesto principalmente por hierro y carbono, al cual se le pueden agregar diferentes componentes para formar aleaciones. Una de las aleaciones más utilizadas en la construcción de chasis es el acero al cromo-molibdeno, que proporciona una mayor resistencia mecánica en comparación con otros tipos de acero. Esto significa que se puede utilizar una menor cantidad de material para lograr la misma resistencia, lo que resulta en una reducción de la densidad final de la pieza (López Carpes, 2017).

4.5.7 Aluminio

El aluminio es un material altamente dúctil y, cuando no se encuentra aleado con otros elementos, exhibe debilidad. Por esta razón, se procede a su clasificación en diversas series dependiendo de las aleaciones que se añadan, ya que el aluminio en su forma no aleada presenta limitaciones de aplicación, a causa de su falta de resistencia y la dificultad asociada con su proceso de soldadura. Las aleaciones con distintos elementos posibilitan que el aluminio adquiera diversas propiedades físicas y mecánicas, lo que lo convierte en un material más versátil y con mayor demanda en una variedad de aplicaciones. En consecuencia, en la fabricación de chasis para motocicletas, el acero se considera como el material de elección en vehículos de dos ruedas de rango medio y bajo, en cambio los de alta gama optan por materiales como la fibra de carbono y el magnesio (Ramos García, 2018).

4.5.8 Titanio

El titanio también es otro material, aunque no muy utilizado, nos ofrece una estructura hexagonal compacta, una alta resistencia a la corrosión y muy buenas propiedades mecánicas frente a otros metales, haciendo que las aleaciones de titanio sean muy analizadas para la construcción de elementos mecánicos, con resultados excepcionales, en el campo de las motocicletas, permitiendo una la fabricación de piezas con una relación resistencia/masa muy favorable, sin embargo, es importante destacar que el titanio exhibe atributos que lo convierten en un material propenso a procesos de maquinado de alta complejidad. Estas particularidades conllevan a un incremento en los gastos asociados a la manufactura, así como a la necesidad de disponer de equipamiento y habilidades altamente especializados para llevar a cabo dicho proceso. Este fenómeno, en última instancia, desemboca en una marcada elevación de los costos de producción en el contexto de la fabricación de motocicletas (Lizano Núñez, 2017).

4.5.9 Fibra de carbono

La fibra de carbono es un material relativamente nuevo que ha experimentado un desarrollo inicial en la industria aeronáutica y espacial, y posteriormente ha ganado importancia en la industria automotriz debido a sus propiedades mecánicas.

La fibra de carbono, conocida por su ligereza y resistencia, es un material costoso de producir. Aunque se ha empleado en piezas de motocicletas como carenados y llantas, su uso

en la construcción de chasis de motocicletas convencionales es limitado debido por la complejidad en la fabricación. Este proceso implica la estratificación de múltiples capas de fibra impregnadas en resina, lo que conlleva a un aumento en el tiempo y los costos de producción. Aunque en el ámbito de las motocicletas de competición se ha implementado la fibra de carbono, como se evidencia en la MotoStudent 2018, su aplicación en motocicletas convencionales sigue siendo restringida debido a los desafíos económicos y técnicos que implica (Lizano Núñez, 2017).

4.5.10 Propiedades de materiales empleadas en la fabricación del Chasis

A continuación, se presenta la Tabla 2 como referencia, en la cual se comparan las propiedades de los materiales más comúnmente utilizados en la fabricación de chasis para motocicletas.

Tabla 2

Propiedades de los Materiales más aptos en la fabricación de chasis de motos

Material	Tensión de rotura (kgf/mm²)	Gravedad específica	Módulo de Young (GPa)	Rigidez relativa
Fundición gris	16-22	7.3	170	0.65
Acero al carbono	55-62	7,85	200	0.95
Acero inoxidable	47-63	7.80	190	1.00
Aleaciones de aluminio	17-63	2.70	70	0.96
Aleaciones de magnesio	19-32	1.70	45	0.96
Aleaciones de titanio	47-126	4.40	100	1.01
Fibra de carbono	140	1.60	220	5.11

Nota. La tabla representa las propiedades de distintos materiales con los cuales se fabrican los chasis para moto, haciendo una comparación para la selección del óptimo material, Reproducida de (García García, 2013).

En la fabricación de motocicletas, se valoran materiales como aleaciones de aluminio, magnesio, titanio y fibras de carbono debido a su combinación de ligereza y resistencia. Sin

embargo, su uso en chasis de motocicletas convencionales es limitado debido a procesos complejos y costos elevados, por lo que se reservan principalmente para motos de alta gama. En nuestro proyecto de investigación, nos enfocamos en materiales como son los aceros, por motivo de que su fabricación es más empleada en motocicletas comerciales, permitiendo lograr la misma resistencia y reduciendo la densidad de la estructura.

Con este enfoque, se selecciona el material más adecuado, considerando sus características específicas y haciendo uso de la clasificación de materiales proporcionada en la Tabla 3. No obstante, es esencial destacar que este método puede plantear problemas en algunas situaciones, dado que no involucra un análisis exhaustivo del entorno en el que el componente va a ser utilizado. Este contexto puede tener un impacto significativo en la toma de decisiones respecto a la elección del material.

Mediante este enfoque, se determina el material más apropiado, teniendo en cuenta las características específicas y haciendo referencia a la clasificación de materiales presentada en la Tabla 3. Sin embargo, es importante señalar que este método, en algunas ocasiones, puede dar inconvenientes, ya que no se realiza un análisis completo del entorno de trabajo del componente.

Tabla 3
Clasificación de los materiales

Familias de materiales	Clase	Ventajas	Inconvenientes
Metales y aleaciones	• Hierros fundidos y aceros	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente, rígido • Dúctil y conductor 	<ul style="list-style-type: none"> • Fractura • Fatiga
	Aleaciones de Aluminio		
	• Aleaciones de Titanio		
	• Aleaciones de cobre y bronce.		
	• Aleaciones de manganeso		
Materiales polímeros	Superaleaciones de base níquel	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coste • Peso ligero 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja resistencia • Baja rigidez
	• Polietileno (PE)		
	• Policloruro de Vinilo (PCV)		
	• Poliestireno (PS) Nylon		

	<ul style="list-style-type: none"> • Epoxis • Gomas 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente a corrosión 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Productos arcillosos • Cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente, rígido, duro 	
Materiales cerámicos y vidrios	<ul style="list-style-type: none"> • Alúmina (Al₂O₃) • Carburo de tungsteno • Aluminuro de titanio (Ti₃Al) • Cristales de sílice (SiO₂) • Contrachapado • Carburos cementados 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente a temperatura • Resistente a corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilidad
Materiales compuestos	<ul style="list-style-type: none"> • Fibra de vidrio • Grafito – epoxi • Aluminio – refuerzo carburo silicio • Aramida de aluminio laminado 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente, rígido y peso ligero 	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos de unión

Nota. Adaptado de *Materials Selection in Mechanical Design*, por Ashby Michael F., (2016).

Las propiedades mecánicas clave a considerar en este tipo de análisis son las siguientes:

- **Densidad:** Esta propiedad varía en relación con la temperatura y se expresa en unidades de kg/m³ o g/cm³.
- **Tensión:** Definida como la intensidad de las fuerzas aplicadas sobre la pieza por unidad de sección.
- **Tensión de Von Mises:** Se refiere a la tensión equivalente que afecta a los elementos diferenciales y se compara con la tensión límite del material.
- **Módulo de elasticidad:** Es la relación entre la tensión y la deformación cuando esta última se encuentra dentro de la región elástica. También se conoce como Módulo de

Young. La deformación en esta fase es reversible, y el material regresa a su estado inicial después de retirar la carga.

- **Límite elástico:** La máxima tensión que un material puede resistir sin experimentar una deformación permanente.
- **Coefficiente de Poisson:** Define la relación negativa entre las deformaciones laterales y axiales generadas por la aplicación de un esfuerzo axial en el proceso de deformación elástica. En metales, típicamente varía entre 0,25 y 0,35.
- **Factor de seguridad:** Un valor esencial en el diseño de cualquier pieza sometida a cargas estáticas y de fatiga por acciones dinámicas que varían en el tiempo, se dispone de un rango entre de 1 a 5, más aún cuando no se tiene datos experimentales de los materiales.

4.5.11 Materiales locales

En el mercado ecuatoriano, se encuentran disponibles varias marcas de tubos utilizados en el diseño de estructuras, y la elección del tipo de tubo y material depende del tipo de chasis. Uno de los tipos más comunes y ampliamente fabricados a nivel nacional es el chasis de tipo multitubular, debido a su diseño sencillo, coste accesible y facilidad en los procesos de manufactura. Es importante destacar que cada marca puede ofrecer una variedad de opciones en términos de dimensiones, espesores y tratamientos superficiales, lo cual permite adaptarse a las necesidades específicas de nuestro proyecto (Lizano Núñez, 2017).

4.5.11.1 Acero negro marca IPAC


Los tubos estructurales IPAC se distinguen por ser perfiles de sección cerrada que han sido sometidos a soldadura eléctrica de alta frecuencia, lo que da lugar a elementos tubulares de sección circular en conformidad con la norma ASTM (American Society for Testing and Materials). Estos elementos estructurales poseen la capacidad de resistir esfuerzos de flexión, compresión y compresión axial elevada, lo que los convierte en una opción recomendada para la fabricación de estructuras complejas (IPAC, 2019).

Características estructurales de tubos estructurales de sección circular IPAC para la construcción

Las características estructurales de los tubos de acero IPAC son de alta calidad para la construcción de estructuras, incluyendo chasis, entre otros. Dichas características se detallan en la Tabla 4, presentada a continuación.

Tabla 4

Características estructurales de la sección circular IPAC para la construcción

	Diámetro	Espesor	Área	Peso
Designación (pulg)	mm	Mm	cm ²	Kg/m
1/2	12.70	0.60 - 1.10	0.23 – 0.40	0.18 – 0.31
3/4	19.05	0.60 – 1.5	0.35 – 0.83	0.27 – 0.65
7/8	22.23	0.60 – 1.5	0.41 – 0.98	0.32 – 0.77
Designación (pulg)	mm	Mm	cm ²	Kg/m
1	25.40	0.60 – 1.5	0.47 – 1.13	0.37 – 0.88
1 1/2	38.10	0.90 – 1.5	1.05 – 1.72	0.83 – 1.35
1 1/4	31.75	0.75 – 1.5	0.73 – 1.43	0.57 – 1.12
1 3/4	44.45	1 – 1.5	1.37 – 2.02	1.07 – 1.59
1 7/8	47.68	1 – 1.5	1.47 – 2.18	1.15 – 1.71
2	50.80	1.10 – 1.5	1.72 – 2.32	1.35 – 1.82

Nota. La tabla representa cada una de las medidas en los diferentes materiales para chasis tubulares más comunes en motos, Reproducida de (IPAC, 2019).

Es necesario realizar un análisis experimental con el fin de identificar y evaluar el tipo de material disponible en el mercado. Este procedimiento permitirá la evaluación de las propiedades mecánicas y facilitará la toma de decisiones específicas relacionadas con la construcción estructural.

La selección de material en el programa CesEduPack involucra la aplicación de una metodología secuencial destinada para la identificación de materiales que cumplan con los perfiles y propiedades requeridos para el diseño estructural. La Figura 14 hace referencia a ciertas condiciones de operación, objetivos que son identificadas en el proceso de diseño estructural. Se ha simplificado el proceso de fabricación y la relación con la selección de materiales en etapas (Ashby, 2016).

Figura 14

Procedimiento para la selección del material



Nota. Adaptado de *Materials Selection in Mechanical Design*, por Ashby Michael F., (2016).

Etapas de la selección de materiales

En el proceso de selección de materiales, se emplea el software especializado como CesEduPack de Autodesk, el cual se fundamenta en ecuaciones de elasticidad de materiales.

Este software establece relaciones entre variables físicas, mecánicas, químicas y matemáticas con el objetivo de elegir materiales de manera fundamentada desde una perspectiva ingenieril.

El empleo de mapas de materiales que relacionan propiedades de los materiales permite aproximar el material más adecuado dentro de una familia de materiales en función de las propiedades requeridas. Es importante destacar que, en la mayoría de los casos, el comportamiento de un componente depende de múltiples propiedades.

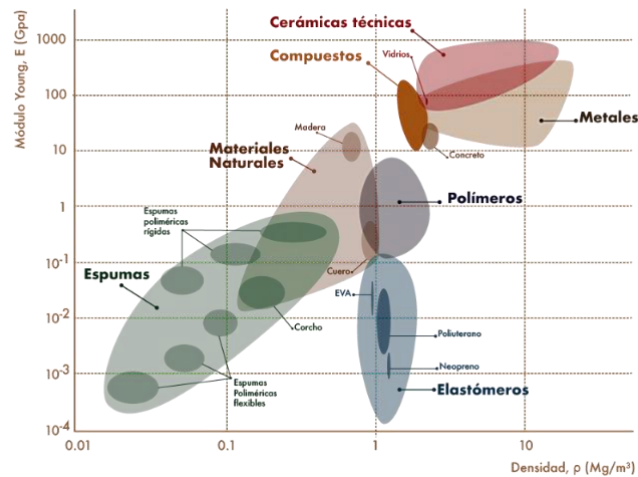
Los mapas de materiales, también denominados diagramas de Ashby, en la Figura 15 se observa la relación entre el módulo de Young y la densidad, lo que conduce a la categorización de diversos tipos de materiales que varían significativamente en función de sus propiedades. Estos materiales tienden a agruparse en regiones específicas dentro de los diagramas, dependiendo del estado en el que se encuentren. Esto implica que incluso dentro de una misma familia de materiales, puede existir una variación considerable en términos de sus características, dando lugar a campos o zonas distintivas en estos mapas. Las propiedades abordadas en estos mapas incluyen la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad, la densidad, la tenacidad, la conductividad térmica, los costos, entre otros aspectos relevantes. El proceso de selección de materiales generalmente se desglosa en tres etapas:

Los mapas de materiales, también conocidos como diagramas de Ashby como se observa en la, haciendo uso de una relación del módulo de Young entre la densidad dando como resultado diferentes clases de materiales pueden variar ampliamente según sus propiedades, formando grupos en áreas cerradas en los diagramas, dependiendo del estado de los materiales. Esto significa que una misma familia de materiales puede presentar una variación considerable en sus propiedades, generando campos o zonas en estos mapas. Las propiedades relacionadas en estos mapas incluyen resistencia mecánica, módulo de elasticidad, densidad, tenacidad, conductividad térmica, costos, entre otros. El proceso de selección de materiales consta de tres etapas:

- Definición de requerimientos para la aplicación considerada.
- Cálculo del índice o índices de material para la aplicación
- Selección del material usando el índice de material y los mapas de selección de materiales

Figura 15

Diagramas de Ashby



Nota. Adaptado de *Materials Selection in Mechanical Design*, por Ashby Michael F., (2016).

Tercera fase método con la ayuda de la base de datos

Otra alternativa a la mostrada es la búsqueda en Internet, su complejidad se basa en la diversidad de información sobre materiales, derivadas de investigaciones en ensayos de materiales y destinadas a fines comerciales. Estas bases de datos se dividen en dos categorías principales: numéricas y literarias. Entre las más destacadas se incluyen ASTM, SAE, ASM, AISI, NASA, y otras. La selección de materiales a través de estas bases de datos requiere conocimiento de las propiedades clave necesarias para un propósito específico. El programa solicita valores aproximados de estas propiedades y proporciona una lista de materiales adecuados. Hay múltiples fuentes que recopilan estas bases de datos.

Además, existen un software especializado para la selección de materiales, como CesEdupack, ampliamente utilizado en el diseño e ingeniería a nivel mundial. Estos programas se basan en el conocimiento de las propiedades fundamentales requeridas para un uso particular del material. Estas herramientas ofrecen una amplia base de datos que abarca más de 3000 materiales distintos, más de 200 procesos y diversos datos técnicos. En resumen, estas fuentes de información y herramientas representan recursos valiosos para la selección de materiales en el ámbito de la ingeniería y el diseño.

4.5.12 Método de los elementos finitos en las herramientas computacionales

El método de los elementos finitos computacionales (MEF) es un método numérico ampliamente utilizado en la ingeniería y la simulación computacional para analizar estructuras y sistemas diversos. Se basa en la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales y otros problemas matemáticos. El MEF propone sustituir un número infinito de variables desconocidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido, que se ensamblan en una malla representativa de la geometría del diseño de la motocicleta. En la ingeniería moderna, el MEF se ha convertido en una herramienta esencial para abordar una amplia gama de problemas, contribuyendo a mejorar la calidad de proyectos.

4.5.12.1 MEF desde un enfoque analítico

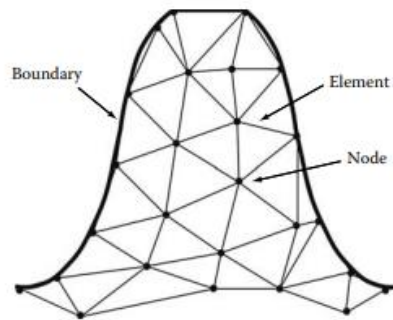
El método de elementos finitos puede ser definido como una técnica numérica empleada para obtener una solución aproximada de un problema de ingeniería. Esta metodología permite la utilización de elementos con diversas geometrías, como triángulos, rectángulos o cuadriláteros en 2D, o elementos hexaédricos en 3D (Espinosa Naula & Román Quevedo, 2021).

La solución se basa en discretizar el dominio en elementos y este en nodos, para la determinación de propiedades elásticas como tensiones o desplazamientos. La distribución de estos elementos se conoce como malla, y estos elementos se conectan en puntos llamados nodos, tal como se muestra en la Figura 16. Las ecuaciones de los elementos se ensamblan para obtener la ecuación global de la malla, que describe el comportamiento del cuerpo en su totalidad. Generalmente, la ecuación (4) tiene la siguiente forma:

$$[K]\{A\} = \{B\} \quad (4)$$

Figura 16

Malla de elementos finitos

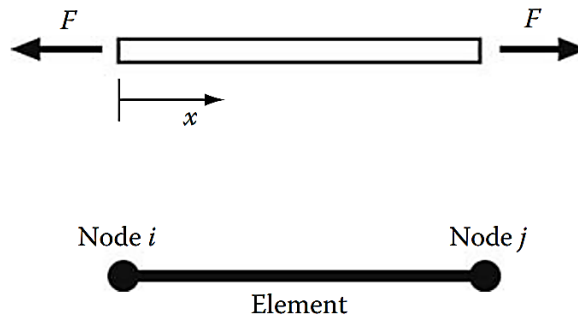


Nota. Reproducida de *Finite Element Simulations Using ANSYS* por Alawadhi, (2010).

La matriz $[K]$ exhibe singularidad, lo que impide su inversión. considerando una barra unidimensional de longitud inicial L que se encuentra sometida a una fuerza de tracción en sus extremos (Alawadhi, 2010). Esta barra puede ser representada mediante un único elemento que posee dos nodos, identificados como i y j , tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Elemento de barra unidimensional



Nota. Reproducida de *Finite Element Simulations Using ANSYS* por Alawadhi, (2010).


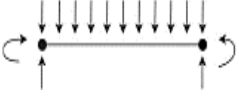
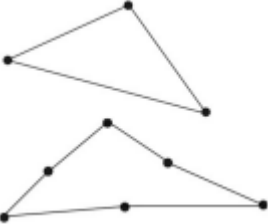

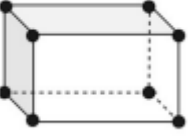
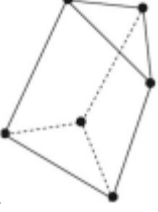
4.5.12.2 Tipo de elementos

Según el problema, los elementos pueden adoptar diversas formas, como líneas, áreas o volúmenes. En la Tabla 5, se presentan los tipos de elementos de línea que se emplean para la modelación de estructuras tales como cerchas, resortes, eslabones o vigas, por su simplicidad y bajo coste computacional son los más empleados en análisis de estructuras. En cambio, los elementos de área, que pueden ser configurados como rectángulos o triángulos, se utilizan para representar áreas sólidas bidimensionales, como en el análisis de tensiones en placas o en el

análisis térmico de aletas, el caso más práctico es el análisis de tensión plana. Por otro lado, los elementos de volumen se emplean para modelar cuerpos y superficies tridimensionales, en este campo se emplea las simulaciones en CFD (Alawadhi, 2010).

Tabla 5

Tipo de elementos

Clasificación	Tipo de elemento	Numero de Nodos	Formas	Aplicaciones
Unidimensional	Líneas	2		Barra a compresión y Flexión
		2		Barra o viga de flexión
Bidimensional	Superficie	3		Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel cortante, placa plana, papel cortante, placa plana delgada en flexión.
		4		Usado para transiciones de cuadriláteros esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel cortante, placa plana delgada en flexión.
Tridimensional	Sólido	8		Placa gruesa
		6		Placa gruesa. Usado para transiciones.

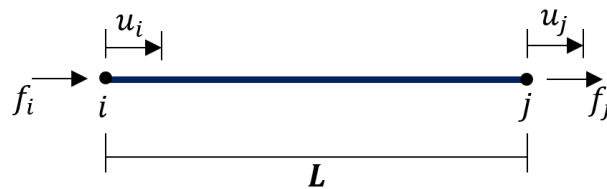
Nota. Reproducida de *Finite Element Simulations Using ANSYS* por Alawadhi, (2010).

4.5.12.3 Formulación de elementos tipo barra

Para la demostración de la ecuación de pendiente-deflexión, es esencial tener en cuenta su aplicación en el análisis de vigas hiperestáticas, las cuales constituyen elementos estructurales caracterizados por su capacidad para resistir cargas horizontales y, en consecuencia, exhiben un número de restricciones mayores que las estrictamente necesarias para garantizar su equilibrio, como se ilustra en la Figura 18. Para llevar a cabo la determinación precisa de las fuerzas de reacción, tanto internas como externas en una viga hiperestática, se dispone de diversas metodologías analíticas. Entre estas, el método matricial de la rigidez se destaca como uno de los enfoques más eficaces.

Figura 18

Matriz de rigidez método directo

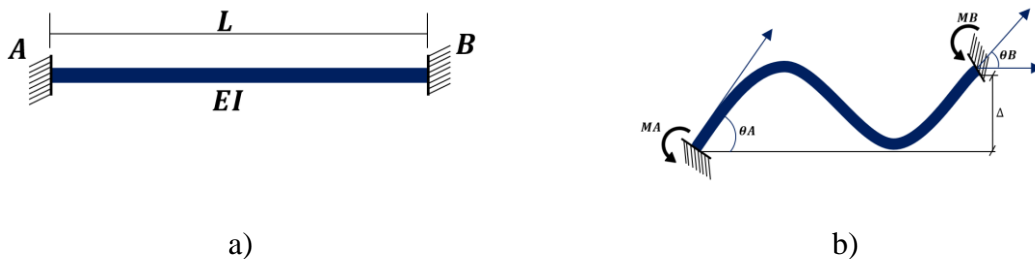


Nota. En la ilustración se presenta las fuerzas a las cuales se encuentra sometida una viga con el propósito de determinar la matriz de rigidez. Fuente: Autor

La demostración de las ecuaciones implica establecer una relación entre los momentos en los puntos de apoyo designados como A y B y las pendientes y deflexiones en esos mismos puntos, así como los cambios de inercia, tal como se ilustra en la Figura 19. Esto se refiere a una viga sometida a condiciones de giro en ambos extremos y un desplazamiento vertical en uno de ellos.

Figura 19

Análisis de rigidez



Nota. en la figura a) Viga sin deformar y b) Viga con deformación impuesta

Para abordar la resolución de esta viga, se empleará la teoría de la elasticidad de la viga. En este caso particular, la carga distribuida se considera nula. Para iniciar el proceso de cálculo, se procede con la integración adecuada, aplicando fuerzas cortantes para obtener la ecuación (5). Además, se aplican momentos para determinar la ecuación (6). Con ello se lleva a cabo un análisis de los ángulos de giro de la viga para obtener la ecuación (7). Finalmente, se realiza un análisis de los desplazamientos de la viga para obtener la ecuación (8), que finalmente corresponde a los desplazamientos en la dirección longitudinal.

$$EI \frac{du^4}{dx^4} = 0$$

$$EI \frac{du^3}{dx^3} = V(x) = \int 0 dx$$

$$V(x) = C_1 \tag{5}$$

$$EI \frac{du^2}{dx^2} = M(x) = \int C_1 dx$$

$$M(x) = C_1x + C_2 \tag{6}$$

$$EI \frac{du}{dx} = EI \theta(x) = \int C_1x + C_2 dx$$

$$EI \theta(x) = \frac{C_1x^2}{2} + C_2x + C_3 \tag{7}$$

$$EI \mu(x) = \int \frac{C_1x^2}{2} + C_2x + C_3 dx$$

$$EI \mu(x) = \frac{C_1x^3}{6} + \frac{C_2x^2}{2} + C_3x + C_4 \tag{8}$$

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son restricciones que se establecen en la viga o estructura con el propósito de definir las soluciones a las ecuaciones diferenciales que modelan la

deformación de dicha viga. Estas condiciones se utilizan para determinar las cuatro incógnitas resultantes, que son representadas por C_1 , C_2 , C_3 , y C_4 .

$$x = 0 \rightarrow \frac{du}{dx} = \theta A \quad (9)$$

$$x = 0 \rightarrow \mu = 0 \quad (10)$$

$$x = L \rightarrow \frac{du}{dx} = \theta B \quad (11)$$

$$x = L \rightarrow \mu = \Delta \quad (12)$$

La primera condición se verifica cuando la variable x toma el valor de $x = 0$, A partir de la ecuación (9), se procede a sustituir estos valores en la ecuación (7), lo que conduce a la determinación del valor de C_3 .

$$EI \frac{du}{dx} = \frac{C_1 x^2}{2} + C_2 x + C_3$$

$$EI \theta A = \frac{C_1(0)^2}{2} + C_2(0) + C_3$$

$$EI \theta A = C_3 \quad (13)$$

Seguidamente, se procede a implementar la segunda condición, que tiene lugar cuando la variable x alcanza el valor de $x = 0$, como se define en la ecuación (10). Se realiza la sustitución de estos valores en la ecuación (8). Como resultado de esta sustitución, se obtiene el valor correspondiente de C_4 .

$$EI \mu = \frac{C_1 x^3}{6} + \frac{C_2 x^2}{2} + C_3 x + C_4$$

$$EI (0) = \frac{C_1(0)^3}{6} + \frac{C_2(0)^2}{2} + C_3(0) + C_4$$

$$C_4 = 0 \quad (14)$$

Para determinar la ecuación (15), se procede a la implementación de la tercera condición correspondiente a la variable x , la cual toma el valor de L según la definición establecida en la ecuación (11). Posteriormente, se procede a sustituir este valor en la ecuación (7).

$$EI \frac{du}{dx} = \frac{C_1 x^2}{2} + C_2 x + C_3$$

$$EI \theta_B = \frac{C_1(L)^2}{2} + C_2(L) + EI \theta_A \quad (15)$$

A continuación, se procede a la sustitución de la cuarta condición, como se expone en la ecuación

(51), donde se establece que la variable x adquiere el valor de L , logrando así la ecuación (16).

$$EI \mu = \frac{C_1 x^3}{6} + \frac{C_2 x^2}{2} + C_3 x + C_4$$

$$EI \Delta = \frac{C_1(L)^3}{6} + \frac{C_2(L)^2}{2} + EI \theta_A(L) + 0$$

$$EI \Delta = \frac{C_1(L)^3}{6} + \frac{C_2(L)^2}{2} + EI \theta_A(L) \quad (16)$$

Con el propósito de determinar el valor de la ecuación (17), se procede a efectuar una combinación algebraica de las ecuaciones (15) y (16), dando lugar a la formación de una ecuación lineal que involucra dos incógnitas. Esta ecuación lineal se resuelve empleando el método de reducción, lo que conduce a la obtención del valor de C_1 .

$$\left(-\frac{2}{L}\right) \begin{cases} EI \theta_B = \frac{C_1(L)^2}{2} + C_2(L) + EI \theta_A \\ EI \Delta = \frac{C_1(L)^3}{6} + \frac{C_2(L)^2}{2} + EI \theta_A(L) \end{cases}$$

$$\begin{array}{r} EI \theta_B = \frac{C_1(L)^2}{2} + C_2(L) + EI \theta_A \\ -\frac{2}{L} EI \Delta = -\frac{C_1(L)^2}{3} - C_2(L) - 2EI \theta_A \\ \hline EI \theta_B - \frac{2}{L} EI \Delta = \frac{C_1(L)^2}{6} - EI \theta_A \end{array}$$

$$\frac{C_1(L)^2}{6} - EI \theta_A = EI \theta_B - \frac{2}{L} EI \Delta$$

$$C_1 = \frac{6EI}{(L)^2} \left(\theta_A + \theta_B - \frac{2}{L} \Delta \right) \quad (17)$$

Una vez se ha calculado el valor de C_1 , tal como se encuentra definido en la ecuación (17), se procede a realizar su sustitución en la ecuación (15). Este procedimiento permite determinar el valor de C_2 .

$$EI \theta_B = \frac{C_1 L^2}{2} + C_2 L + EI \theta_A$$

$$EI \theta_B = \frac{L^2}{2} \left[\frac{6EI}{(L)^2} \left(\theta_A + \theta_B - \frac{2}{L} \Delta \right) \right] + C_2 L + EI \theta_A$$

$$EI \theta_B = 3 \left(EI \theta_A + EI \theta_B - \frac{2EI}{L} \Delta \right) + C_2 L + EI \theta_A$$

$$-3EI \theta_A - EI \theta_A + EI \theta_B - 3EI \theta_B + \frac{6EI}{L} \Delta - C_2 L = 0$$

$$C_2 = -\frac{2EI}{L} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3}{L} \Delta \right) \quad (18)$$

Luego de haber obtenido los resultados correspondientes a las dos incógnitas, C_1 y C_2 , se procede a llevar a cabo su sustitución en la ecuación (6). Este proceso permite realizar un análisis del momento generado a través de las reacciones de fuerza involucradas.

$$M(x) = C_1 x + C_2$$

$$M(x) = \frac{6EI}{L^2} \left(\theta A + \theta B - \frac{2}{L} \Delta \right) x - \frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \quad (19)$$

Mediante la aplicación de la primera condición, donde la variable $x = 0$, se procede a sustituir dicha condición en la ecuación (19). Este procedimiento conduce a la determinación del momento en el punto A , tal como se expone en la ecuación (20).

$$\begin{aligned} M(0) = M_A &= \frac{6EI}{L^2} \left(\theta A + \theta B - \frac{2}{L} \Delta \right) (0) - \frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \\ M_A &= -\frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \end{aligned} \quad (20)$$

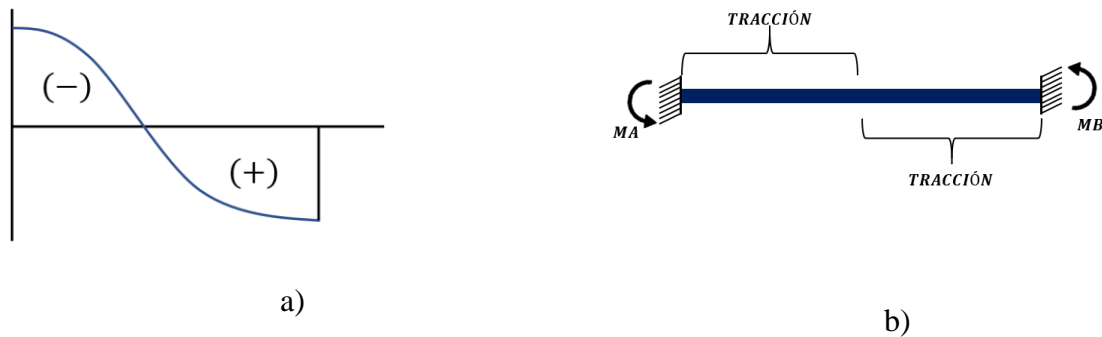
Mediante la aplicación de la tercera condición, donde la variable $x = L$, se procede a sustituir dicha condición en la ecuación (19). Este procedimiento conduce a la determinación del momento en el punto B , tal como se expone en la ecuación (21).

$$\begin{aligned} M(L) = M_B &= \frac{6EI}{L^2} \left(\theta A + \theta B - \frac{2}{L} \Delta \right) L - \frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \\ M_B &= \frac{6EI}{L^2} \left(\theta A + \theta B - \frac{2}{L} \Delta \right) (L) - \frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \\ M_B &= \frac{6EI}{L} \theta A + \frac{6EI}{L} \theta B - \frac{12EI}{L} \Delta - \frac{4EI}{L} \theta A - \frac{2EI}{L} \theta B + \frac{6EI}{L^2} \Delta \\ M_B &= \frac{2EI}{L} \left(\theta A + 2\theta B - \frac{3}{L} \Delta \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Se encuentran estas dos fórmulas con signo positivo. Sin embargo, en esta demostración de M_A es negativo. Esto se debe a que la conversión de signos como se muestra en la Figura 20 mientras que por el método de integración de la elástica usando M_A negativo indica **tracción** en las fibras superiores, de la siguiente forma como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Convención de signos



Nota. En la Figura a), se ilustra la convención utilizada para representar los signos, mientras que en la Figura b) se muestra la distribución de momentos y se indica que la viga se encuentra sometida a fuerzas de tracción. Fuente: Autor

A las ecuaciones (20) y (21) se les suma los efectos de reacción de momentos de empotramiento perfecto (**MEP**) producto de una carga vertical aplicada demostrando así la ecuación (22) y (23).

$$MA = -\frac{2EI}{L} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3}{L}\Delta \right) + MEP \quad (22)$$

$$MB = \frac{2EI}{L} \left(\theta_A + 2\theta_B - \frac{3}{L}\Delta \right) + MEP \quad (23)$$

4.5.12.4 Caso aplicado a una matriz de rigidez de 6x6

La utilización de la matriz de rigidez en el MEF se aplica por su capacidad de simplificar el proceso de análisis estructural. Para este propósito, se ha decidido emplear elementos unidimensionales de dos nodos en el modelo, donde cada nodo posee 6 grados de libertad, como se ilustra en la Figura 21. Este enfoque se ha seleccionado debido a su eficacia en la representación del comportamiento estructural durante la simulación.

Para la demostración de las ecuaciones de matriz de rigidez se inicia con la Ley de Hooke donde hace referencia al esfuerzo ($\sigma = \varepsilon \cdot E$), la deformación unitaria ($\varepsilon = \Delta L/LT$) y el módulo de elasticidad (E) dándonos como resultado un vector de fuerzas $\{F\}$ y eso es igual a un vector de deformaciones $\{\mu\}$ por la matriz de rigidez $[K]$ como se muestra en la ecuación

(51).

$$k = \frac{E \cdot A}{LT}$$

$$\{F\} = \{\mu\} * [K] \quad (24)$$

VIGAS

La configuración básica de un bastidor se puede componer por elementos tipo viga. En la viga se representa dos puntos i y j en estos puntos se tiene tres grados de libertad, la normal (N), la cortante (V) y el momento (M), representados cada uno con un valor numérico como se muestra en la Figura 21, estos números nos muestran un orden para establecer las ecuaciones de la matriz de rigidez.

Figura 21

Grados de libertad en la viga



Nota. En la figura se representan las fuerzas normales (N), las fuerzas cortantes (V) y los momentos (M).

Fuente: Autor

Deformación unitaria

Para iniciar con el proceso de cálculo de matriz de rigidez primeramente se realiza una deformación unitaria en el eje (x) que representa la Normal "1" como está establecido en la Figura 22.

Figura 22

Deformación unitaria en la viga



Nota. En la figura a) presenta la deformación mientras que el literal b) representa como se llevará a cabo la ley de signos. Fuente: Autor

Para determinar la fuerza normal se debe conocer que la deformación axial ($\delta = FL/EA$) como se muestra en el proceso de desarrollo para determinar la fuerza normal detallada en la ecuación (25).

$$\begin{aligned} F &= \frac{\delta EA}{L} \\ N &= \frac{1EA}{L} \\ N &= \frac{EA}{L} \end{aligned} \quad (25)$$

Para contrarrestar esta fuerza (N_i) según el equilibrio va a ver una fuerza opuesta (N_j) como puede observar en la ecuación (26).

$$N_i = N_j = \frac{EA}{L} \quad (26)$$

Finalmente obtenemos nuestra primera columna de matriz de rigidez para ellos debemos observar que tenemos 6 grados de libertad como está en la Figura 21, sabiendo que las fuerzas cortantes y momentos no se considera obteniendo un valor de cero, así se manifiesta la primera columna de la matriz considerando la ley de signos mostrada en la Figura 22 literal b, con ello se logra manifestar muestra en la ecuación (27).

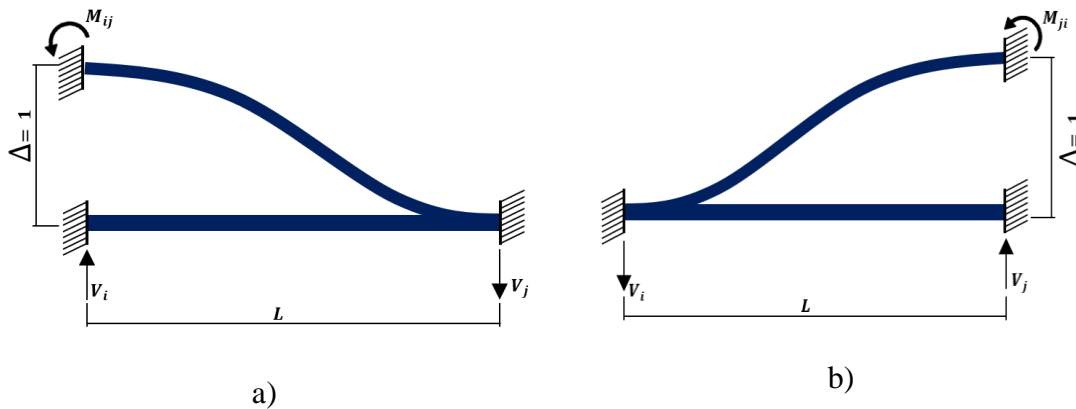
$$N(1) = \begin{bmatrix} EA/L \\ 0 \\ 0 \\ -EA/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1(N) \\ 2(V) \\ 3(M) \\ 4(N) \\ 5(V) \\ 6(M) \end{matrix} \begin{matrix} \left. \vphantom{\begin{matrix} 1(N) \\ 2(V) \\ 3(M) \end{matrix}} \right\} i \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} 4(N) \\ 5(V) \\ 6(M) \end{matrix}} \right\} j \end{matrix} \quad (27)$$

Deformación unitaria, eje (y)

Si se somete a una deformación en el eje Y , se puede analizar dicha deformación de la siguiente manera: Para que se produzca esta deformación, se generará una fuerza en la dirección de i y j , al mismo tiempo que se aplicará un momento en las mismas direcciones, como se ilustra en la Figura 23. Para abordar este fenómeno, se emplea la ecuación de pendiente de deflexión, tal como se describe en la ecuación (22).

Figura 23

Deformación en el eje y



Nota. En la figura a) representa la aplicación de momentos y fuerzas cortante en la coordenada i y b) representa la aplicación de momentos y fuerzas cortante en la coordenada j . Fuente: El Autor.

Para abordar este fenómeno, se emplea la ecuación de pendiente de deflexión, tal como se describe en la ecuación (22).

Momentos de deformación unitaria del eje y

$$M_{ij} = M_{\ddagger} + \frac{2EI}{L} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{L} \Delta \right)$$

$$M_{ij} = 0 + \frac{2EI}{L} \left(0 + 0 - \frac{3\Delta}{L} \right)$$

$$\begin{aligned}
M_{ij} &= \frac{2EI}{L} \left(-\frac{3(1)}{L} \right) \\
M_{ij} &= -\frac{6EI}{L^2} \\
M_{ij} = M_{ji} &= -\frac{6EI}{L^2}
\end{aligned}
\tag{28}$$

Cortantes de deformación unitaria del eje y

Para obtener cortantes se las realiza mediante la sumatoria de momentos obtenidas en la ecuación (28).

$$\begin{aligned}
\sum M_i &= 0 \\
M_{ij} + M_{ji} - V_j L &= 0 \\
-\frac{6EI}{L^2} - \frac{6EI}{L^2} - V_j L &= 0 \\
-\frac{12EI}{(L)^2} - V_j L &= 0 \\
V_j(L) &= -\frac{12EI}{L^2} \\
V_j &= \frac{12EI}{L^3} \\
V_j = V_j &= \frac{12EI}{L^3}
\end{aligned}
\tag{29}$$

Finalmente obtenemos nuestra segunda columna de matriz de rigidez para ellos debemos considerar que tenemos 6 grados de libertad, dando como resultado la ecuación (30).

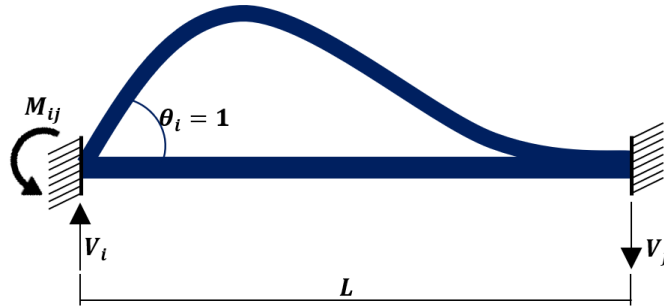
$$V(2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 12EI/L^3 \\ 6EI/L^2 \\ 0 \\ -12EI/L \\ 6EI/L^2 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1(N) \\ 2(V) \\ 3(M) \\ 4(N) \\ 5(V) \\ 6(M) \end{matrix} \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} \begin{matrix} i \\ j \end{matrix}
\tag{30}$$

Giros unitarios $\theta_i = 1$

La deformación va a tener un giro en el punto i que es igual a 1 obteniendo momento y cortantes i y j como se muestra en Figura 24.

Figura 24

Deformación mediante giros unitarios en la coordenada i



Nota. En la figura se representa la deformación a través de giros unitarios en la coordenada i , lo cual permite la visualización de la distribución de las fuerzas y momentos. Fuente: Autor

Momentos de giro unitario

Con la misma ecuación de pendiente deflexión se obtiene los momentos obteniendo así la ecuación (31)

$$M_{ij} = M_i + \frac{2EI}{(L)} \left(2\theta A + \theta B - \frac{3}{(L)} \Delta \right)$$

$$M_{ij} = 0 + \frac{2EI}{(L)} \left(2(1) + 0 - \frac{3(0)}{(L)} \right)$$

$$M_{ij} = \frac{2EI}{(L)} \quad (2)$$

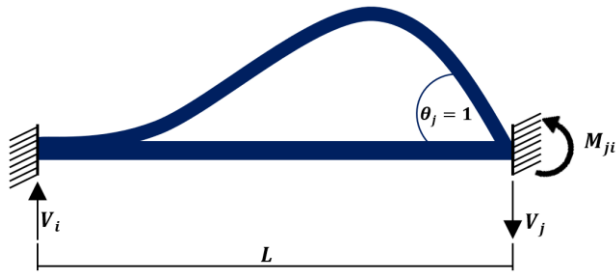
$$M_{ij} = \frac{4EI}{(L)}$$

(31)

Mediante la Figura 25 se observa los giros unitarios en las coordenadas j obteniendo así la ecuación (32).

Figura 25

Deformación mediante giros unitarios en la coordenada j



Nota. En la figura se representa la deformación a través de giros unitarios en la coordenada j , lo cual permite la visualización de la distribución de las fuerzas y momentos. Fuente: Autor

$$M_{ji} = M_j + \frac{2EI}{(L)} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3}{(L)} \Delta \right)$$

$$M_{ij} = 0 + \frac{2EI}{(L)} \left(2(0) + 1 - \frac{3(0)}{(L)} \right)$$

$$M_{ij} = \frac{2EI}{(L)} \quad (1)$$

$$M_{ij} = \frac{2EI}{(L)}$$

(32)

Cortante de giro unitario

Para hallar las cortantes se debe hacer la sumatoria de los momentos en i y j obteniendo así la ecuación (33)

$$\sum M_i = 0$$

$$M_{ij} + M_{ji} - V_j(L) = 0$$

$$\frac{4EI}{(L)} + \frac{2EI}{(L)} - V_j(L) = 0$$

$$\frac{6EI}{(L)} - V_j(L) = 0$$

$$-V_j(L) = -\frac{6EI}{(L)}$$

$$V_j = -\left(-\frac{6EI}{(L)(L)}\right)$$

$$V_j = \frac{6EI}{(L)^2}$$

(33)

$$V_i = V_j = \frac{6EI}{(L)^2}$$

Con estos datos de momentos y cortantes se obtiene nuestra tercera columna de la matriz de rigidez mostrada en detalle en la ecuación (34).

$$V(3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 6EI/(L)^3 \\ 4EI/(L)^2 \\ 0 \\ -6EI/(L)^3 \\ 2EI/(L)^2 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1(N) \\ 2(V) \\ 3(M) \\ 4(N) \\ 5(V) \\ 6(M) \end{matrix} \left. \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \right\} \begin{matrix} i \\ \\ \\ j \\ \\ \end{matrix} \quad (34)$$

Matriz de rigidez

Obtenido los valores correspondientes a las tres columnas y considerando la simetría de la matriz, es posible proceder a la construcción de una matriz de dimensiones 6x6, conforme a lo establecido en la ecuación (35) correspondiente.

$$N_1 \quad V_2 \quad M_3 \quad \text{Simetría}$$

(35)

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EA}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EA}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EA}{L} \end{bmatrix}$$

4.6 Diseño generativo

El diseño generativo emplea métodos computacionales basados en algoritmos y reglas preestablecidas para generar soluciones de diseño. Mediante la programación, se definen parámetros y restricciones que dirigen la creación de diseños distintivos y diversos. Esta metodología fusiona la inventiva humana con la capacidad de cálculo de los sistemas informáticos, dando lugar a resultados innovadores y adaptados a cada contexto (García Torija, 2021).

La optimización topológica emplea métodos computacionales y técnicas matemáticas para obtener la configuración ideal de un objeto o estructura, con el propósito de minimizar su peso o maximizar su rendimiento. Se realiza mediante la exploración de diversas distribuciones de material dentro de un espacio determinado, con el fin de encontrar la disposición más eficiente en términos de rigidez, resistencia u otros criterios predefinidos. Al eliminar o redistribuir selectivamente el material, la optimización topológica permite generar diseños más ligeros y robustos, lo que resulta en una mayor eficiencia estructural y una reducción en los costos de fabricación (Manso Agundez, 2019).

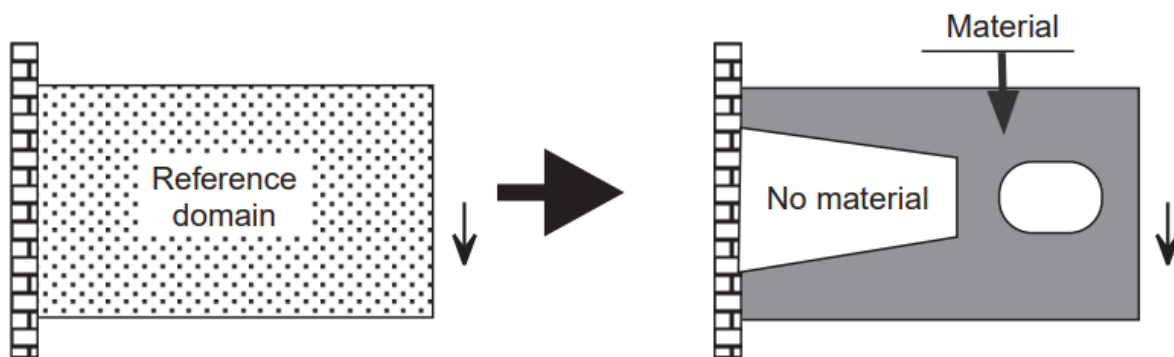
El ámbito del diseño computacional de formas con topología variable en estructuras continuas se encuentra actualmente bajo la influencia predominante de métodos que emplean un enfoque de distribución de materiales. En otras palabras, la representación geométrica de una estructura se asemeja a una representación en escala de grises, como se ilustra en la Figura 26, donde se representa de manera discreta, correspondiendo a una representación de trama de la geometría. Asimismo, puede implicar la búsqueda de un método adecuado para restringir la

complejidad geométrica, intercambiando la variación total de una densidad por el perímetro de un dominio específico.

El problema generalizado en el diseño de formas consiste en encontrar la distribución óptima de materiales en la estructura. En las secciones siguientes, nos enfocaremos exclusivamente en los modelos de interpolación utilizados para las propiedades del material, sin entrar en detalles adicionales sobre otros aspectos relacionados con los procedimientos de modelado y solución, tales como diversas opciones de funciones objetivas y restricciones, modelado físico, esquemas de discretización y algoritmos de optimización (Bendsùe & Sigmund, 1999).

Figura 26

Diseño generativo



Nota. Adaptado de *Material interpolation schemes in topology optimization* por Bendsùe & Sigmund, (1999)

4.7 Diseño conceptual

El diseño conceptual es una técnica esencial utilizada en la fase inicial del desarrollo de un chasis de motocicleta eléctrica con el propósito de identificar y corregir posibles defectos y limitaciones antes de su fabricación. En esta etapa, el diseño conceptual equivale a lo que comúnmente se denomina un boceto, que representa una primera visión del diseño. En el ámbito artístico, este proceso se conoce como desarrollo visual, en el cual se plasman visualmente las ideas que preceden a la creación del producto final.

Estas ilustraciones y bocetos permiten no solo presentar una idea inicial, sino también asegurarse de que se cumplan los objetivos iniciales establecidos. Además, ofrecen la

oportunidad de identificar problemas y desafíos que puedan surgir durante la fase de fabricación del chasis, lo que facilita su resolución de manera oportuna. En otras palabras, el diseño conceptual garantiza que el chasis de la motocicleta eléctrica cumpla con los estándares de calidad y eficiencia esperados desde sus primeras etapas de desarrollo.

4.7.1 *Fabricación de la estructura*

La unión de materiales a través de procesos de soldadura se encuentra sujeta a una amplia gama de estándares a nivel mundial, los cuales se van desarrollando progresivamente durante el curso de dicha actividad. Estos estándares son elaborados por la Organización Internacional de Estandarización (ISO), entidad encargada de regular y establecer normativas en el ámbito internacional. Asimismo, resulta relevante destacar la notable participación de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), organismo que tiene su origen en los Estados Unidos y que ejerce una influencia significativa a nivel global (Álvaro, 2020).

4.7.1.1 Soldadura por arco eléctrico

Este proceso se fundamenta en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a dos conductores que inicialmente están en contacto, lo que da lugar al establecimiento de una corriente eléctrica entre ellos. Luego, se procede a separar ambas piezas, generando una chispa que ioniza el aire circundante y, por ende, posibilita la circulación de corriente a través de este espacio, incluso si los conductores ya no mantienen un contacto directo. De este modo, se origina un arco eléctrico entre los conductores, a través de la conversión de energía en forma de energía calórica y luminosa, además, La soldadura con arco eléctrico se destaca por su resistencia, uniformidad y robustez, lo que la hace adecuada para aplicaciones en el campo industrial y automotriz. Esta técnica de soldadura es económicamente eficaz debido a la facilidad de transporte de los equipos requeridos y a la eficiencia del proceso a soldar. (Ochoa Palacios & Salamea González, 2016).

4.7.1.2 Soldadura MIG

La denominada “Gas Metal Arc Welding” (GMAW), también conocida como soldadura a gas y arco metálico, representa un método de soldadura por arco eléctrico que se caracteriza por la utilización de un gas protector junto a un electrodo continuo. La selección del gas inerte varía según las necesidades y puede incluir opciones como el argón, el cual no se emplea en la

soldadura de acero, siendo más adecuado para la unión de piezas de menor tamaño; la combinación de argón con oxígeno, que resulta apropiada para soldar acero inoxidable y mejorar la penetración de la soldadura, el uso del helio que produce cordones de soldadura más amplios, sin embargo, el equipo puede ser costoso y su sistema de enfriamiento inadecuado para aplicaciones de soldadura intensiva, lo que puede resultar en sobrecalentamiento. Además, la soldadura MIG no es apropiada para soldar en posiciones verticales y sobre cabeza debido a la alta generación de calor y la fluidez del baño de fusión, debemos tener en cuenta que las condiciones de viento pueden afectar negativamente la calidad de la soldadura al dispersar el gas protector, en entornos con vientos fuertes, se desaconseja el uso del proceso MIG (Ochoa Palacios & Salamea González, 2016).

4.7.1.3 Soldadura TIG

La soldadura utilizada para unir aleaciones tratadas térmicamente se distingue por su excelencia y se basa en una metodología técnica. Este procedimiento se fundamenta en la generación de un arco eléctrico mediante el uso de un electrodo de tungsteno no consumible, lo que permite establecer una conexión con el metal base. No obstante, la soldadura TIG presenta algunas desventajas. En comparación con otros métodos de soldadura, es un proceso más lento, lo que puede ser problemático en la producción en masa. Además, exige una mayor destreza y experiencia por parte del soldador, ya que implica el control del electrodo y el arco, lo que a su vez puede elevar los costos laborales y limitar su viabilidad en determinados proyectos. Asimismo, su mayor costo en comparación con otros procesos de soldadura se debe a la inversión requerida en equipo y consumibles. (Antunez, 2022).

4.7.2 *Procesos plegados de tubo estructural*

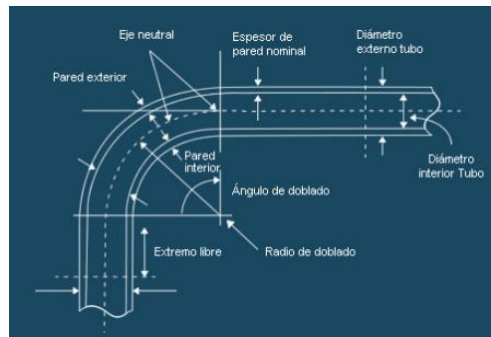
En la fabricación de componentes con formas y paredes delgadas, como las tuberías, existen diversas alternativas para unir las esquinas, como codos comerciales o soldadura. Sin embargo, el método más eficiente y confiable suele ser el proceso de doblado. Este enfoque se centra en evitar la compresión y deformación de la sección de la curvatura de los tubos. El radio de doblado se define como el radio de curvatura del eje neutral del tubo y se mide en grados entre los ejes neutrales de los extremos libres de la curva de la tubería.

Las características clave del tubo utilizado como materia prima incluyen su diámetro interior y exterior, espesor de la pared nominal y posición del eje neutral. El ángulo y el radio

de doblado se determinan según los requisitos específicos del producto que se está fabricando. La Figura 27 presenta una vista de un elemento de sección transversal circular hueco donde se puede identificar la forma de la pared interior y exterior en la zona de la curva. Estas características dependen de factores como el método de doblado y la maquinaria utilizada (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 27

Doblado de tubos



Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

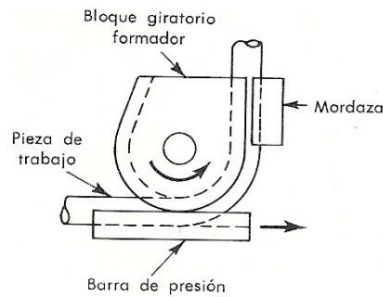
4.7.2.1 Métodos de plegados de tubos

Las técnicas convencionales empleadas en la deformación de tubos incluyen el doblado por estiramiento, el doblado a tracción, el doblado por compresión, el doblado en prensa, el doblado por rodillos y la extrusión por rodillos.

Plegado por estiramiento: El tubo se sujeta utilizando mordazas y se posiciona frente a un dado en movimiento que ejerce fuerza sobre el metal, dando forma a la curva deseada. Para garantizar la estabilidad de la pieza de trabajo al ingresar al dispositivo de doblado, se utiliza una barra de presión, como se observa en la Figura 28. Este procedimiento se aplica ampliamente en la manipulación de tubos con paredes delgadas y para lograr radios de curvatura reducidos (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 28

Doblado por estiramiento

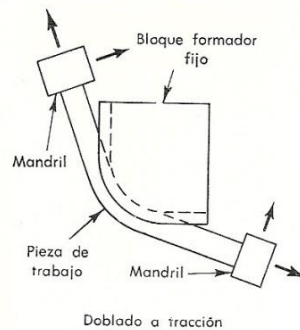


Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una maquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegado por tracción: En este enfoque, se aplica una fuerza de tracción a ambos extremos del tubo mientras se dobla sobre un dado conformador. Se puede observar una representación esquemática de este proceso de la Figura 29 verificando el método más adecuado para radios de curvatura amplios y es especialmente útil cuando se requieren curvas que no son perfectamente circulares (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 29

Doblada a tracción

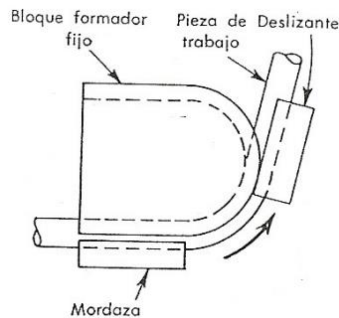


Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una maquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegado por comprensión: en este método, se asegura el tubo de trabajo mediante una mordaza, y luego se lo guía para que se curve alrededor de un dado formador fijo utilizando una mordaza deslizante, como se ilustra en la Figura 30. Esta técnica posibilita la realización de secuencias de curvaturas que se aproximan sin dejar apenas espacios vacíos entre ellas (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 30

Doblado por comprensión



Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una maquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegado en prensa o por flexión pura: se logra una curvatura aplicando presión mediante un dado formador en un movimiento específico. El tubo se sustenta mediante dos dados separados que giran mientras el formador se desplaza hacia el centro, empujando el tubo y logrando que se envuelva alrededor del dado formador. Esta técnica permite que los dados en los extremos brinden soporte al tubo en ambos lados, como se representa en la Figura 31. Aunque este proceso es altamente eficiente y adecuado para producciones a gran escala, es necesario cambiar los dados o su configuración para obtener diferentes tipos de curvas (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 31

Doblado en prensa



Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una maquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegado por rodillos: En este método se emplea tres dados cilíndricos para configurar la curvatura deseada. Esta técnica se utiliza principalmente para crear curvas con radios amplios y para enrollar tuberías en forma de serpentín, tal como se representa en la Figura 32. La curva se genera cuando el dado central superior se ajusta al tubo, mientras que los dos dados inferiores, uno a la izquierda y otro a la derecha, giran simultáneamente en una dirección y luego en la dirección opuesta según sea necesario (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 32

Doblado a tres rodillos



Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegados manuales: son dispositivos que incorporan un sistema de dado único que facilita el proceso de doblado al tirar de una palanca, generando 10 grados de curvatura con cada movimiento como se aprecia su funcionamiento en la Figura 33. Están diseñadas para doblar tubos con un diámetro máximo de 1 pulgada y son versátiles, permitiendo el doblado de tubos redondos o cuadrados, tuberías, ángulos perfilados en acero de bajo carbono y varillas macizas (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 33

Dobladora manual

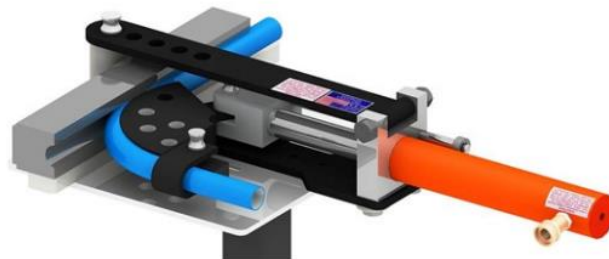


Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

Plegados hidráulicos: se caracteriza por su diseño especial que simplifica el proceso de cambio de dados y tubos. Su construcción está diseñada para ofrecer una larga durabilidad, como se puede apreciar en la Figura 34. Tiene una capacidad máxima para doblar tubos de hasta $\frac{3}{4}$ de pulgada y cuenta con una función de auto bloqueo que permite realizar dobleces de manera repetitiva de manera eficiente (Zuluaga Bermúdez, 2019).

Figura 34

Plegados hidráulicos



Nota. Adaptada de *Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda*, por Arias Duque & Mena Mejía, (2009).

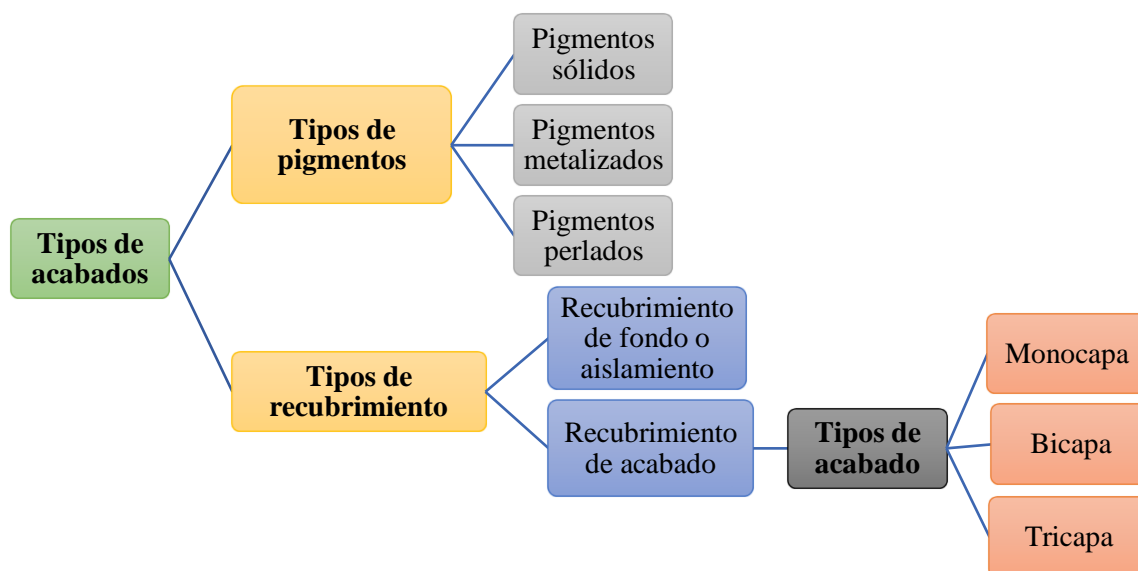
4.7.3 Acabados

Como un paso final del proceso de fabricación que asegure la durabilidad de los componentes mecánicos, por problemas de corrosión, agentes químicos, se ha desarrollado una descripción del recubrimiento de vehículos y la clasificación según la cantidad de capas

impregnadas en la superficie, que van desde la colocación de la capa base hasta el barniz y pulido. En la industria automotriz, prevalecen tres tipos principales de sistemas de recubrimiento: monocapa, bicapa conforme se detalla en Figura 35. Es crucial tener en cuenta estas opciones de acabado al identificar el tipo de recubrimiento en un automóvil, ya que esto es esencial para el éxito de procesos relacionados con la fabricación y el mantenimiento en la motocicleta. Este conocimiento desempeña un papel fundamental en la industria automotriz.

Figura 35

Acabados de recubrimiento



Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

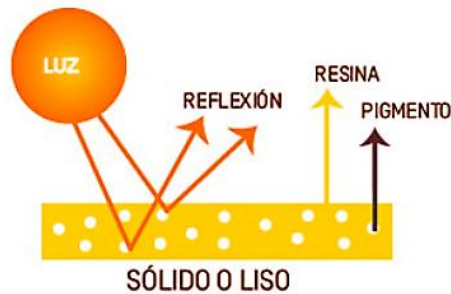
4.7.3.1 Tipos de pigmentos en pinturas

Para una comprensión más completa de las capas que forman el revestimiento de pintura en un vehículo, es fundamental analizar la composición y las propiedades de estas capas. En términos generales, la pintura automotriz se compone principalmente de dos elementos clave: los pigmentos, que determinan el color del recubrimiento, y el brillo, que se origina a través de la resina incorporada en la pintura. Esto proporciona una base fundamental para el estudio detallado de la pintura automotriz como los pigmentos sólidos, especiales, metalizados, perlados.

Pigmentos sólidos: Los pigmentos son sustancias compuestas por partículas tanto orgánicas como inorgánicas que exhiben una notable opacidad y capacidad de cobertura, cualidades esenciales en la formulación de pinturas, como se ilustra en la Figura 36. Estos pigmentos tienen la ventaja de posibilitar la creación de una amplia gama de tonalidades y colores acromáticos sin distorsiones, abarcando desde los colores primarios hasta los secundarios.

Figura 36

Pigmentos sólidos

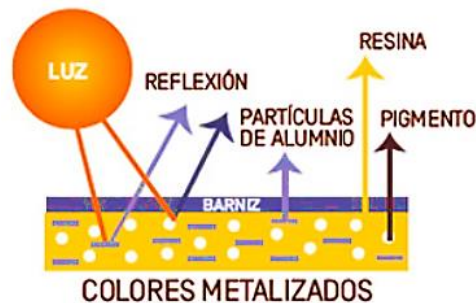


Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

Pigmentos metálicos: son utilizadas en la composición de pinturas para conferirles mayor opacidad y un aspecto metálico en el caso del aluminio. La variación en el tamaño de estas partículas, ya sea fino, medio o grueso, influye en la reflexión y en la forma que adquiere la superficie de la pintura como se demuestra en la Figura 37. Esto puede resultar en una reflexión irregular o lenticular, especialmente notable en colores que presentan un brillo más intenso.

Figura 37

Pigmentos metálicos

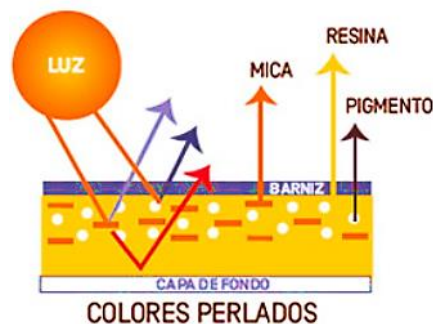


Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

Pigmentos perlados: Estos pigmentos se componen de partículas naturales brillantes conocidas como "MICA", las cuales están recubiertas con óxidos metálicos, como el titanio, como se observa en la Figura 38. La cantidad de capas de recubrimiento de óxidos metálicos determina diversos fenómenos, incluyendo interferencia, absorción y reflexión, que caracterizan la apariencia y propiedades de estos pigmentos.

Figura 38

Pigmentos perlados



Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

4.7.3.2 Tipos de recubrimiento

Dentro del proceso del pintado de vehículos, es habitual categorizar las pinturas empleadas en tres grupos principales según su posición en la capa de pintura final: recubrimiento de fondo, de acabado y el barniz, esta distinción es fundamental en el proceso de pintura automotriz.

Recubrimiento de fondo o aislamiento: La pintura de fondo, que se aplica como la primera capa, cumple una función de brindar protección al sustrato metálico del vehículo y crear la superficie adecuada para que la pintura de acabado se adhiera correctamente. Un proceso de aplicación incorrecto de esta pintura puede tener repercusiones significativas en la pintura de acabado, afectando su uniformidad, capacidad de cobertura y potencialmente dando lugar a defectos en la superficie.

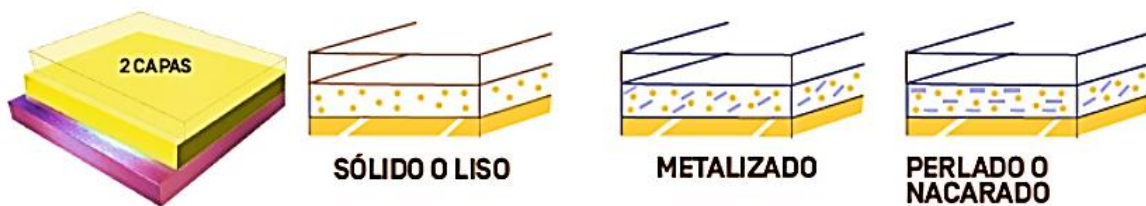
Recubrimiento de acabados: La pintura de acabado es la última capa de pintura que se encuentra en la superficie de un vehículo. Su principal propósito es proporcionar color, brillo y

efectos visuales para restaurar y replicar la apariencia original del automóvil. Además de su función estética, esta pintura también actúa como una barrera protectora contra posibles daños superficiales causados por agentes químicos o mecánicos. Para una clasificación más detallada de los sistemas de acabados, se consideran el número de capas que contienen.

- **Acabado monocapa:** El acabado monocapa es un tipo de pintura que se logra aplicando una única capa, como se ilustra en la Figura 39. En esta capa, se integran todos los elementos necesarios, incluyendo el color, el nivel de brillo, la resistencia química, mecánica y a los rayos ultravioleta. Esta capa posee todas las características estéticas y protectoras requeridas para la pintura final del vehículo. Entre sus ventajas se destacan la rapidez en su aplicación, su alta durabilidad y su costo más económico. Sin embargo, presenta desventajas como una menor resistencia química y una gama de colores más limitada en comparación con otros sistemas de acabado, aunque todavía es posible obtener colores metalizados o perlados, aunque en menor cantidad.

Figura 39

Recubrimiento de acabado monocapa

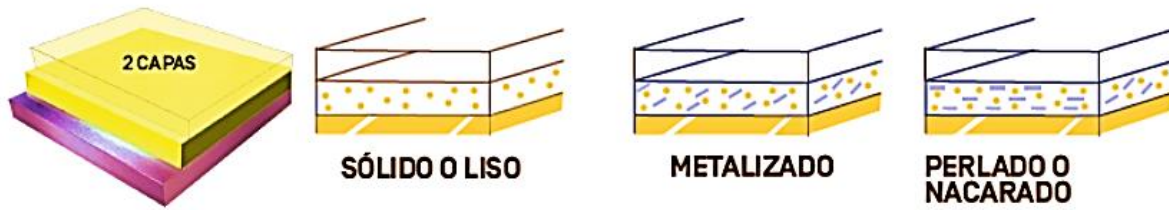


Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

- **Acabados bicapa:** es un método ampliamente utilizado en la industria automotriz y otras aplicaciones que consta de dos capas distintas: la primera proporciona color y efectos estéticos, mientras que la segunda aporta brillo y resistencia química y mecánica. Es rápido y rentable, ofrece una amplia gama de colores y permite personalización, pero es más costoso y complejo de aplicar que la pintura monocapa. Hay varios tipos de acabados bicapa, incluyendo efecto sólido, metalizado y perlado como se aprecia en la Figura 40, siendo este último el más común en la industria automotriz debido a su capacidad para lograr efectos visuales atractivos y únicos en las superficies tratadas.

Figura 40

Recubrimiento de acabado bicapa

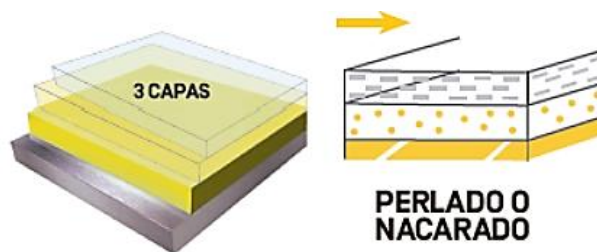


Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

- **Acabados tricapa:** es un proceso compuesto por tres estratos: color de fondo, color de efecto y el barniz. Es transparente y permite la transmisión de luz y la reflexión del fondo como se observa en la Figura 41. Este sistema ofrece colores vibrantes, efectos visuales y reflejos excepcionales debido a la estratificación de capas y la transparencia de la capa intermedia. Sin embargo, tiene desventajas económicas, ya que es costoso de implementar, y su igualación precisa en diferentes aplicaciones es más compleja en comparación con otros métodos de acabado disponibles en el mercado.

Figura 41

Recubrimiento de acabado tricapa



Nota. Adaptado de *Tipos de acabado de la pintura automotriz* por AutoCrash, (2018)

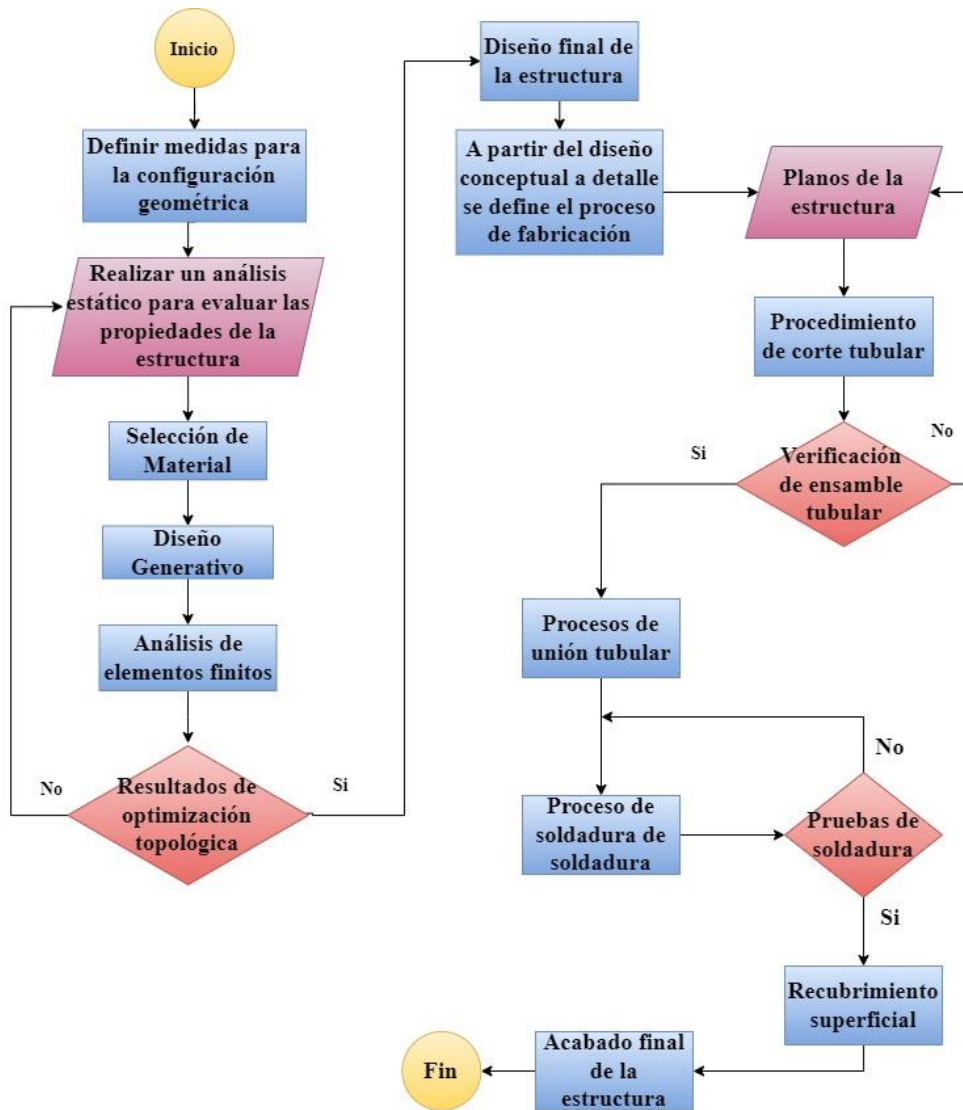
5. Metodología.

5.1 Metodología y construcción del chasis de la motocicleta eléctrica

La metodología empleada en el diseño y construcción del chasis de una motocicleta eléctrica es un proceso fundamental que involucra diversas etapas cruciales como se muestra en la Figura 42, así mismo, se describen en detalle los pasos típicos involucrados en este proceso de diseño y construcción.

Figura 42

Metodología a emplear en el trabajo de la investigación



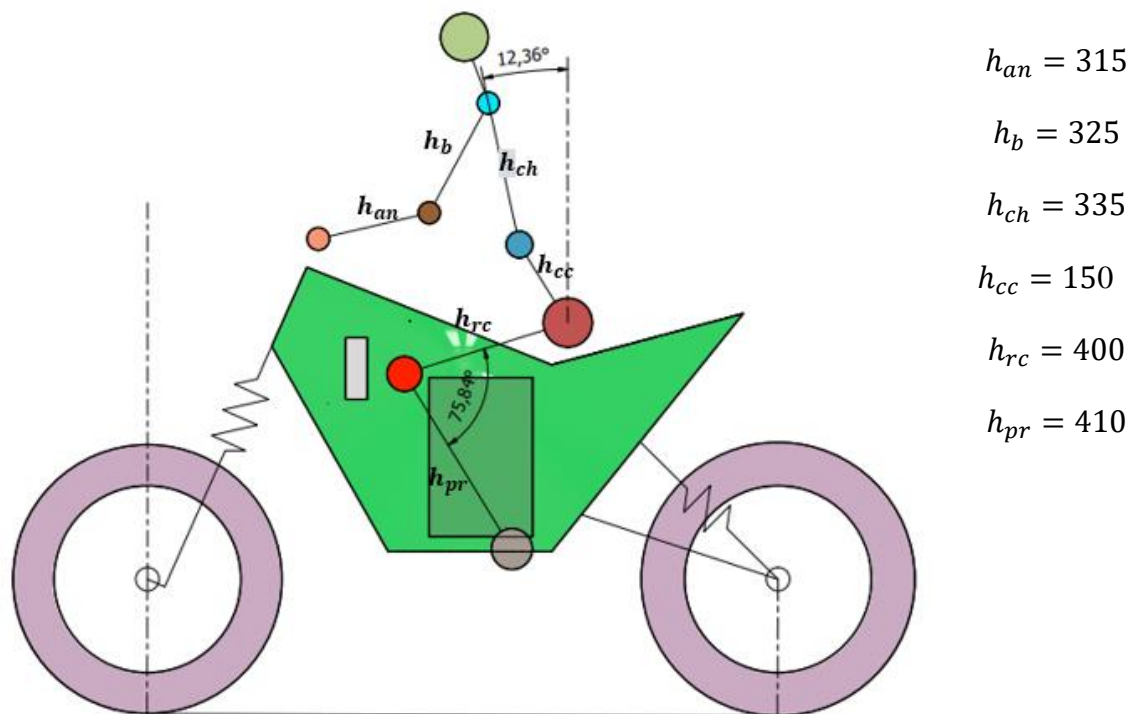
Nota. En la figura presente se ilustra la metodología que se seguirá en el desarrollo del proceso de trabajo de titulación. Fuente. Autor

5.1.1 Análisis de la posición del conductor

Con relación a los datos antropométricos, se han definido la posición del conductor para una definición ergonómica, considerando la posición del conductor establecida en la norma SAE J826. En el análisis de las posturas del conductor, se han identificado aquellas que generan mayor incomodidad o malestar durante la conducción. En este sentido, la posición sentada se posiciona como un factor de mayor incidencia para lograr una postura adecuada, tal y como se ilustra en la Figura 43, dado que, en muchos casos, el tiempo de conducción en motocicletas se extiende considerablemente debido a las distancias que deben recorrerse para alcanzar el destino deseado.

Figura 43

Presentación de las posiciones fundamentales del conductor



Nota. Esta figura presenta un análisis ergonómico de las posturas de conducción en el diseño de la motocicleta. Fuente: El Autor.

5.2 Acciones dinámicas y estáticas del bastidor

5.2.1 Centro de gravedad

El cálculo del centro de gravedad se inició utilizando una base de datos de motocicletas clasificadas según AEADE, (2022). Estas categorías incluyen vehículos destinados al transporte y trayecto urbano, así como motocicletas turísticas diseñadas para recorridos largos que cumplen con los requisitos de estabilidad según la Norma RTE INEN 136, (2017). Dicho reglamento técnico es aplicable a todas las motocicletas y tricars importados, ensamblados y comercializados en Ecuador. La información sobre las características geométricas de los modelos que cumplen con estos criterios se presenta en la Tabla 6 y sirve como punto de partida para el análisis del centro de gravedad.

Tabla 6

Especificaciones generales de motocicletas

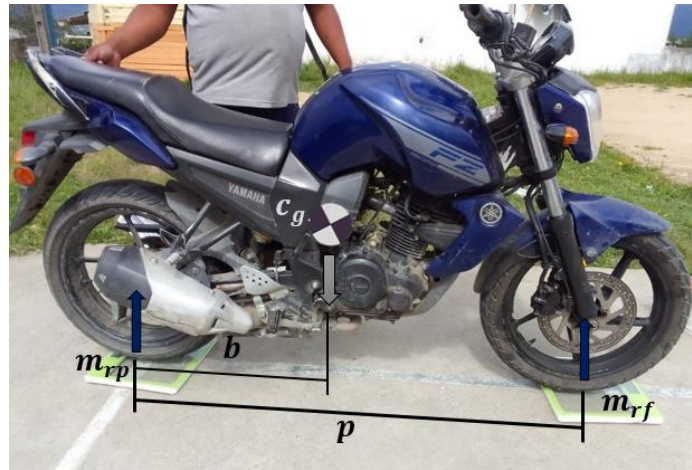
Especificaciones	Motocicleta 1	Motocicleta 2	Motocicleta 3
	Longitud	Longitud	Longitud
Longitud total	2015 mm	1895 mm	1955 mm
Ancho	770 mm	703 mm	740 mm
Distancia entre ejes	1360 mm	1320 mm	1350 mm
Altura del asiento	795 mm	198 mm	790 mm
Altura total	1075 mm	1065 mm	1045 mm
Neumático delantero	100/80-17	90/80-17	90/80-17
Neumático posterior	140/70-17	110/70-17	110/70-17
Masa total de la moto	146 kg	118 kg	132 kg

Nota. Parámetros a considerar para el cálculo del centro de gravedad de la motocicleta.

Basándonos en las comparaciones de valores proporcionados en la Tabla 6, se determinaron valores promedio teniendo como referencia el modelo de motocicleta clásica ilustrado en la Figura 44, el cual se adapta a diversas medidas de peso, centro de masa, distancia entre ejes y altura del vehículo de dos ruedas que se encuentran en la Tabla 7.

Figura 44

Centro de gravedad en la posición longitudinal



Nota. En la figura que se presenta, se realiza la medición de la masa de la motocicleta a lo largo de su eje longitudinal con el propósito de calcular el centro de gravedad en esa dimensión específica. Fuente: Autor

Par la determinación del centro de gravedad en dirección longitudinal, se ha considerado los valores referenciales de motor con categorías similares. Las especificaciones detalladas en la Figura 45, conjuntamente con la ecuación (1), permiten determinar la posición en la dirección horizontal del centro de masa dándonos como resultado $619,77 \text{ mm}$ en la posición longitudinal del centro de gravedad.

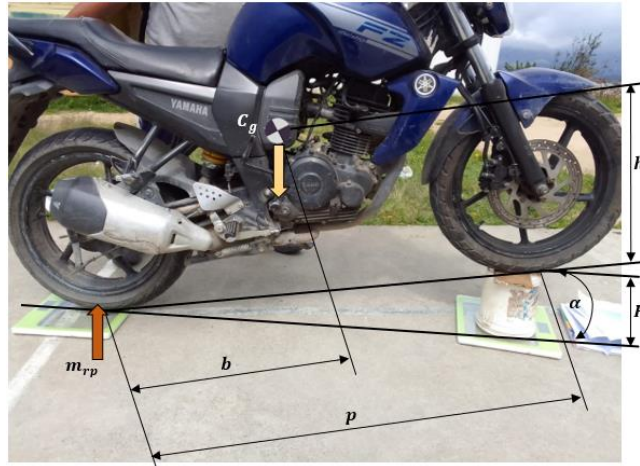
La determinación de la altura del centro de gravedad se logra mediante la aplicación de las ecuaciones (2) y (3), como se detalla en la sección 4.3.3 del presente estudio. Este procedimiento requiere la medición del peso de la motocicleta en una posición inclinada para determinar la altura del centro de gravedad, dándonos un valor de $500,23 \text{ mm}$, tal como se representa gráficamente en la Figura 44. A través de las ecuaciones (36) y (37), que se presentan a continuación en el texto, es posible calcular que el 45.6% del peso total se encuentra distribuido en la rueda delantera, mientras que el 54.3% restante se distribuye en la rueda posterior.

$$\% \text{ carga frontal} = \frac{m_{rf}}{m_{total}} \quad (36)$$

$$\% \text{ carga frontal} = \frac{m_{rp}}{m_{total}} \quad (37)$$

Figura 45

Altura del centro de gravedad



Nota. En la figura presentada, se efectúa la evaluación de la masa de la motocicleta a lo largo de su eje vertical con la finalidad de determinar la ubicación del centro de gravedad en el eje z. Fuente: Autor

Tabla 7

Dimensiones obtenidas a partir de modelo establecido

Dimensiones	Longitud
Longitud total	1955 mm
Altura total	1045 mm
Altura del asiento	790 mm
Distancia entre ejes	1350 mm
Neumático delantero	90/80-17
Neumático posterior	110/70-17
Altura de elevación de la moto (H)	200 mm
Masa de la rueda frontal	60,6 kg
Masa de la rueda posterior	72,2 kg

Masa del piloto	90 kg
Masa total de la moto	132 kg
Masa frontal inclinada	64 kg
Masa posterior inclinada	73,2
Centro de gravedad Longitudinal	619,77 mm
Centro de gravedad vertical	500,23 mm
Distribución del centro de masa en la rueda delantera	45,6 %
Distribución del centro de masa en la rueda posterior	54,3 %

Nota. En la tabla presente se exponen los datos derivados del modelo establecido con el propósito de abordar el diseño geométrico. Fuente: Autor

5.2.2 *Diseño geométrico*

En esta sección, se procederá a detallar la metodología destinada a abordar el diseño geométrico de motocicletas, haciendo un hincapié en la relevancia de dicho diseño para alcanzar los objetivos fundamentales de estabilidad, maniobrabilidad y seguridad en el vehículo. Los objetivos se organizarán de forma sistemática e incluirán la mejora de la estabilidad en la dirección, el incremento de la agilidad en las maniobras y la garantía de la seguridad del conductor.

La distancia entre ejes, se refiere a la separación entre los puntos de contacto de las ruedas de una motocicleta con la superficie de la carretera. Según Cossalter, (2006) establece una distancia entre ejes de 1350 mm, un ángulo de giro de 25° y un Trail de 100 mm. Estos parámetros son significativos debido a su influencia en la estabilidad y maniobrabilidad de las motocicletas de turismo, y se implementan con el propósito de mejorar el comportamiento de manejo de la motocicleta, particularmente a altas velocidades.

Las motocicletas de turismo exhiben un mayor Trail con el propósito de garantizar estabilidad en carreteras y terrenos irregulares, lo que se traduce en una mayor estabilidad direccional y una respuesta rápida durante las maniobras de giros y dirección. Un Trail de cero generalmente no es una configuración segura o deseable para una moto. El Trail es un parámetro importante en el diseño de las motocicletas y afecta la estabilidad y la manejabilidad. Un Trail

muy pequeño o cero puede hacer que la moto sea inestable y difícil de controlar, especialmente a altas velocidades.

A través del valor fijado para el Trail, procedemos a explorar el efecto del offset o desplazamiento de horquilla (d), que corresponde a la distancia entre el centro de la rueda y el eje del cabezal de dirección como se muestra en la ecuación (38). La consideración de este desplazamiento se basa en la búsqueda de una mayor estabilidad a altas velocidades, dado que no se logra este objetivo en las motocicletas que carecen de dicho desplazamiento de horquilla

$$d = R_f * \sin(\theta) - \cos(\theta) * a \quad (38)$$

Estos parámetros posibilitan el cálculo del normal trail (a_n), que representa la distancia perpendicular desde el punto de contacto hasta el eje del cabezal de dirección de la motocicleta, tal como se expresa en la ecuación (39). La consideración de este parámetro se fundamenta en la influencia directa de la estabilidad de una motocicleta durante la conducción en línea recta a velocidades normales. Un normal trail apropiadamente configurado contribuye a mantener la motocicleta en una trayectoria recta y previene desviaciones o inestabilidades no deseadas.

$$a_n = R_f * \sin(\theta) - d \quad (39)$$

El normal trail posterior (b_n) desempeña un papel fundamental en la preservación de la estabilidad de la motocicleta en situaciones de aceleración y frenado, tal como se evidencia en la ecuación (40). La consideración de este parámetro es esencial para la determinación de un normal trail posterior apropiado, dado que su influencia se traduce en la prevención del levantamiento de la parte delantera de la motocicleta durante la aceleración o el hundimiento durante el frenado abrupto, circunstancias que podrían desencadenar la pérdida de control del vehículo.

$$b_n = (p + a) \cos(\theta) \quad (40)$$

La obtención de los datos previamente establecidos se refleja en las ecuaciones que establecen las condiciones para el diseño geométrico. Esto se logra mediante la nomenclatura de los neumáticos delantero (90/80-17) y trasero (110/70-17). Para considerar el radio del neumático, se suma el radio de la llanta a la altura del neumático. Con este parámetro, se calcula

el radio del círculo central del eje delantero, como se demuestra en la ecuación (41), y posteriormente en la ecuación

(51) se determina el radio del círculo central del eje posterior.

$$\rho_f = R_f - t_f \quad (41)$$

$$\rho_r = R_r - t_r \quad (42)$$

Se ha definido la estructura del neumático y se han detallado los parámetros correspondientes en la Tabla 8. Estos elementos guardan una relación directa con la representación gráfica presentada en la Figura 46, lo que contribuye a la comprensión del proceso utilizado para calcular los valores de los parámetros geométricos que serán considerados en la configuración del diseño de la motocicleta eléctrica.

Tabla 8

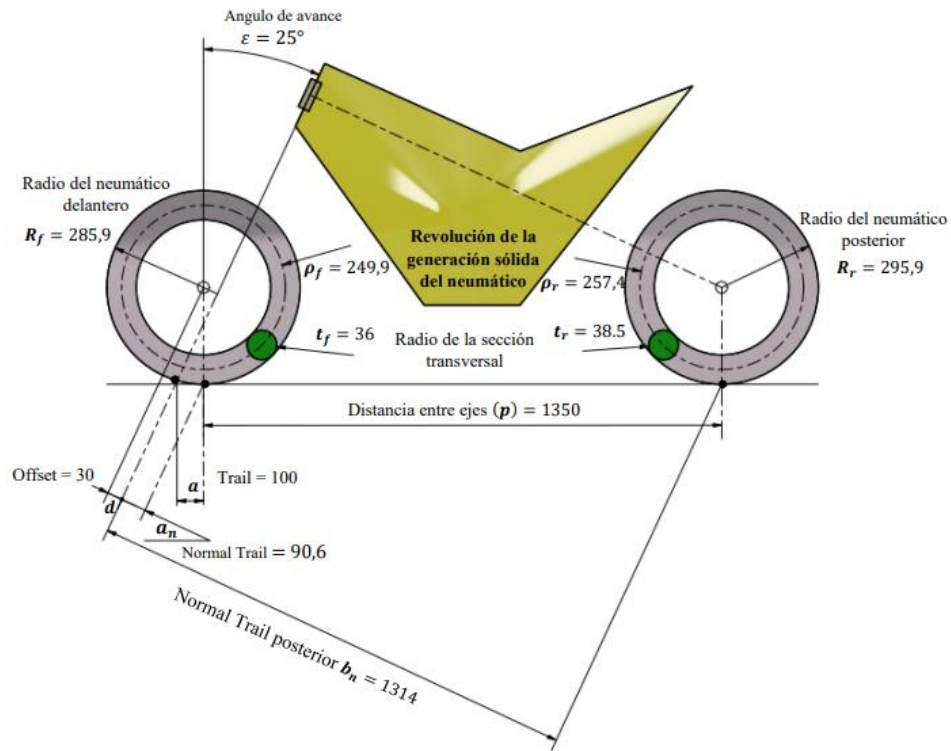
Parámetros para la geometría

Parámetros geométricos	Datos
Distancia entre ejes (p)	1350 mm
Trail (a)	100 mm
Angulo de avance (θ)	25°
Radio de la rueda delantera (R_f)	295,9 mm
Radio de la rueda trasera (R_r)	285,9 mm
Radio de la sección transversal del neumático trasero (t_r)	38.5 mm
Radio de la sección transversal del neumático delantero (t_f)	36 mm

Nota. Parámetro geométricos considerados para el diseño de la geometría del chasis, representada de AEADE, (2022).

Figura 46

Acciones dinámicas de la geometría



Nota. Parámetros geométricos de la motocicleta. Fuente: Autor

5.2.3 Acciones estáticas

En el análisis estático del chasis de la motocicleta eléctrica, se efectúa la consideración de las masas puntuales correspondientes a cada uno de los componentes que integran el vehículo de dos ruedas. Este procedimiento tiene como finalidad la evaluación de la capacidad de resistencia del chasis ante deformaciones producidas por cargas estáticas, con el propósito de garantizar su estabilidad y rendimiento óptimo. Para llevar a cabo esta tarea, se emplean datos ergonómicos que respaldan la dimensión física de los componentes, y se examinan las fuerzas actuantes en puntos críticos del chasis.

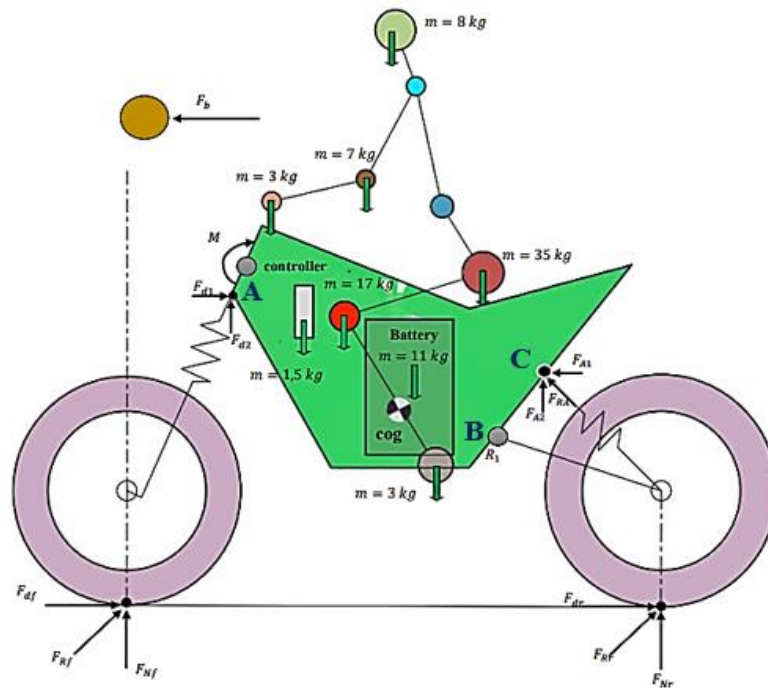
En las simulaciones, se contemplan las cargas que actúan en diversas ubicaciones dentro del chasis, tratándolas como cargas concentradas. Estas cargas incluyen la masa del conductor (70 kg), la batería (11 kg) y el controlador (1.5 kg). Además, se consideran otros elementos, como el peso del carenado y los componentes de la dirección, con el propósito de mantener un equilibrio adecuado y asegurar la estabilidad del vehículo.

Durante el análisis, se identifican tanto fuerzas axiales como fuerzas de flexión que impactan en la integridad del chasis. Para llevar a cabo esta evaluación, se emplean simulaciones utilizando el software ANSYS, permitiendo una evaluación exhaustiva del efecto de estas fuerzas en la estructura del chasis.

En el análisis, se ha empleado un diagrama de cuerpo libre como herramienta gráfica para representar de manera precisa las fuerzas externas que inciden en el bastidor, como se evidencia en la Figura 47. En el punto A, se consideran las cargas estáticas en la dirección correspondiente, en el punto B, se establecen soportes fijos debido a la existencia del basculante, y en la zona C, se toman en cuenta las cargas vinculadas a la suspensión. El objetivo principal de estas simulaciones consiste en garantizar que el chasis cumple con los requisitos de resistencia necesarios para asegurar un desempeño seguro y confiable de la motocicleta eléctrica.

Figura 47

Distribución de cargas y masas puntuales



Nota. Para obtener resultados precisos, se consideran las cargas distribuidas en el chasis. Fuente. Autor

5.3 Selección del material

La selección de elementos estructurales se basa en cargas reales que incluyen modos de carga axial, flexión y torsión. El objetivo principal de esta selección es optimizar la relación entre la masa del bastidor y su capacidad de resistencia y rigidez. Para limitar los efectos inerciales generados por los componentes del chasis, se ha considerado la utilización de secciones transversales circulares, lo que contribuye a la minimización de problemas relacionados con la inercia en la estructura. Además, la disponibilidad de procesos de fabricación ha llevado a la definición de uniones fijas y elementos circulares con secciones transversales uniformes a lo largo de su longitud. Estos parámetros se pueden implementar mediante diagramas de Ashby, entre otras características.

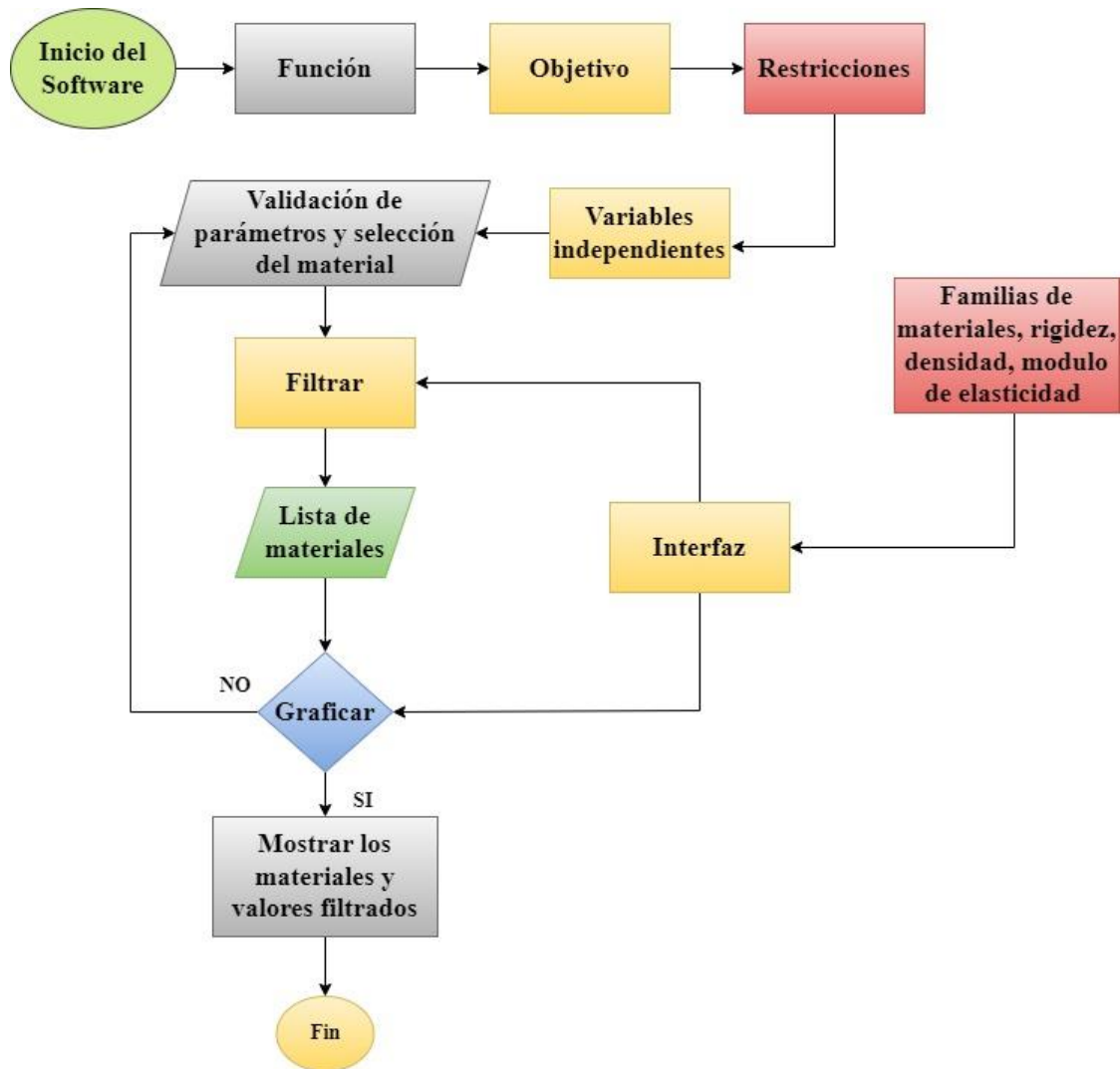
La Figura 48 representa el proceso de trabajo que se inicia a partir de una herramienta computacional, como en el caso de CesEduPack, que dispone de una versión que incluye una base de datos que contiene una variedad de materiales.

El diagrama de diseño incluye parámetros iniciales relacionados con la función del componente, como la capacidad de soportar cargas y mantener una alta rigidez. El objetivo principal es lograr que el material sea ligero, al mismo tiempo que se maximiza su rigidez y se minimiza su masa, todo ello teniendo en cuenta las restricciones de dimensiones fijas. Además, se deben garantizar que el componente pueda resistir las cargas o presiones previstas sin sufrir fallos.

Para lograr esto, se introducen variables independientes que permiten la selección adecuada del material, el área y forma de la sección transversal. Estos parámetros se utilizan para filtrar y evaluar los materiales en función de su elasticidad, con el propósito de obtener resultados que indiquen los materiales más apropiados para la construcción del bastidor.

Figura 48

Diagrama de flujo para la selección de materiales



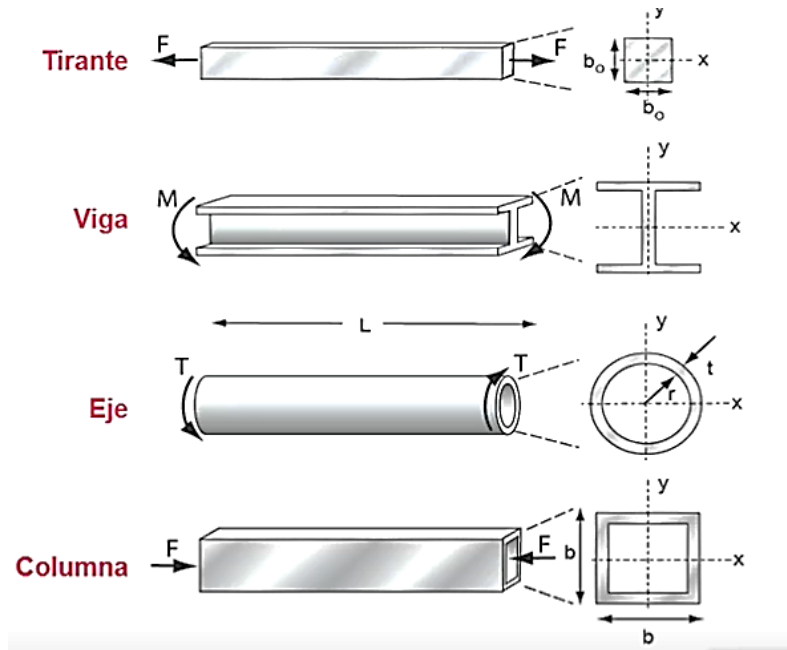
Nota. Diagrama de flujo de trabajo dentro del software CesEduPack. Fuente: Autor.

5.3.1 Etapa de selección

Para llegar a la determinación del material apropiado, se necesita incorporar parámetros adicionales relacionados con componentes estructurales, tal como se observa en la Figura 49. En el estudio de selección de materiales, se optó por utilizar un componente estructural en forma de eje de tubo de hueco debido a su capacidad sobresaliente para resistir las fuerzas de torsión en comparación con otros perfiles estructurales. Además, se consideró el área de la sección transversal, ya que una mayor área conlleva a una mayor rigidez.

Figura 49

Componentes estructurales

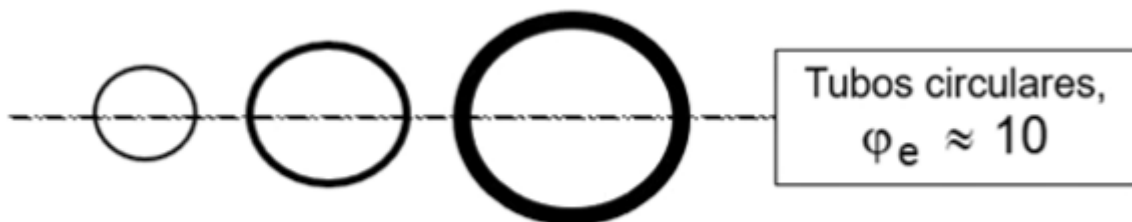


Nota. Componentes estructurales para la selección del material. Reproducida de (Ashby, 2016).

En este caso específico, al evaluar el factor de forma, que es un indicador unidimensional de la deformación, como se ilustra en la Figura 50, se obtiene una eficiencia aproximada de 10 ($\varphi_e \approx 10$). Esto implica que cada uno de los perfiles es aproximadamente 10 veces más rígido en flexión que las secciones sólidas alternativas. Es relevante recordar que, cuando los materiales se someten a esfuerzos de flexión y torsión, la forma de la sección es un factor crítico debido a la eficiencia de la forma, que refleja la cantidad de material necesaria para resistir la carga aplicada (Ashby, 2016).

Figura 50

Tubos circulares



Nota. Los tubos circulares son seleccionados como la opción material preferida debido a su capacidad para ofrecer una mayor resistencia a la torsión. Reproducida de (Ashby, 2016).

En la fase de selección de materiales, se da prioridad a la optimización del esfuerzo (σ_e) y la minimización de la densidad (ρ), teniendo en cuenta factores como la rigidez (k), la fuerza (F), y la longitud del material (L). Esto se refleja en la ecuación (43) de cargas axiales, donde se emplea como criterio para la maximización como se observa en la ecuación

(51). El objetivo es encontrar materiales que ofrezcan una alta rigidez sin aumentar excesivamente el peso.

$$m_1 = k \cdot F \cdot L \left(\frac{\rho}{\sigma_e} \right) \quad (43)$$

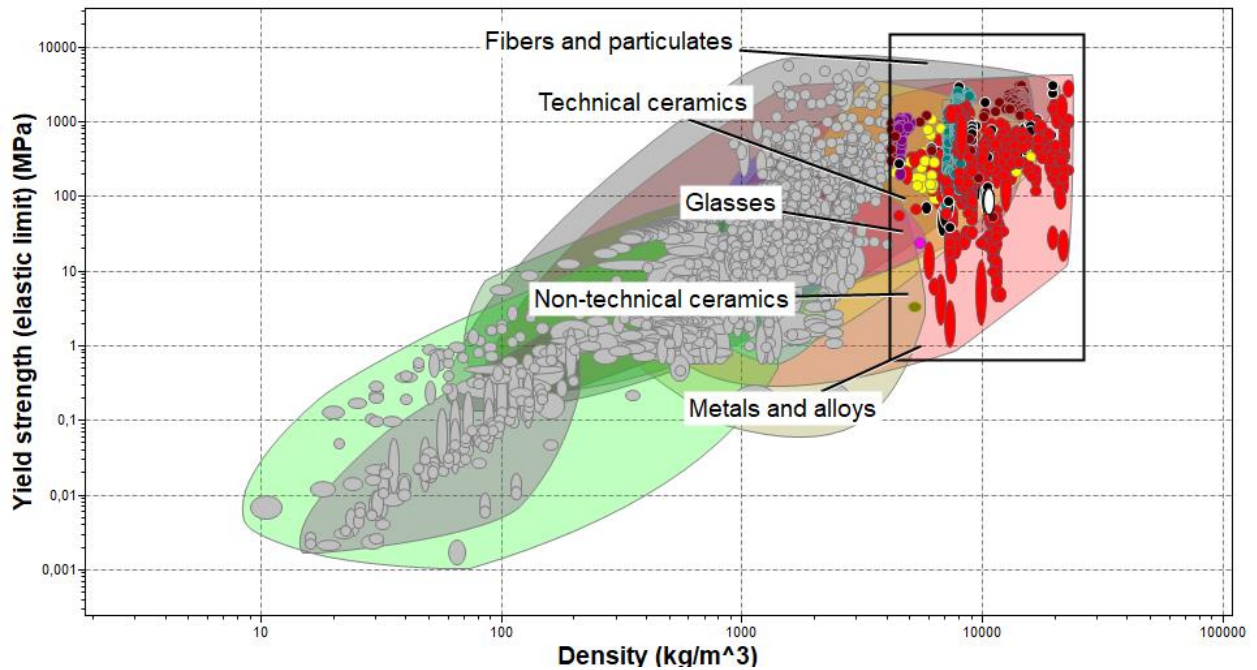
$$M_1 = \frac{\sigma_e}{\rho} \quad (44)$$

Para llevar a cabo esta selección, se recurre al diagrama de Ashby, el cual evalúa la relación entre la deformación elástica y la densidad, tal como se muestra en la Figura 51. Este diagrama sugiere que algunos materiales, como cerámicos térmicos, fibras y partículas, metales y aleaciones, cerámica no térmica y materiales naturales, cumplen con los requisitos debido a su combinación de deformación elástica y baja densidad. No obstante, se reconoce que estos materiales pueden tener limitaciones en términos de soldabilidad.

Por lo tanto, se enfoca la atención en los metales y aleaciones, que, aunque tienen una mayor densidad en comparación con los materiales mencionados previamente, ofrecen ventajas significativas en cuanto a soldabilidad y otras propiedades esenciales para el proyecto.

Figura 51

Optimización de la capacidad de resistencia de la deformación de materiales



Nota. En esta representación gráfica, se ilustra la fase inicial del proceso de optimización en la que se han aplicado restricciones concernientes a las propiedades de los materiales, particularmente enfocadas en el límite elástico en relación con la densidad. Fuente: Autor

En la etapa de definición de los límites de la familia de materiales, se aplicaron restricciones de diseño que abordaron aspectos críticos, tales como las propiedades mecánicas, la facilidad de mecanizado y la capacidad de soldadura. La selección de materiales se basó en el análisis de los esfuerzos de flexión, teniendo en cuenta el módulo de Young (E) y la minimización de la densidad (ρ), considerando la rigidez (k), la fuerza (F), la longitud del material (L), y el área de la sección transversal definida por (w) y (b). Esto se refleja en la ecuación (45) utilizada como criterio para la maximización, como se describe mediante la ecuación

(51).

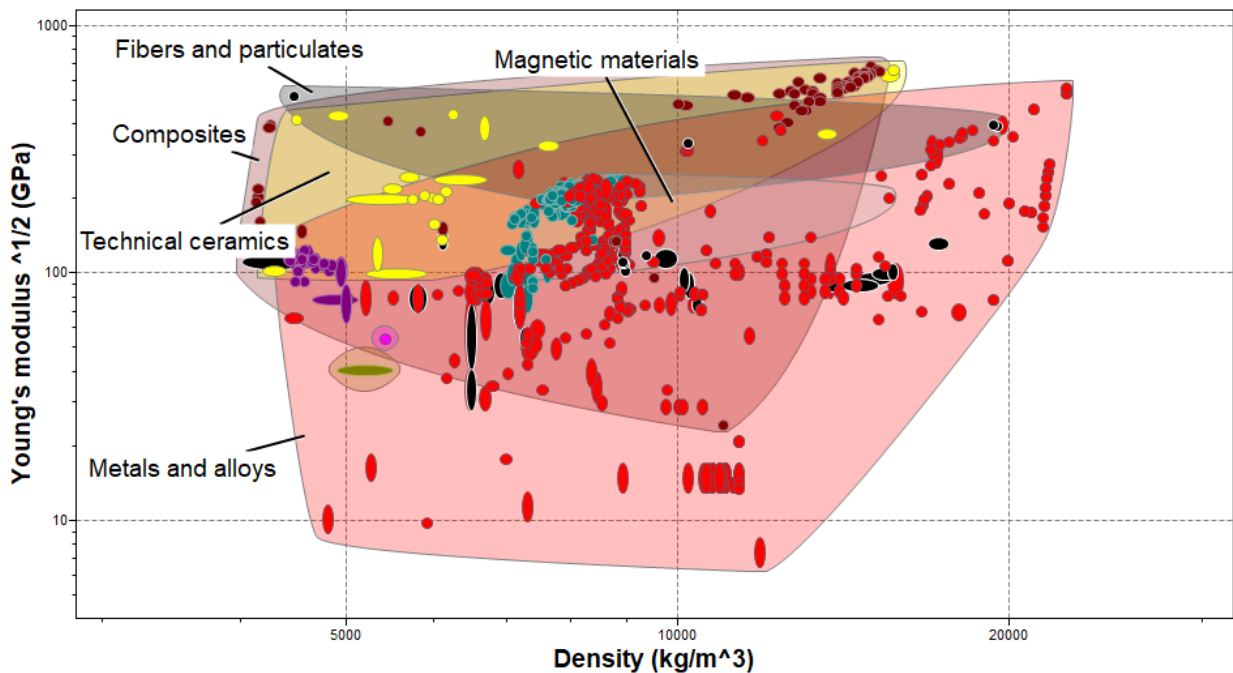
Este proceso de selección resultó en una cuidadosa elección de materiales. A partir de un conjunto inicial de 4026 materiales evaluados, únicamente 1526 cumplieron de manera adecuada con los rigurosos requisitos establecidos para la concepción y ejecución del diseño estructural, como se representa en la Figura 52. Estos materiales abarcan una variedad que incluye propiedades magnéticas, compuestos, cerámica térmica, así como metales y aleaciones.

$$m_2 = k \left(\frac{12F}{\pi^2} \right)^{-1/2} \cdot w \cdot b^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (45)$$

$$M_2 = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (46)$$

Figura 52

Módulo de flexión entre la densidad



Nota. Esta imagen ejemplifica el resultado de la selección de materiales en función de la relación entre el módulo de Young y la densidad. Fuente: Autor

En la fase de selección de materiales, se tuvieron en cuenta parámetros adicionales, como se mencionó anteriormente, lo que implicó la evaluación de las cargas de torsión en relación con el módulo de corte ($G^{1/2}$), que se deriva de las fuerzas de torsión, considerando

la densidad (ρ), Esta relación se expresa mediante la ecuación (47), lo que nos permite determinar la maximización del módulo de corte representado en la ecuación

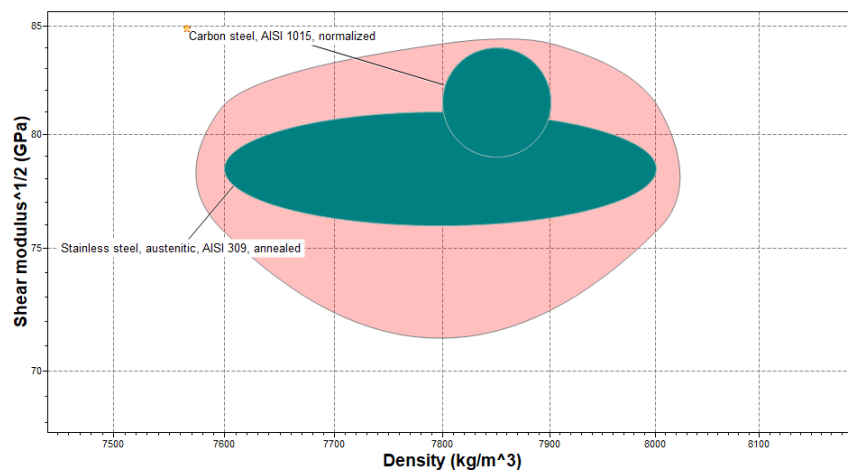
(51). La Figura 53 proporciona una representación gráfica de este análisis y muestra que solo dos materiales cumplen con los criterios previamente establecidos.

$$M = \frac{G^{2/3}}{\rho} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{2 T}\right)^{2/3} \pi \cdot l \quad (47)$$

$$M = \frac{G^{1/2}}{\rho} \quad (48)$$

Figura 53

Módulo de cortadura entre la densidad



Nota. La imagen exhibe el resultado del material elegido a través del software CES EduPack.

Fuente: Autor

5.3.1.1 Características generales del material seleccionado

Las características principales de estos tubos se pueden observar en la Tabla 9 que se muestra a continuación.

Tabla 9

Tubo estructural redondo AISI 1015

Propiedades	SAE J 403 1008	Unidades
Norma	NTE INEN 2415	
Acabado	Acero negro	
Densidad	7,85	g/cm^3
Peso	2,41	kg/m
Módulo de Young	210	GPa
Relación de Poisson	0,29	Adimensional
Módulo de corte	80	GPa
Resistencia a la tracción	360	MPa
Límite elástico	243	MPa

Nota. La tabla representa lasas características principales de uno de los aceros más utilizados en chasis de motos y motocicletas, Reproducida de (IPAC, 2019).

Tras la fijación de los parámetros relativos a la selección del material, se inicia el proceso de determinación de los diámetros apropiados de los tubos destinados al diseño estructural, con el objetivo de otorgar una mayor rigidez a la estructura. En este apartado, es esencial tener en consideración los datos consignados en la Tabla 7, que proporciona las dimensiones resultantes obtenidas a partir de un modelo predefinido. El propósito de este análisis consiste en la determinación del diámetro mínimo que se empleará en el soporte de la estructura del chasis, el cual se somete a un esfuerzo máximo (τ). Dicho esfuerzo se encuentra representado en la ecuación (49), en la que se hace referencia al par torsor (T), el radio de la sección circular (c), y el momento polar de inercia (J). (Beer & DeWolf, 2013) .

$$\tau = \frac{T \cdot c}{J} \quad (49)$$

Es fundamental tener en consideración que el radio de la sección circular y el momento polar de inercia son variables influenciadas por la configuración geométrica de la estructura. En consecuencia, se procederá a la adaptación de la ecuación pertinente, y para llevar a cabo este proceso, es necesario adquirir un conocimiento de la fórmula que describe el momento polar de inercia, tal como se presenta en la ecuación 50. Posteriormente, se calcula el ángulo de torsión

(ϕ) y se aplicará la fórmula establecida en la ecuación (51), teniendo en consideración parámetros tales como el par de torsión, la longitud (L), el momento polar de inercia y el módulo de Young (G) (Beer & DeWolf, 2013).

$$J = \frac{\pi}{2} r^4 = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (50)$$

$$\phi = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

$$J = \frac{T \cdot L}{G \cdot \phi}$$

$$d^4 = \frac{32 \cdot T \cdot L}{\pi \cdot G \cdot \phi} \quad (51)$$

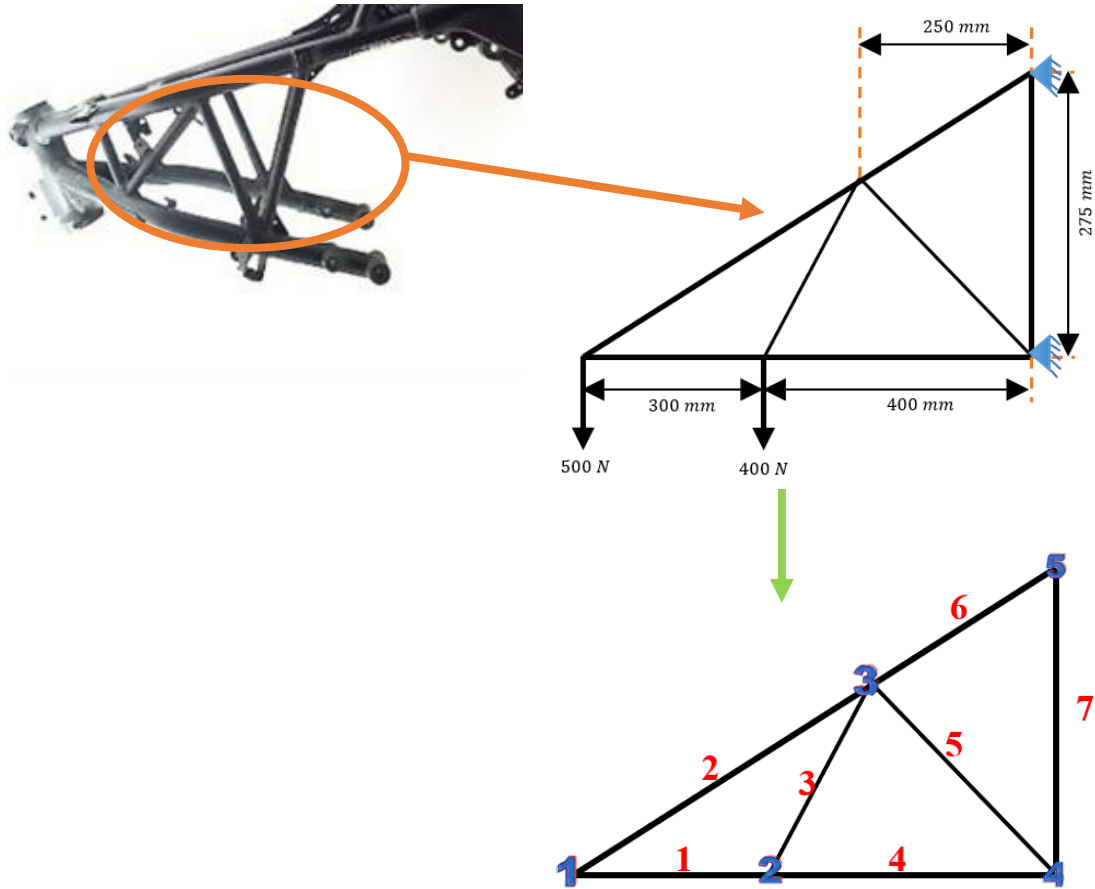
Considerando el ángulo de giro que experimentará la estructura, y tomando en consideración el momento polar de inercia en relación al diámetro, se puede deducir un valor de 21 *mm*. En otras palabras, se permite la utilización de diámetros superiores a los indicados, conforme a las especificaciones detalladas en la Tabla 4, que describe las características estructurales de la sección circular IPAC para fines constructivos.

5.4 Elementos Finitos

Se ha seleccionado una sección del chasis como objeto de estudio, abordándola desde una perspectiva bidimensional en lugar de tridimensional. Esta elección se fundamenta en la complejidad a la consideración de un elevado número de grados de libertad en el sistema, lo cual dificultaría su evaluación mediante métodos manuales. En este entorno, se ha decidido realizar un análisis de elementos finitos de una porción específica del chasis, tal como se ilustra en la Figura 54.

Figura 54

Parámetro de la estructura para el análisis de elemento finitos



Nota. En la figura presentada se muestra el esquema de un chasis con el propósito de llevar a cabo el cálculo manual de la matriz de rigidez. Fuente: Autor

En este estudio, demostraremos la matriz de rigidez basándonos en la información proporcionada anteriormente. La demostración se llevará a cabo mediante el método de los elementos finitos, que es la herramienta matemática utilizada en este análisis. Antes de entrar en los detalles de la matriz de rigidez, comenzaremos estableciendo los parámetros mencionados en la Figura 54 y representaremos estos datos en la Tabla 10. Para resolver estos parámetros de manera más eficiente, emplearemos las ecuaciones (52) y (53).

$$\lambda_x = \cos(\theta_x) = \frac{X_F - X_N}{L} = \frac{X_F - X_N}{\sqrt{(X_F - X_N)^2 + (Y_F - Y_N)^2}} \quad (52)$$

$$\lambda_y = \cos(\theta_y) = \frac{Y_F - Y_N}{L} = \frac{Y_F - Y_N}{\sqrt{(X_F - X_N)^2 + (Y_F - Y_N)^2}} \quad (53)$$

Tabla 10

Parámetros para el análisis mediante el MEF

elemento	Nodo	Nodo	Coordenadas Nodo N		Coordenadas Nodo F		Longitud	Cosenos directos		Módulo de elasticidad	Área de la sección transversal
	N	F	X _N	Y _N	X _F	Y _F	L	λ _x	λ _y	KN/mm ²	A (mm ²)
1	1	2	0	0	300	0	300.00	1	0	200	47000
2	1	3	0	0	450	275	527.38	0.85	0.52	200	47000
3	2	3	300	0	450	275	313.25	0.48	0.88	200	9800
4	2	4	300	0	700	0	400.00	1	0	200	47000
5	3	4	450	275	700	0	371.65	0.67	-0.74	200	9800
6	3	5	450	275	700	275	250.00	1	0	200	47000
7	4	5	700	0	700	275	275.00	0	1	200	47000

Nota. En la tabla, se presentan los datos recopilados con el propósito de llevar a cabo cálculos analíticos a través del Método de Elementos Finitos (MEF). Fuente: Autor

Para resolver los elementos individuales de cada viga, se comienza con un análisis inicial en el que se establecen los pasos a seguir. A continuación, se describe la metodología que se empleará para aplicar los resultados de la matriz de rigidez.

Elemento 1

Matriz de rigidez local (K'_1)

Para dar comienzo al proceso de cálculo en el primer elemento, se procede a realizar un estudio utilizando la ecuación (54), que permite la determinación de la matriz de rigidez local. Esta matriz se considera como un paso inicial en la resolución de los elementos estructurales y servirá como fundamento para posteriores etapas de análisis.

$$k' = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$K'_1 = \begin{vmatrix} 31333.3333 & -31333.3333 \\ -31333.3333 & 31333.3333 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_1)

La matriz de coordenadas o desplazamientos se obtiene mediante la aplicación de la ecuación(55), que establece una relación con los cosenos directores correspondientes detallados en la Tabla 10. Este proceso es fundamental para una definición precisa de las coordenadas de desplazamiento, lo cual, a su vez, simplifica la evaluación de los elementos considerados en el estudio estructural.

$$T_1 = \begin{bmatrix} \lambda_x & \lambda_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_x & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$T_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_1^T)

El proceso de obtención de la matriz transpuesta comienza la ecuación (55), que establece una relación para su cálculo. A continuación, se utiliza la ecuación

(51) para obtener la matriz transpuesta. Este enfoque se emplea para garantizar una representación y manipulación adecuadas de los datos y resultados en el contexto del análisis en curso.

$$T_1^T = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ \lambda_y & 0 \\ 0 & \lambda_x \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$T_1^T = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 1

Para resolver la matriz de rigidez global en este proceso, se utiliza una metodología que implica la matriz transpuesta. Esta matriz transpuesta se multiplica primero con la matriz local del elemento correspondiente. Luego, el resultado se somete a una pre-multiplicación adicional utilizando la matriz de transformación de desplazamientos. Este enfoque es esencial para calcular de manera efectiva la matriz de rigidez global.

$$k_1 = T_1^T \cdot K'_1 \cdot T_1 = \begin{vmatrix} 31333.33 & -31333.33 \\ 0 & 0 \\ -31333.33 & 31333.33 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 31333.33 & 0 & -31333.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -31333.33 & 0 & 31333.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{2} \\ \mathbf{3} \\ \mathbf{4} \end{matrix}$$

Se aplica de manera coherente y sistemática el mismo enfoque y metodología mencionados anteriormente para calcular los otros componentes de la matriz de rigidez. Este procedimiento se repite en todas las etapas del análisis estructural, asegurando la obtención de todos los elementos requeridos para completar la globalidad de la matriz.

Elemento 2

Matriz de rigidez local (K'_2)

$$K'_2 = \begin{vmatrix} 17824.1094 & -17824.1094 \\ -17824.1094 & 17824.1094 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_2)

$$T_2 = \begin{vmatrix} 0.85328183 & 0.52145001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.853281834 & 0.521450009 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_2^T)

$$T_2^T = \begin{vmatrix} 0.85328183 & 0 \\ 0.52145001 & 0 \\ 0 & 0.85328183 \\ 0 & 0.52145001 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 2

$$k_2 = T_2^T \cdot K'_2 \cdot T_2 = \begin{vmatrix} 15208.99 & -15208.99 \\ 9294.38 & -9294.38 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.85 & 0.52 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 12977.55 & 7930.72 & -12977.55 & -7930.72 \\ 7930.72 & 4846.55 & -7930.72 & -4846.55 \end{vmatrix} \begin{matrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{2} \\ \mathbf{5} \\ \mathbf{6} \end{matrix}$$

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cc} - & \\ 15208.99 & 15208.99 \\ -9294.38 & 9294.38 \end{array} \right| \left| \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0.85 & 0.52 \end{array} \right| \left| \begin{array}{cccc} -12977.55 & -7930.72 & 12977.55 & 7930.72 \\ -7930.72 & -4846.55 & 7930.72 & 4846.55 \end{array} \right| \begin{array}{l} \mathbf{5} \\ \mathbf{6} \end{array} \end{array}$$

Elemento 3

Matriz de rigidez local (K'_3)

$$K'_3 = \begin{vmatrix} 6257.00117 & -6257.001174 \\ -6257.00117 & 6257.001174 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_3)

$$T_3 = \begin{vmatrix} 0.47885213 & 0.87789557 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.478852131 & 0.877895573 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_3^T)

$$T_3^T = \begin{vmatrix} 0.47885213 & 0 \\ 0.87789557 & 0 \\ 0 & 0.47885213 \\ 0 & 0.87789557 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 3

$$k_3 = T_3^T \cdot K'_3 \cdot T_3 \begin{vmatrix} 2996.17 & -2996.17 \\ 5492.99 & -5492.99 \\ -2996.17 & 2996.17 \\ -5492.99 & 5492.99 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.47 & 0.87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.47 & 0.87 \end{vmatrix} = \begin{array}{cccc} \mathbf{3} & \mathbf{4} & \mathbf{5} & \mathbf{6} \\ \left| \begin{array}{cccc} 1434.72 & 2630.33 & -1434.72 & -2630.33 \\ 2630.33 & 4822.27 & -2630.33 & -4822.27 \\ -1434.72 & -2630.33 & 1434.72 & 2630.33 \\ -2630.33 & -4822.27 & 2630.33 & 4822.274 \end{array} \right| \begin{array}{l} \mathbf{3} \\ \mathbf{4} \\ \mathbf{5} \\ \mathbf{6} \end{array} \end{array}$$

Elemento 4

Matriz de rigidez local (K'_4)

$$K'_4 = \begin{vmatrix} 23500 & -23500 \\ -23500 & 23500 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_4)

$$T_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_4^T)

$$T_4^T = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 4

$$k_4 = T_4^T \cdot K'_4 \cdot T_4 = \begin{vmatrix} 23500 & -23500 \\ 0 & 0 \\ -23500 & 23500 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 23500 & 0 & -23500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -23500 & 0 & 23500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} \mathbf{3} \\ \mathbf{4} \\ \mathbf{7} \\ \mathbf{8} \end{matrix}$$

Elemento 5

Matriz de rigidez local (K'_5)

$$K'_5 = \begin{vmatrix} 5273.7547 & -5273.754705 \\ -5273.7547 & 5273.754705 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_5)

$$T_5 = \begin{vmatrix} 0.67267279 & -0.73994007 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.672672794 & -0.739940073 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_5^T)

$$T_5^T = \begin{vmatrix} 0.67267279 & 0 \\ -0.73994007 & 0 \\ 0 & 0.67267279 \\ 0 & -0.73994007 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 5

$$\begin{vmatrix} 3547.51 & -3547.51 \end{vmatrix} \begin{matrix} \mathbf{5} \\ \mathbf{6} \\ \mathbf{7} \\ \mathbf{8} \end{matrix} = \begin{vmatrix} 2386.31 & -2624.94 & -2386.31 & 2624.94 \end{vmatrix} \mathbf{5}$$

$$k_5 = T_5^T \cdot K'_5 \cdot T_5 \begin{vmatrix} -3902.26 & 3902.26 \\ -3547.51 & 3547.51 \\ 3902.26 & -3902.26 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.67 & 0.73 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & -0.73 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} - & - & - & - \\ 2624.94 & 2887.44 & 2624.94 & -2887.44 \\ - & - & - & - \\ 2386.31 & 2624.94 & 2386.31 & -2624.94 \\ - & - & - & - \\ 2624.94 & -2887.44 & -2624.94 & 2887.44 \end{vmatrix} \begin{matrix} \mathbf{6} \\ \mathbf{7} \\ \mathbf{8} \end{matrix}$$

Elemento 6

Matriz de rigidez local (K'_6)

$$K'_6 = \begin{vmatrix} 37600 & -37600 \\ -37600 & 37600 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_6)

$$T_6 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_6^T)

$$T_6^T = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 6

$$k_6 = T_6^T \cdot K'_6 \cdot T_6 \begin{vmatrix} 37600 & -37600 \\ 0 & 0 \\ -37600 & 37600 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} & \mathbf{5} & \mathbf{6} & \mathbf{9} & \mathbf{10} \\ 37600 & 0 & -37600 & 0 & \mathbf{5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{6} \\ -37600 & 0 & 37600 & 0 & \mathbf{9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{10} \end{vmatrix}$$

Elemento 7

Matriz de rigidez local (K'_7)

$$K'_7 = \begin{vmatrix} 34181.8182 & -34181.8182 \\ -34181.8182 & 34181.8182 \end{vmatrix}$$

Matriz de transformación de coordenadas de elementos (T_7)

$$T_7 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Transpuesta de la matriz de transformación de coordenadas de elemento (T_7^T)

$$T_7^T = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Matriz de rigidez global del elemento 7

$$k_7 = T_7^T \cdot K'_7 \cdot T_7 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 34181.8 & 34181.81 \\ 0 & 0 \\ - & 34181.81 & 34181.81 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{matrix} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 34181.81 & 0 & 34181.81 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 34181.81 & 0 & 34181.81 \end{vmatrix} \\ \begin{matrix} 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} \end{matrix}$$

Matriz de rigidez global de la estructura K

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	44310.88	7930.72	-31333.33	0	12977.55	-7930.72	0	0	0	0	1
	7930.72	4846.55	0	0	-7930.72	-4846.55	0	0	0	0	2
	-31333.33	0	56268.05	2630.33	-1434.72	-2630.33	-23500	0	0	0	3
	0	0	2630.33	4822.27	-2630.33	-4822.27	0	0	0	0	4
	-12977.55	-7930.72	-1434.72	-2630.33	54398.59	7936.11	-2386.31	2624.94	-37600	0	5
$k =$	-7930.72	-4846.55	-2630.33	-4822.27	7936.11	12556.27	2624.94	-2887.44	0	0	6
	0	0	-23500	0	-2386.31	2624.94	25886.31	-2624.94	0	0	7
	0	0	0	0	2624.94	-2887.44	-2624.94	37069.25	0	-34181.81	8
	0	0	0	0	-37600	0	0	0	37600	0	9
	0	0	0	0	0	0	0	34181.81	0	34181.81	10

Desplazamientos

$$D_u = 0.490440587 \text{ mm}$$

Fuerzas internas

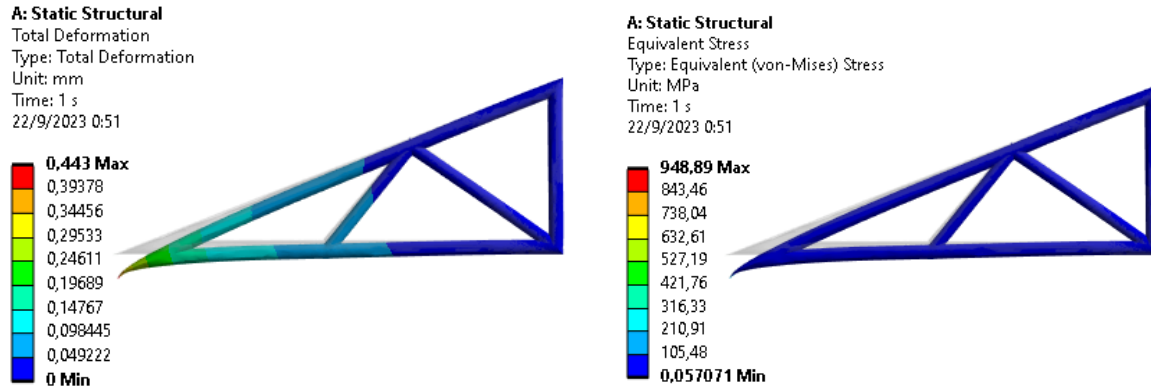
$$q = \begin{vmatrix} -818.181818 \\ 818.181818 \end{vmatrix}$$

Herramienta CAE

Se han empleado herramientas computacionales para validar el resultado obtenido, el cual concuerda con el cálculo matemático previamente realizado y se encuentra representado en la Figura 55.

Figura 55

Simulación CAE



Nota. La imagen exhibe los datos obtenidos a través de la simulación realizada mediante el Análisis de Elementos Finitos. Fuente: Autor

Diseño generativo

De acuerdo con Ahmed & Gupta, (2022) la optimización topológica en CAD busca mejorar el rendimiento estructural mediante la distribución óptima de material en estructuras, considerando cargas, restricciones y condiciones de contorno. Se puede lograr mejor rendimiento minimizando la elasticidad o maximizando la rigidez. El análisis de elementos finitos es crítico para esta optimización, requiriendo la identificación de especificaciones y modelos matemáticos.

Matemáticamente, el problema de optimización de topología basado en el enfoque de ley de potencias para la minimización del cumplimiento se determina en la ecuación (57).

$$\begin{aligned}
 \text{Min}_x : f(x) &= U^T K U = \sum_{e=1}^N (X_e)^P u_e^T K_o u_e \\
 \text{Sujeto a : } &\frac{V(X)}{V_0} = v \\
 &K_0 U = F
 \end{aligned}
 \tag{57}$$

$$0 < X_{min} \leq x \leq 0$$

Mediante el cual, se establece la densidad de cada elemento finito del marco (x_e) de acuerdo con la variable de diseño primordial. Consecuentemente, $V(x)$ representa el volumen del material con la densidad elemental deseada, mientras que V_0 es el volumen del dominio de diseño, la determinación del volumen total del modelo estructural se realiza siguiendo el procedimiento descrito a continuación como se muestra en la ecuación (58).

$$V(X) = \sum_{e=1}^N X_e v_o \quad (58)$$

De acuerdo con el enfoque de la ley de potencia, la rigidez de cada elemento se expresa en términos de la densidad elemental (X_e) y la matriz de rigidez global (K_o) determinada en la ecuación (59).

$$[K_e] = [K_o](X_e)^P \quad (59)$$

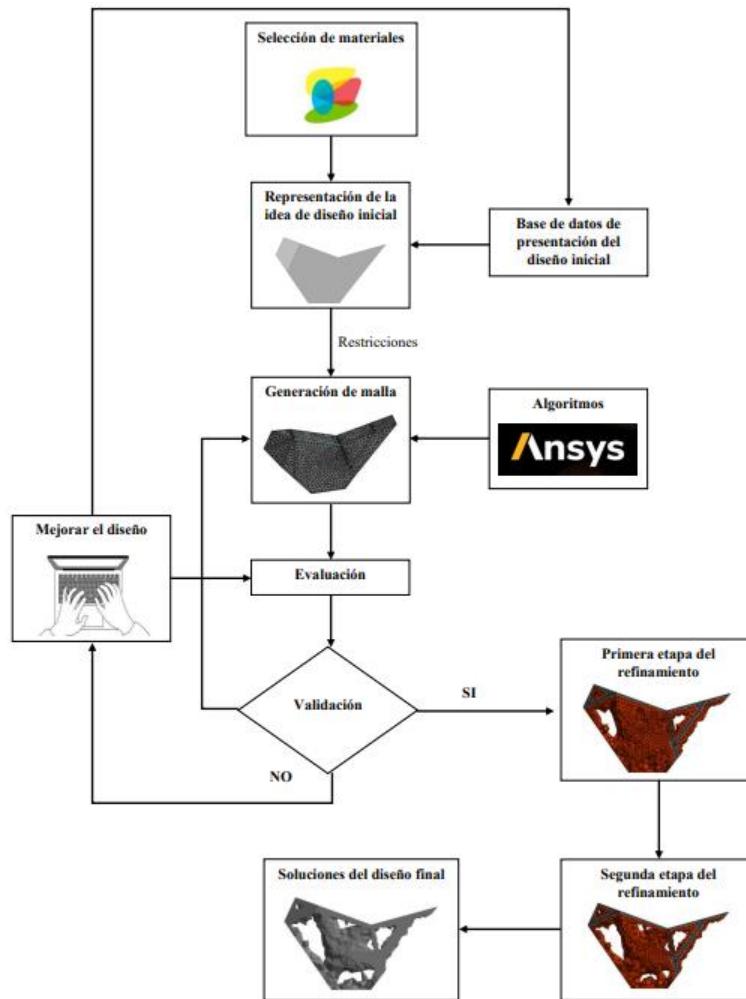
En este proyecto, se llevó a cabo una optimización topológica utilizando el método de elementos finitos con el software ANSYS. En este enfoque, las propiedades del material se expresan mediante una función que involucra la densidad relativa del material elevada a una potencia específica multiplicada por la propiedad del material sólido, siguiendo la formulación propuesta por Bendsùe & Sigmund, (1999).

Una vez que se ha definido el dominio de diseño, se han establecido las condiciones de contorno y las restricciones pertinentes, la herramienta computacional implementa el método de optimización con el fin de determinar la configuración estructural más eficiente. Este proceso se realiza con el objetivo de garantizar tanto la seguridad como la confiabilidad en el diseño.

El proceso culmina con la generación de un boceto estructural optimizado como se muestra en la Figura 56, el cual sirve como punto de partida fundamental para la posterior creación del diseño final de nuestro chasis.

Figura 56

Diagrama de flujo para el diseño generativo

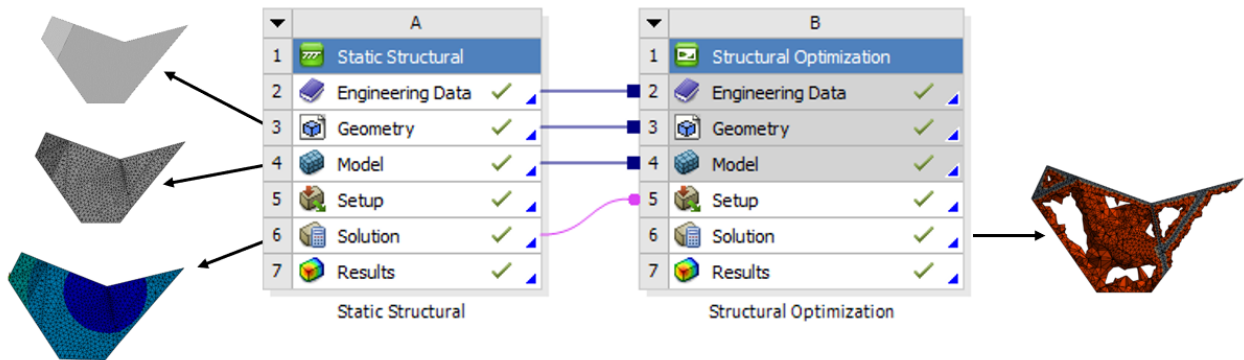


Nota. Proceso de evaluación y optimizar alternativas en el diseño. Fuente: El Autor

El proceso de diseño generativo se inicia a partir de la representación geométrica del objeto, utilizando un volumen inicial como punto de origen tal como se exhibe en la Figura 57, En este proceso, se realiza a partir de un volumen inicial de control establecido mediante la dinámica de la motocicleta, para posteriormente el modelo generar malla obteniendo un resultado, así mismo para generar una optimización se realiza una copia de los datos en de la estructura brindándonos una solución de diseño generativo.

Figura 57

Proceso de diseño generativo en ANSYS



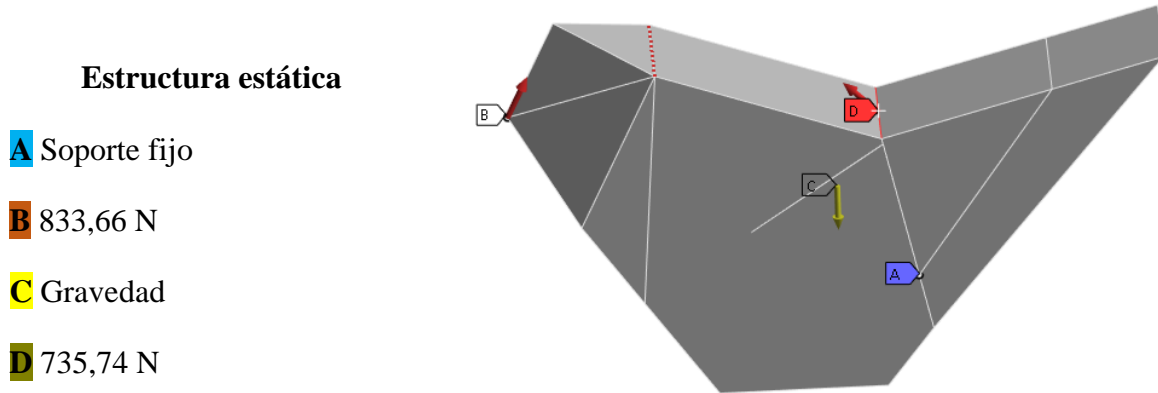
Nota. En la imagen se muestra el proceso de diseño generativo realizado a través del software Ansys Workbench. Fuente: Autor

Una vez que se ha obtenido la malla apropiada, se procede a realizar un análisis detallado con el fin de evaluar y perfeccionar el diseño en cuestión. Los resultados de este análisis se comparan minuciosamente con los parámetros y requisitos preestablecidos. En caso de que los resultados no cumplan con los estándares de satisfacción, se procede a realizar ajustes en los algoritmos de mallado y los parámetros correspondientes, dando inicio a una nueva relación en la generación de la estructura con el objetivo de mejorar el diseño y alcanzar los objetivos deseados.

Para llevar a cabo el proceso de mallado, es esencial que, en primer lugar, se establezcan las condiciones de carga en el volumen de control, tal como se detalla en la Figura 58. El objetivo principal de esta etapa consiste en implementar un diseño generativo que permita la optimización y la refinación de la estructura, con el propósito de cumplir con criterios específicos de rendimiento y restricciones predefinidas. Estos parámetros resultan de suma importancia, ya que desempeñan un papel fundamental en la determinación de las respuestas del diseño generativo, al mismo tiempo que orientan la generación de geometrías óptimas en términos de peso, rigidez y resistencia en el proceso de optimización.

Figura 58

Distribución de esfuerzos en el volumen del chasis



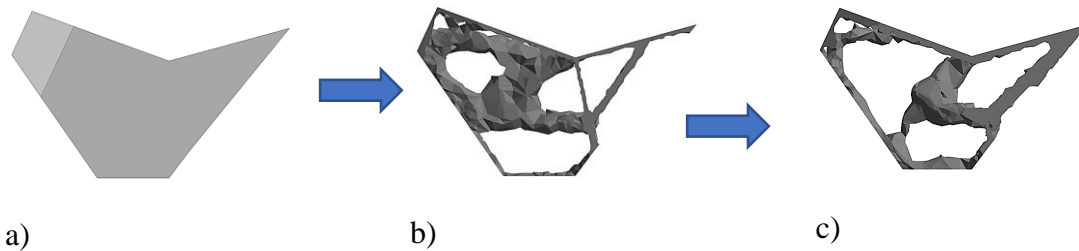
Nota. En la imagen se observa la representación de la distribución de fuerzas en el volumen del chasis.

Fuente: Autor

Este enfoque generativo, que se basa en la geometría, el proceso de mallado, como se ilustra en la Figura 59, permite la exploración de múltiples opciones de diseño y la optimización de la estructura de acuerdo con requisitos específicos. Esto se traduce en la obtención de soluciones eficientes y altamente personalizadas, que satisfacen de manera precisa las necesidades del proyecto en cuestión.

Figura 59

Resultados de diseño generativo



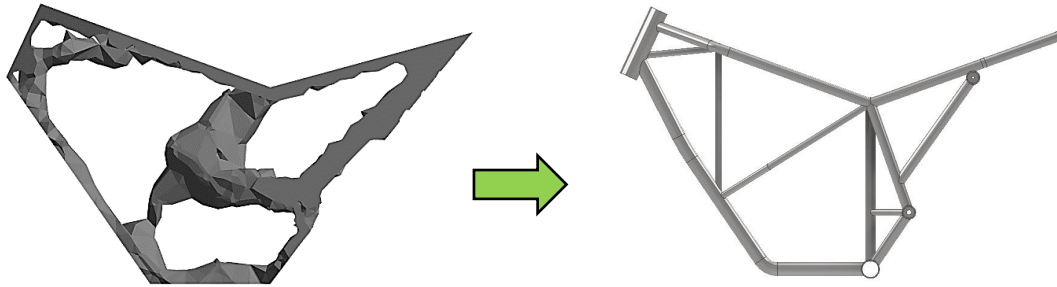
Nota. En la figura se presenta a) etapa inicial, b) Etapa intermedia y c) etapa final del diseño generativo.

El diseño generativo tiene como propósito evaluar la idoneidad del chasis en términos de sus prestaciones, considerando el factor de seguridad, el módulo elástico y las deformaciones. Es fundamental considerar que la Figura 60, generada a través del proceso de diseño generativo, no puede ser reconstruida de manera directa. Por lo tanto, se procede a la elaboración de un

diseño conceptual que se sustenta en secciones, posibilitando de esta manera la identificación de diversas tipologías de soportes estructurales, incluyendo aquellos de carácter externo.

Figura 60

Diseño obtenido a partir de la optimización topológica



Nota. En la imagen se presenta el diseño generativo, a partir del cual se desarrolla el diseño de la estructura del chasis. Fuente: Autor

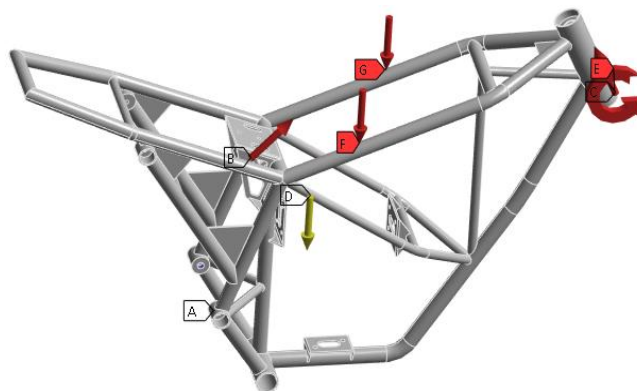
Una vez que la estructura ha sido adecuadamente definida, se procede a la aplicación de cargas, tal como se evidencia en la Figura 61, con el propósito de analizar el comportamiento de la estructura en respuesta a condiciones de carga específicas. La aplicación de cargas posibilita la realización de análisis de diseño con el fin de optimizar tanto la geometría como los materiales que conforman la estructura. Este enfoque desempeña un papel fundamental en la reducción del peso y los costos asociados al proyecto, al mismo tiempo que garantiza que la estructura cumple con los requisitos de rendimiento establecidos.

Figura 61

Condiciones de carga en la estructura del chasis

Estructura estática

- A** Soporte fijo
- B** Fuerza: 735,74 N
- C** Fuerza 833,66 N
- D** Gravedad: 9806,6 mm/s²
- E** Momento: 1,5 N/mm
- F** Línea de presión 0,5 N/mm
- G** Línea de presión 0,5 N/mm



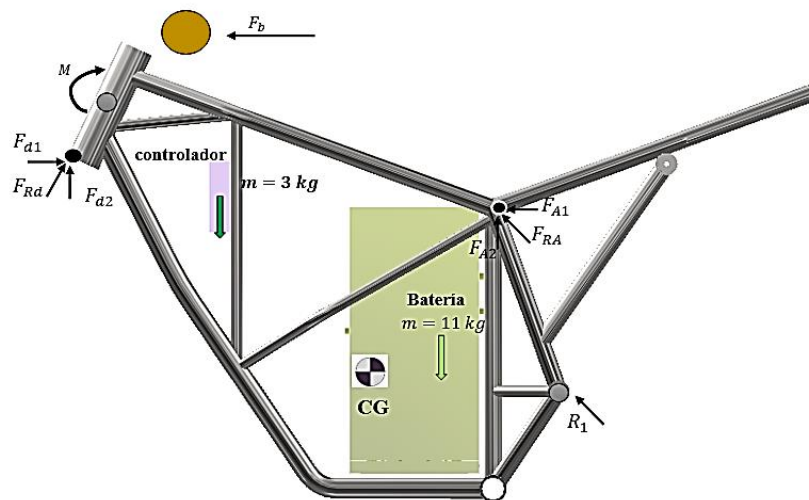
Nota. La figura ilustra la distribución de las fuerzas en la estructura del chasis, proporcionando así los datos necesarios para su análisis correspondiente. Fuente: Autor

A través de la aplicación de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se logra la confección de un modelo definitivo de la estructura, el cual se presenta detalladamente en la Figura 62. Este diseño final incorpora de manera integral todas las soluciones específicas necesarias, incluyendo un cuidadoso cálculo del espacio requerido para la disposición de la batería y el controlador.

El proceso de elaboración de la estructura definitiva se basa rigurosamente en los análisis previamente realizados, tomando en consideración las restricciones y requisitos previamente establecidos. Esto se traduce en una garantía de que el diseño tenga la capacidad de integrar eficientemente tanto la batería como el controlador, teniendo en cuenta factores como su tamaño, forma y la ubicación óptima dentro de la estructura. Este enfoque se orienta hacia la consecución de un adecuado funcionamiento y rendimiento del sistema, asegurando una integración efectiva de los componentes clave en la estructura final.

Figura 62

Modelo final de la estructura



Nota. A partir del diseño generativo se establece prototipo del diseño final de la estructura. Fuente: El Autor

5.4.1 ANSYS

Utilizando el proceso de diseño generativo, se generaron y evaluaron diseños diferentes para cada estructura de soporte referente al mallado, los métodos del tetraedro y el hexaedro son dos enfoques diferentes para la discretización de dominios tridimensionales en simulaciones

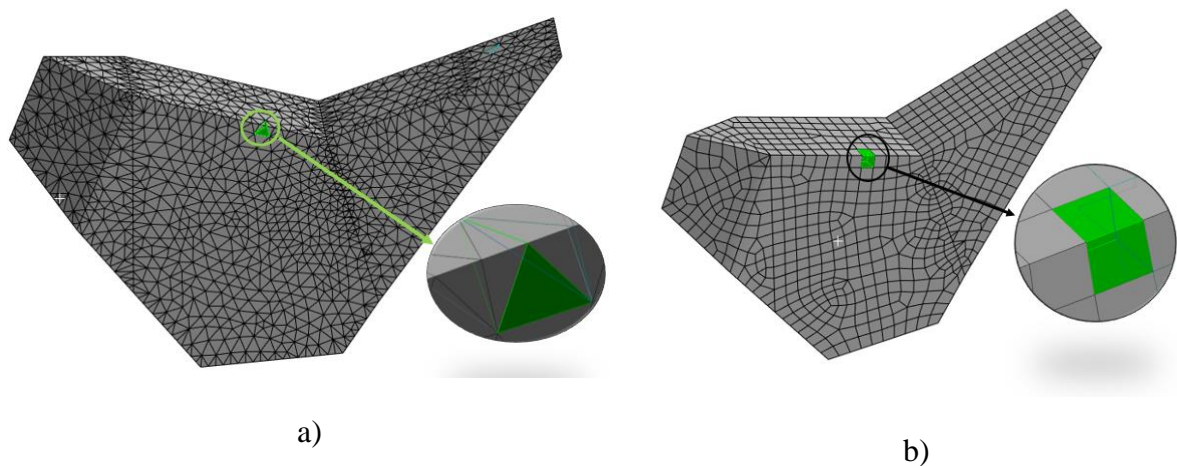
numéricas, especialmente en áreas como la mecánica de fluidos computacional (CFD) y el análisis de elementos finitos (FEA).

El método del tetraedro utiliza elementos simples con cuatro vértices que forman una pirámide triangular en tres dimensiones. Estos resultan útiles en situaciones que requieren mallas adaptables, ya que se ajustan fácilmente a geometrías irregulares. Además, los tetraedros suelen consumir menos memoria para almacenar información de la malla, lo que puede ser ventajoso en simulaciones con un gran número de elementos. Por otro lado, el método del hexaedro utiliza elementos cúbicos con ocho vértices y caras rectangulares. Estos representan de manera más natural muchas geometrías tridimensionales y pueden ofrecer una representación más precisa de la geometría, especialmente cuando está compuesta principalmente por volúmenes. En general, se requieren menos elementos hexaedros para representar una geometría en comparación con los tetraedros, lo que puede reducir los costos computacionales.

Estos diseños se optimizaron para maximizar la rigidez y minimizar el peso, teniendo en cuenta las restricciones de fabricación y las demandas de rendimiento estructural como se muestra en la Figura 63.

Figura 63

Distintas formas de mallado



Nota. En la Figura a), se presenta una representación gráfica de un mallado compuesto por elementos tetraédricos, mientras que en la Figura b), se ilustra un mallado conformado por elementos hexaédricos.

Fuente: Autor

La selección entre el método del tetraedro y el hexaedro está determinada por la naturaleza de la geometría a ser modelada y las necesidades específicas de la simulación. Los tetraedros son altamente flexibles y se adecuan eficazmente a geometrías irregulares, aunque suelen requerir un mayor número de elementos. Por otro lado, los hexaedros son más precisos en geometrías regulares y necesitan menos elementos, pero pueden ser menos adaptables en casos de geometrías complejas. En última instancia, la elección se basa en encontrar un equilibrio entre la precisión, la adaptabilidad y los requisitos computacionales de la simulación.

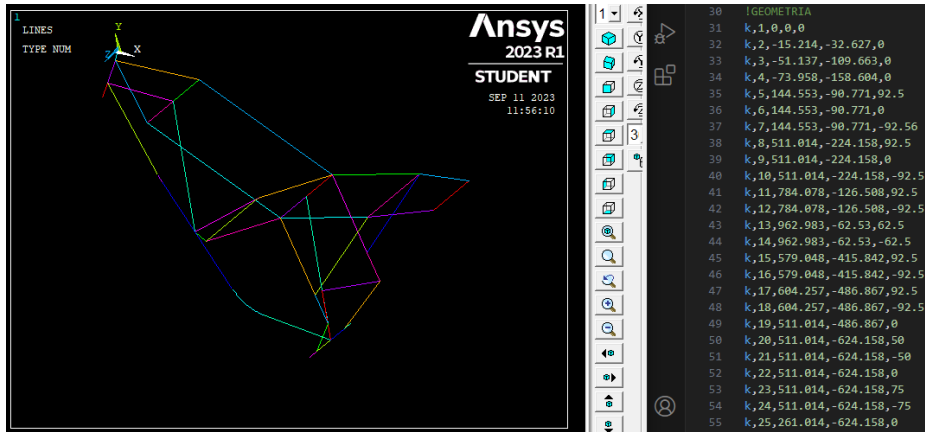
5.4.2 ANSYS APDL

El diseño en Ansys APDL brinda un alto nivel de flexibilidad y personalización al formular modelos y simulaciones. Permite la creación de scripts y macros personalizados para abordar problemas complejos que no son fáciles de resolver mediante la interfaz gráfica de Workbench. Esta flexibilidad es esencial cuando se requiere un control completo sobre el proceso de simulación. Además, posibilita una automatización avanzada de los procesos de simulación y análisis, tal y como se muestra claramente en la Figura 64, permitiendo la creación de secuencias de comandos para llevar a cabo simulaciones paramétricas de manera eficiente. Esto resulta especialmente útil en estudios de optimización y restricciones en diseños versátiles.

En cuanto a la generación y manipulación de mallas, APDL ofrece una mayor eficacia. Permite el uso de comandos específicos para controlar la generación de mallas como se detalla en la Figura 65, definir refinamientos locales y personalizar la discretización de geometrías complejas. Así mismo, proporciona capacidades avanzadas de modelado y análisis que pueden resultar necesarias en situaciones específicas, como análisis dinámicos y acoplamiento estructural, entre otros. Estas capacidades, en su totalidad, a menudo no están disponibles en Workbench.

Figura 64

Geometría empleada en APDL

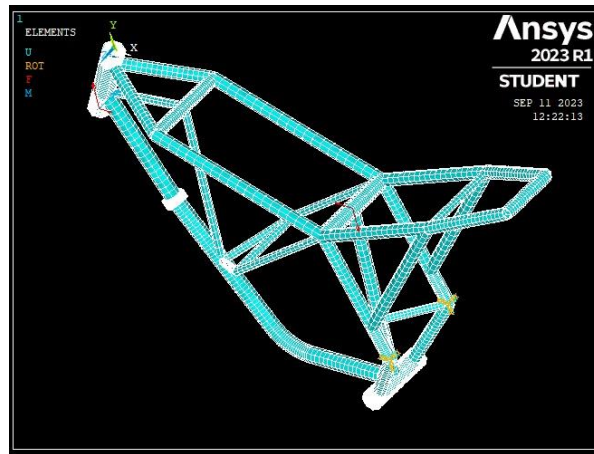


Nota. La figura exhibe un diseño generado mediante el empleo de códigos previamente definidos con el propósito de realizar la representación gráfica en Ansys APDL. Fuente: Autor

Una vez que se ha creado la geometría del diseño en Ansys APDL, se procede a introducir varias circunferencias en la representación con el propósito de realizar un análisis del chasis, tal como se muestra en la Figura 65.

Figura 65

Extrucción mediante diferentes diámetros



Nota. En la imagen se proporciona una representación visual del mallado generado a través del software Ansys APDL. Fuente: Autor

Podemos concluir que en APDL, se destaca la capacidad de crear y ejecutar códigos por lotes almacenados en archivos de texto de manera eficiente. Esta característica facilita la rápida corrección de problemas o la adaptación de secciones específicas del código, como los

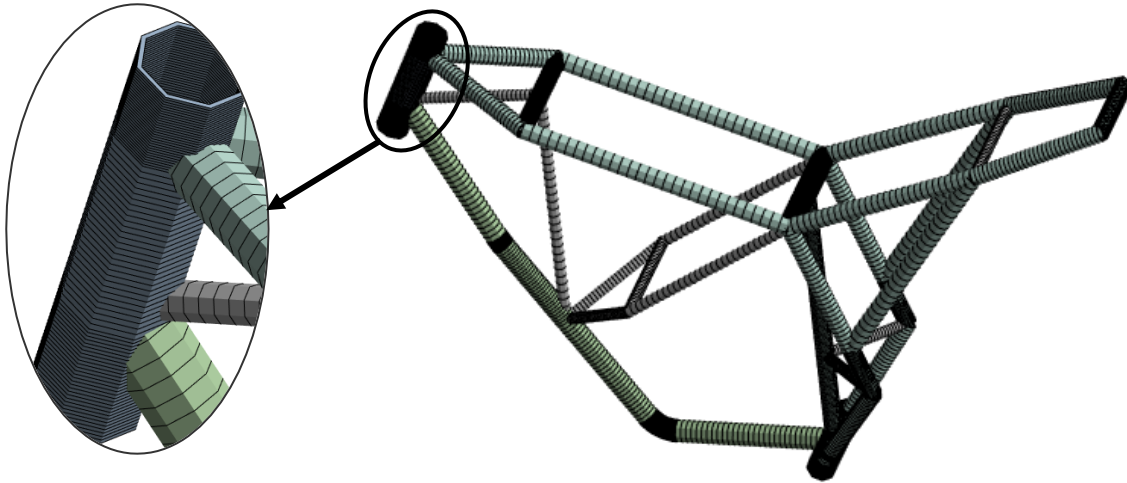
relacionados con fuerzas o materiales. La resolución integral de problemas se logra mediante comandos, lo que, una vez que se adquiere competencia en su manejo, conlleva un notable ahorro de tiempo.

Es importante destacar que en APDL es necesario definir explícitamente todos los materiales utilizados en una simulación, incluso cuando se trata de materiales comunes como el acero estructural. APDL se distingue por ser la única plataforma que permite la creación de tablas no lineales personalizadas y la formulación de ecuaciones para caracterizar los materiales empleados en la simulación (Silva et al., 2021).

La técnica de refinamiento de mallado en Ansys APDL se emplea con el propósito de mejorar la precisión de un análisis numérico mediante la adaptación de la densidad y calidad de la malla de elementos finitos en áreas específicas de un modelo, como se ilustra en la Figura 66. Esta estrategia se implementa con el fin de obtener resultados de mayor exactitud en zonas críticas o de interés dentro de la simulación. El refinamiento de mallado implica la reducción del tamaño de los elementos finitos en aquellas áreas donde se requiere una resolución superior. Esta decisión se sustenta frecuentemente en criterios tales como tensiones, desplazamiento u otros parámetros relevantes al análisis. Como resultado de este proceso, se logra una representación más precisa y detallada del comportamiento del sistema en las áreas de interés, lo cual habilita una comprensión más profunda de su respuesta frente a las condiciones de carga y frontera.

Figura 66

Refinamiento de malla en Ansys APDL



Nota. En la figura se muestra un proceso de refinamiento de la malla en los puntos más críticos para sus respectivos análisis. Fuente: Autor

5.5 Validación del modelo

En este estudio de validación del modelo, nuestra atención se dirige hacia la realización de un análisis modal para verificar el comportamiento dinámico de la estructura, específicamente identificando su frecuencia de resonancia estructural. El modelo matemático fundamentado en estos parámetros es de carácter lineal, lo que proporciona una descripción exhaustiva de dicho comportamiento. De este modo, el análisis modal se presenta como un enfoque experimental que facilita la determinación de las características de un sistema dinámico y la formulación del modelo correspondiente de una estructura.

Es posible simular la respuesta de vibración ante fuerzas que se supone podrían actuar sobre la estructura en su entorno de trabajo. El análisis modal en prototipos de estructuras permite optimizar el diseño al simular la respuesta del prototipo y, en base a esto, realizar ajustes en el modelo dinámico. Los parámetros modales se pueden emplear para monitorear las condiciones de las estructuras, como imperfecciones o defectos, como, por ejemplo, el desarrollo de grietas. Esto proporciona la capacidad de modificar los parámetros modales de la estructura.

Para el análisis de vibraciones se consideran los puntos más críticos como son a bajas revoluciones que pueden estar comprendidos entre el 1 y 20 m/s para determinar estas frecuencias se abarcan mediante las siguientes ecuaciones mostradas a continuación.

$$w = \frac{v}{r} \quad (60)$$

$$w = 2\pi f \quad (61)$$

$$f = \frac{w}{2\pi} \quad (62)$$

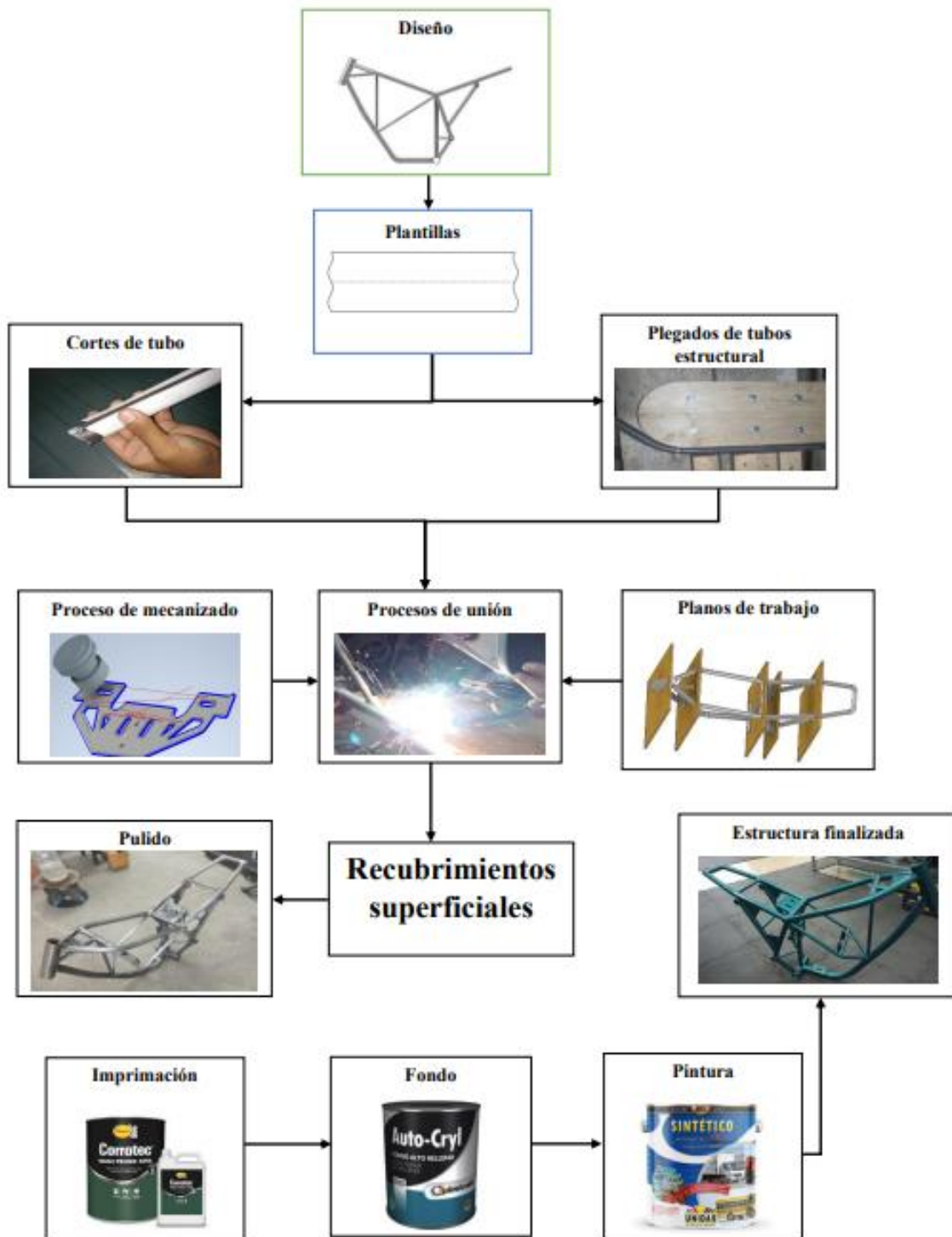
Como una extensión del diseño conceptual propuesto, se ha elaborado una metodología con el fin de establecer el proceso de fabricación, en cumplimiento de los objetivos de este estudio.

5.6 Fabricación del chasis estructural de una moto eléctrica.

La metodología de fabricación del chasis estructural de una motocicleta eléctrica es un proceso crucial en la producción de este tipo de vehículos. A continuación, en la Figura 67 se presenta una descripción más detallada de los pasos clave involucrados en la fabricación.

Figura 67

Diagrama de flujo para la construcción del chasis

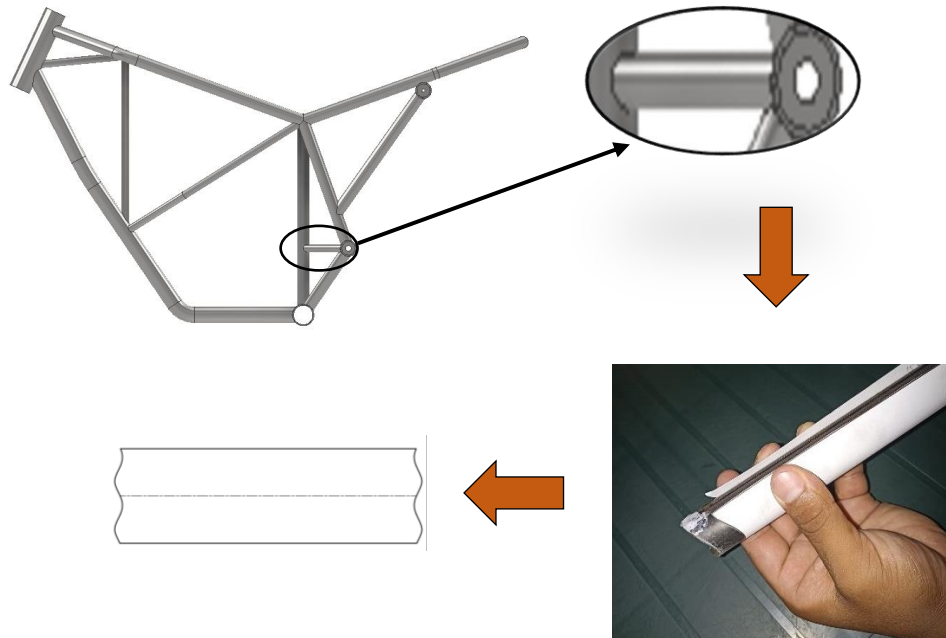


Nota. En la figura se representa el proceso mediante el cual se llevó a cabo la construcción del chasis de la motocicleta eléctrica. Fuente. El Autor

A partir del diseño final se crean plantillas con el propósito de la ejecución de cortes en material destinado a la construcción de la estructura, este enfoque permite la obtención de formas que resultan óptimas para las conexiones, tal como se muestra en la **Figura 68**.

Figura 68

Proceso de corte



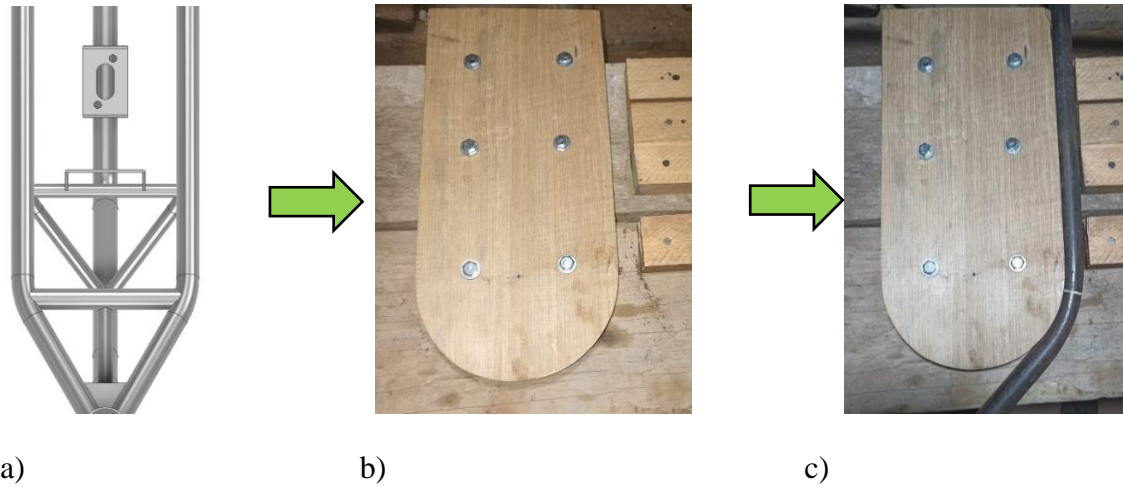
Nota. En el proceso de corte, se confeccionan plantillas diseñadas en el software Inventor con la geometría de las piezas de chapa, las cuales se utilizan como guía para llevar a cabo el corte de los tubos.

Fuente: Autor

Además, es necesario realizar el proceso de doblado con el objetivo de configurar la estructura óptima del chasis. Para llevar a cabo este proceso, se ha establecido una matriz específica para el doblado, como se ilustra en la Figura 69.

Figura 69

Proceso de doblado



Nota. En la Figura a), se evidencian radios incorporados en la estructura del diseño. En la Figura b), se genera una matriz, y en la Figura c), se efectúa el proceso de doblado. Fuente: Autor

Una vez que se han completado todos los cortes necesarios en la estructura y se han realizado los doblados correspondientes, se procede a construir una estructura de madera (MDF) diseñada para la colocación adecuada de los tubos previamente cortados, como se presenta en la Figura 70. Esta etapa se lleva a cabo en preparación para el proceso de soldadura.

Figura 70

Estructura de madera

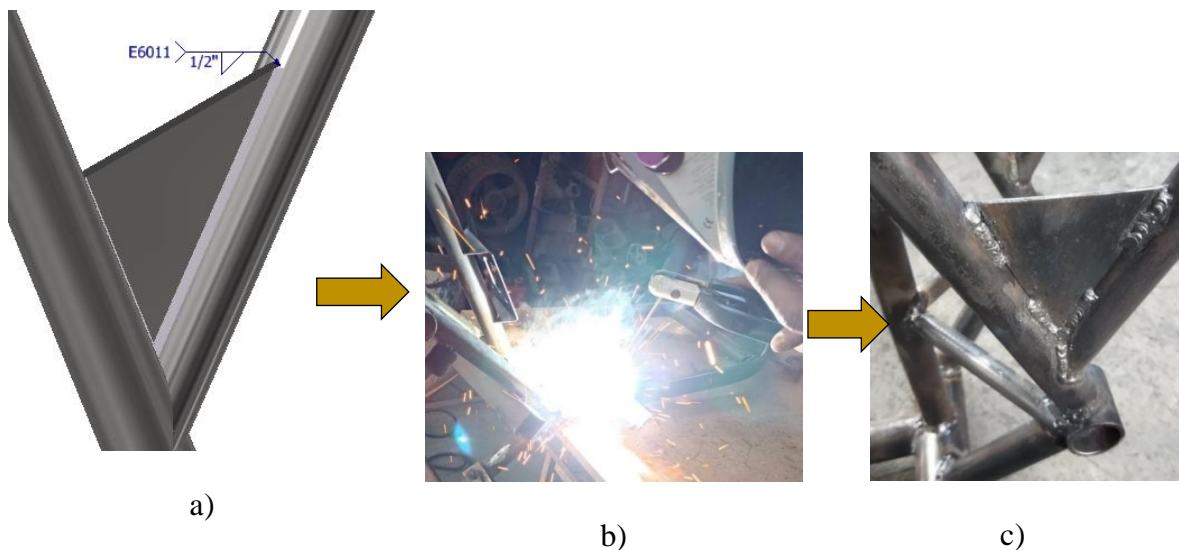


Nota. En la Figura a), se define un diseño de estructura de madera, mientras que en la Figura b), se procede a construir la estructura de madera, la cual desempeña el papel de soporte en la unión estructural.
Fuente: Autor

A continuación, se procede a llevar a cabo el proceso de soldadura con el objetivo de unir las piezas previamente seccionadas y conferirle la configuración deseada al chasis, tal como se ilustra en la Figura 71. Esta operación se ha ejecutado utilizando un equipo de soldadura de electrodo, en virtud de consideraciones económicas, así como debido a sus propiedades sobresalientes de ductilidad y resistencia a la corrosión, además de su destacada capacidad de absorción de impactos. En particular, se empleó un electrodo de soldadura de tipo E6011 con un diámetro de 3/32", el cual se muestra apropiado para su aplicación en diversas situaciones de unión en estructuras de acero al carbono. Esto lo posiciona como una elección idónea para una amplia variedad de proyectos de soldadura en acero suave. Cabe destacar que este tipo de electrodo generalmente se caracteriza por su accesibilidad económica.

Figura 71

Proceso de soldadura

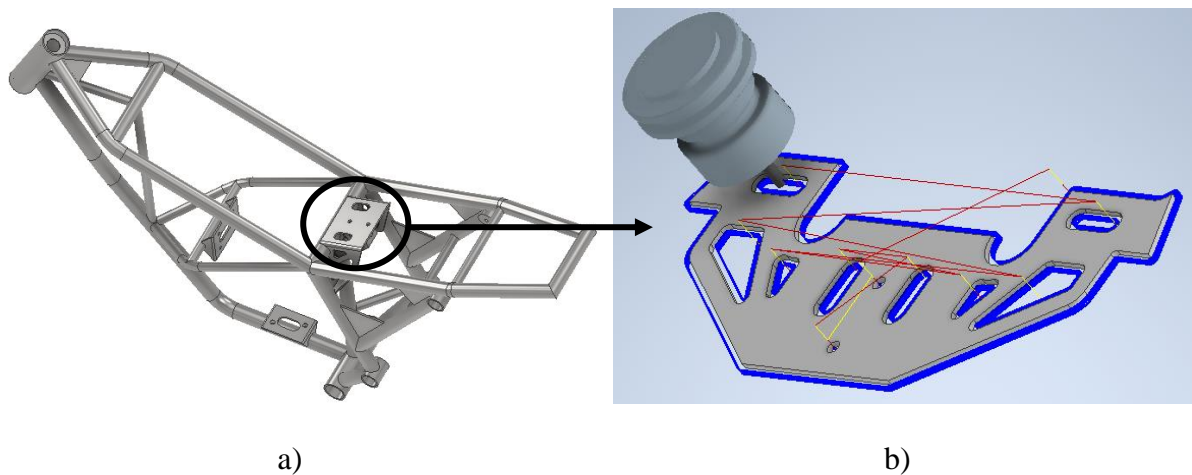


Nota. En la Figura a), se muestra el diseño detallado del procedimiento de soldadura, con indicaciones sobre el tipo de soldadura a emplear. En la Figura b), se efectúa el proceso de soldadura. En la Figura c), se suelda placas externas diseñadas para funcionar como elementos de soporte que contribuyen a la rigidez de la estructura. Fuente: Autor

A continuación, se lleva a cabo un proceso de mecanizado en una fresadora, utilizando el software Inventor CAM para simular los cortes correspondientes, tal como se representarían en la fresadora CNC para su diseño adecuado, como se muestra en la Figura 72.

Figura 72

Proceso de mecanizado en software

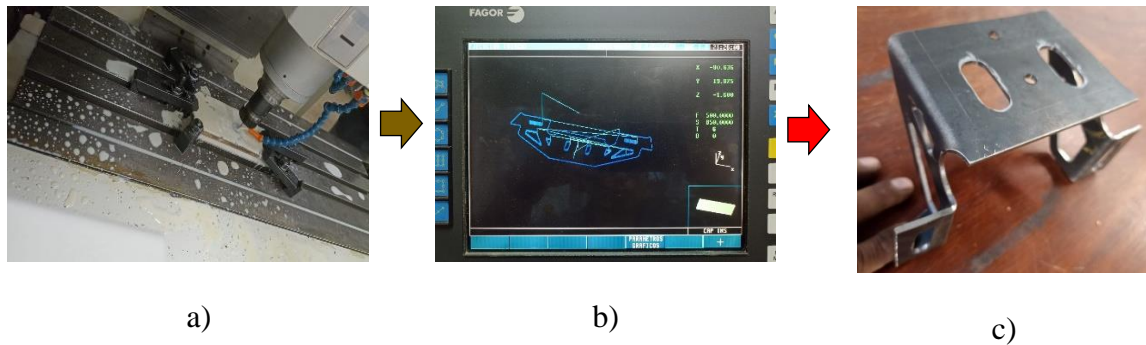


Nota. En la Figura a), se define la configuración del chasis, especificando la pieza que será sometida a procesos de mecanizado. En la Figura b), se desarrolla un diseño con el propósito de facilitar la simulación en el software Inventor CAM. Fuente: Autor

Tras adaptar el modelo en el software correspondiente, se procede a establecer las coordenadas necesarias para el proceso de mecanizado en la fresadora. Durante este proceso, se supervisa cuidadosamente la operación en la pantalla de la fresadora para prevenir posibles daños tanto a la pieza como a la máquina. Para llevar a cabo estas operaciones, se emplean fresas de 4 y 6 mm, como se muestra en la Figura 73. Una vez finalizado el mecanizado, se configuran los dobleces requeridos en la placa. Estas placas se unen posteriormente a la estructura, lo que resulta en la obtención del diseño final de la estructura. Estos elementos se han definido como soportes para componentes eléctricos, ergonómicos en la estructura del chasis de la motocicleta eléctrica.

Figura 73

Proceso de mecanizado en fresadora



Nota. En la Figura a), se describe el proceso de mecanizado llevado a cabo en una Fresadora CNC. La Figura b) muestra la pantalla de visualización en la cual se observa el progreso del proceso de mecanizado, y finalmente, en la Figura c), se representa la pieza final resultante de dicho proceso.
Fuente: Autor

5.6.1 Recubrimiento superficial

Para establecer los acabados del chasis, se consideran cuatro etapas: pulido, aplicación de "wash primer" para eliminar impurezas del material, aplicación de un fondo, y finalmente, la adición de una pintura perlada.

El proceso de pulido implica el refinamiento de la superficie metálica de los objetos, con el propósito de eliminar marcas, rozaduras, rayones y soldaduras. El objetivo principal del pulido es lograr un alisado y brillo en la superficie, mejorando tanto su estética como su resistencia, como se puede apreciar en la Figura 74.

Figura 74

Pulido de la estructura

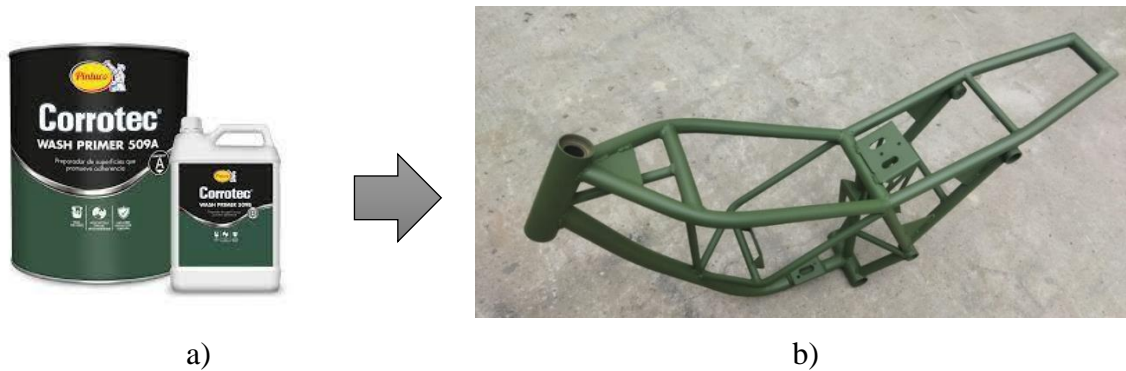


Nota. En la figura actual se representa el proceso de pulido. Fuente: Autor

Luego, se aplica el Wash Primer también llamado imprimación, un recubrimiento de dos componentes diseñado específicamente para mejorar la adherencia en superficies metálicas ferrosas antes de aplicar cualquier sistema de repintada automotriz. Este producto se destaca por su facilidad de uso, secado rápido y excelente compatibilidad con diversas pinturas de acabado, como se ilustra en la Figura 75. Es fundamental preparar únicamente la cantidad precisa de la mezcla requerida, dado que su efectividad se reduce después de transcurridas 8 horas a una temperatura ambiente de 25°C. Tras un breve intervalo de reposo, denominado tiempo de inducción, se procede a aplicar una sola capa del producto en cuestión, sin dilución, con uniformidad y en una fina presentación, empleando con una pistola. Es crucial evitar la aplicación de capas que superen los 12 micrómetros de espesor, ya que esto podría comprometer la adherencia en ciertos sustratos metálicos. A continuación, se permite un período de secado de 10 minutos para lograr un estado al tacto, o de 1 hora si se tiene la intención de aplicar una capa posterior con propiedades anticorrosivas o de recubrimiento.

Figura 75

Aplicación del componente Wash Primer



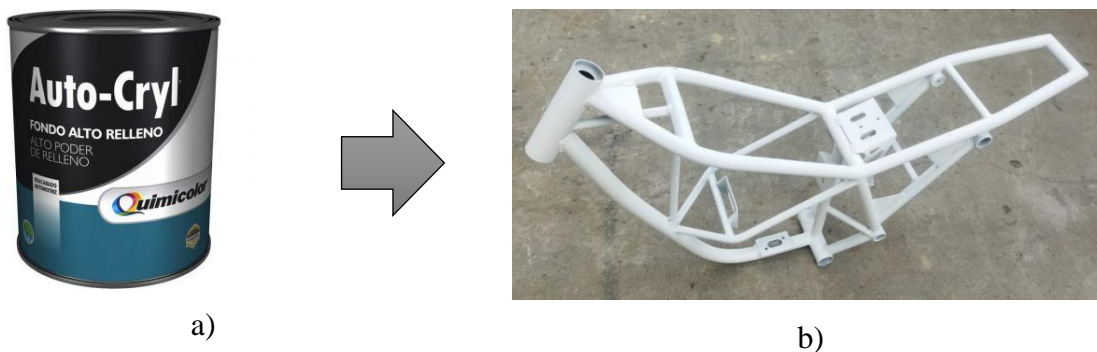
Nota. En la Figura a), se exhibe la aplicación de la capa de Wash Primer, mientras que en la Figura b), se representa la estructura tal como se visualiza después de la aplicación de dicha pintura Wash Primer.

Fuente: Autor

El fondo de pintura automotriz es una capa aplicada previamente a la capa final de pintura en un vehículo, cuya finalidad consiste en preparar la superficie del automóvil para la aplicación de la pintura definitiva, asegurando una base uniforme y suave. Para llevar a cabo la aplicación del fondo de pintura automotriz, se deben seguir una serie de pasos que incluyen la limpieza y preparación de la superficie del vehículo, la aplicación de un imprimador o sellador, y finalmente, la aplicación del fondo. En este caso, se ha incorporado un fondo blando para facilitar la adhesión de la pintura a la estructura, tal como se muestra en la Figura 76. En algunos casos, se puede aplicar una capa de fondo automotriz en una proporción de 1:2 con el diluyente.

Figura 76

Fondo para el chasis

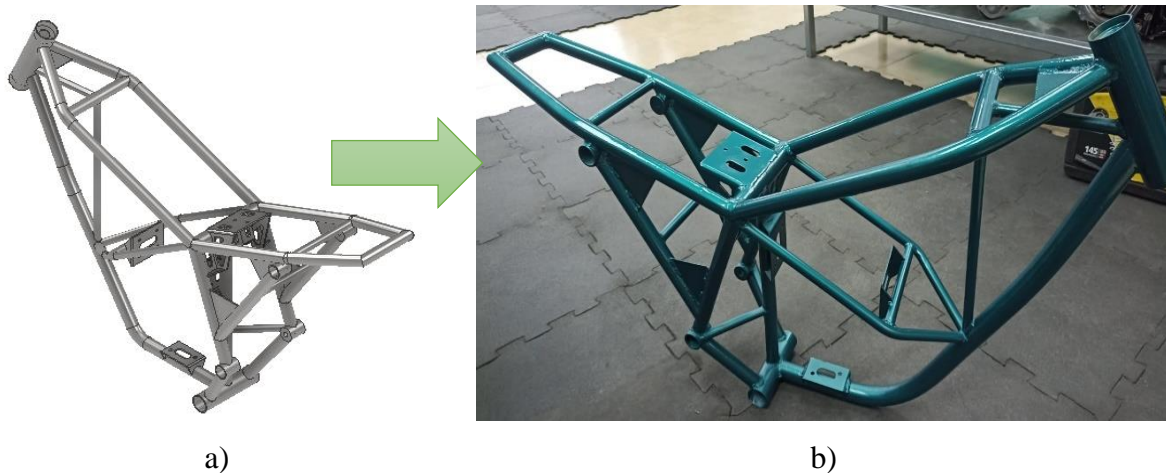


Nota. En la Figura a), se representa la aplicación de la pintura de fondo, mientras que en la Figura b), se visualiza la capa de pintura de fondo aplicada en la estructura. Fuente: Autor

Finalmente, se aplica la pintura automotriz, que desempeña un papel crucial en la prevención de la corrosión del metal al actuar como una capa protectora. Esta pintura contribuye a proporcionar uniformidad y protección contra las condiciones climáticas en la superficie reparada del chasis. Posteriormente, se aplica una capa de barniz para automóviles, cumpliendo múltiples funciones clave. En primer lugar, sella la superficie para resguardar la capa de esmalte de color aplicada previamente y añade una capa adicional de protección para el metal de la carrocería, defendiéndolo de las agresiones externas comunes durante la circulación del vehículo. Además, el barniz para automóviles tiene la capacidad de mejorar estéticamente la superficie al proporcionar diferentes acabados, como brillo, mate o satinado, realzar los efectos de la pintura (como colores metalizados o perlados), fortalecer la superficie, y otorgarle resistencia y durabilidad para resistir las adversidades a las que está expuesta alguna parte del vehículo, como se aprecia en la Figura 77, demostrando el aspecto final del componente.

Figura 77

Producto final de la estructura



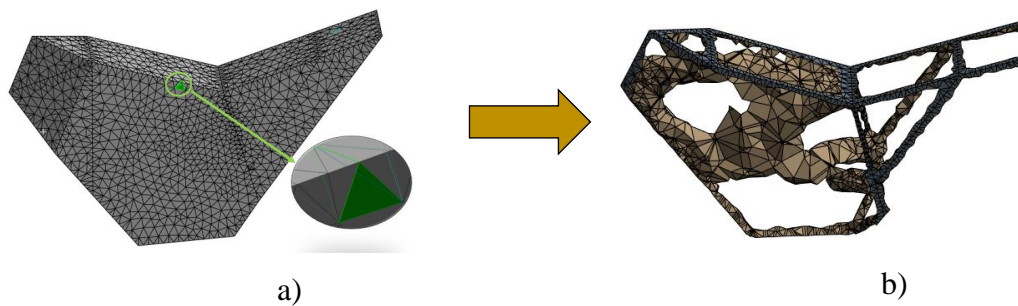
Nota. En la Figura a), se exhibe la estructura utilizada en el diseño, y en la Figura b), se aprecia la estructura en su estado final, tras la aplicación de la pintura automotriz. Fuente: Autor

6. Resultados.

En esta sección, se lleva a cabo una presentación secuencial y de acuerdo con la metodología empleada, del análisis de los resultados obtenidos en cada una de las fases del estudio. A continuación, se muestra en la Figura 78 el resultado del proceso de diseño generativo utilizando una malla de tetraedros. Esta malla consta de un total de 20,943 nodos y 11,970 elementos. El uso de esta malla ha dado como resultado una reducción del peso del objeto en un 85%. Sin embargo, es importante señalar que este refinamiento no se ajusta adecuadamente a la estructura debido a la forma de la malla, lo que ha requerido un mayor número de elementos tetraédricos para representar la geometría de manera adecuada.

Figura 78

Método de mallado tetraedro empleado en el volumen



Nota. En la Figura a), se muestra el mallado tetraédrico, mientras que en la Figura b), se presenta el diseño generativo que utiliza dicho mallado. Fuente: Autor

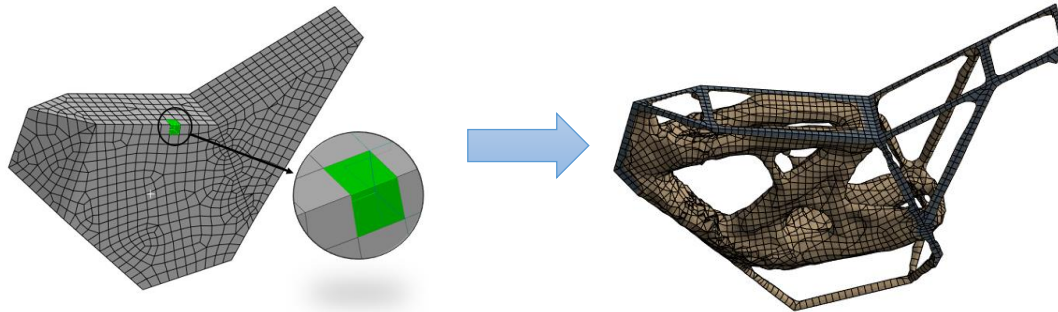
A fin de validar y observar las variaciones y efectos producidos por la elección del volumen de control, se ha realizado una comparación utilizando una malla hexaédrica. Esta comparativa busca analizar tanto la masa del objeto como su capacidad para resistir cargas en relación con la malla de tetraedros previamente utilizada. Con el uso de esta malla hexaédrica, se ha logrado una reducción del 80% en la masa total, lo que resalta la influencia del tipo de malla en la estructura y su calidad en el proceso.

La Figura 79 muestra la representación visual de la malla hexaédrica, la cual consiste en sólidos con seis caras planas y ocho vértices. Esta técnica es preferida por su precisión y eficiencia en la simulación de problemas complejos, lo que se traduce en un refinamiento más técnico. En este caso, la malla hexaédrica se compone de 86,509 nodos y 23,550 elementos, lo

que ilustra su capacidad para representar de manera más detallada y precisa la geometría y el comportamiento estructural.

Figura 79

Método de mallado hexaedro empleado en el volumen



Nota. En la Figura a), se exhibe el mallado hexaédrico, mientras que en la Figura b), se presenta el diseño generativo que hace uso de este mallado. Fuente: Autor

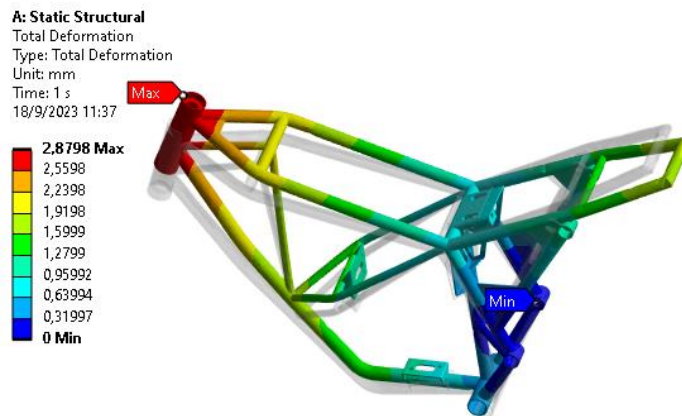
En la comparación entre los diseños generativos utilizando dos tipos de malla diferentes, se destaca la notoria diferencia en el nivel de refinamiento entre el mallado hexaédrico y el mallado de tetraedros. Esta distinción se debe al mayor número de elementos presentes en la malla hexaédrica en comparación con la malla de tetraedros, lo cual se considera beneficioso para lograr una estructura más cercana a la ideal.

La diferencia en la cantidad de elementos entre ambas mallas sugiere que el mallado hexaédrico ha sido subdividido en más regiones, lo que favorece una representación más precisa de la geometría, adaptándose al comportamiento estructural de manera eficiente. Esta mayor subdivisión resulta en un nivel de refinamiento superior en la representación de la estructura, lo cual puede ser fundamental para asegurar la precisión y el éxito de la simulación en el análisis.

A continuación, se proporciona un análisis detallado de la deformación total experimentada por la estructura del chasis. Este análisis se basa en simulaciones realizadas mediante técnicas de análisis por elementos finitos, utilizando específicamente el método de mallado hexaédrico debido a su capacidad de refinamiento. Los resultados de estas simulaciones revelaron que la deformación total máxima alcanzó un valor de 2.8 milímetros. Esta deformación máxima se localizó en una región específica correspondiente a la sección del chasis relacionada con el sistema de dirección, tal como se muestra en detalle en la Figura 80.

Figura 80

Deformación total de la estructura

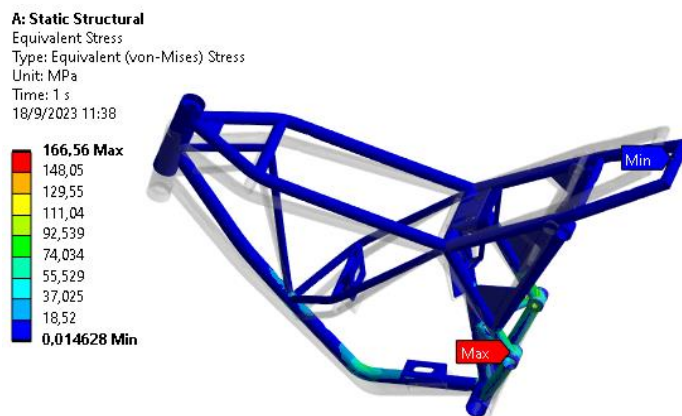


Nota. En la figura actual se presentan los resultados de la deformación experimentada por la estructura como consecuencia de las cargas aplicadas que esta soporta. Fuente: Autor

A continuación, se presenta una descripción detallada de los niveles de tensiones experimentados por la estructura, los cuales han sido evaluados utilizando el criterio de Von Mises. En la Figura 81, se ilustra la distribución de deformaciones, evidenciando una tensión registrada de 166.56 MPa. Este valor de tensión representa el esfuerzo máximo calculado de acuerdo con el criterio de fallo, un parámetro crucial para evaluar la integridad estructural del chasis. Estos resultados satisfacen los requisitos establecidos, lo que posibilita la toma de decisiones informadas acerca del diseño y el rendimiento de la estructura.

Figura 81

Esfuerzos equivalente de Von-Mises



Nota. En la figura, se realiza un análisis de los esfuerzos de Von Mises, este análisis evalúa la distribución de esfuerzos de la estructura. Fuente Autor

El punto de partida para evaluar el factor de seguridad se encuentra en la posibilidad de predecir el rendimiento inicial mediante la comparación entre el esfuerzo máximo de Von Mises y el límite elástico a la tracción del material. En este contexto, se emplea la herramienta de análisis de esfuerzo para presentar los resultados. El cálculo del factor de seguridad en una ubicación específica se lleva a cabo a través de la siguiente expresión: *Factor de seguridad (FDS)* = $\sigma_{limite}/\sigma_{VonMises}$ (Chen & Liu, 2015).

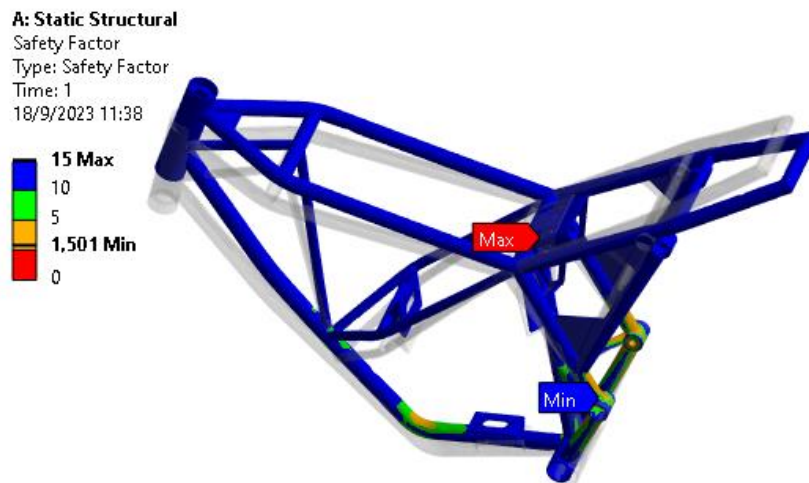
Según (Hibbeler, 2006), el factor de seguridad puede verse comprometido debido a la eventualidad de eventos imprevistos en el diseño, tales como impactos, vibraciones de origen desconocido o cargas accidentales. Además, el autor resalta que el factor de seguridad apropiado para componentes de vehículos y aeronaves, en lo que respecta a la fatiga, debería situarse en un intervalo comprendido entre 1 y 3.

Una estructura se considera segura cuando demuestra un rendimiento satisfactorio al satisfacer los requisitos de resistencia, estabilidad y rigidez. La aptitud en el comportamiento de una estructura se refleja en su capacidad para cumplir con estas exigencias esenciales. Siguiendo las investigaciones realizadas por Happian Smith, (2002), se establece que la tensión estática no debe exceder el 67 % del límite elástico del material, lo que implica la adopción de un factor de seguridad mínimo de 1.5 como estándar de aceptación.

La estructura fue sometida a un análisis mediante un software de confiabilidad para obtener una evaluación precisa de las deformaciones, el esfuerzo máximo, y el factor de seguridad, dependiendo del tipo de carga aplicada. En este caso específico, se ha determinado que se cumple con un factor de seguridad mínimo de 1.5, como se muestra en la Figura 82. Este valor ratifica que la estructura analizada es altamente idónea para su rol como componente en la construcción del chasis, ya que excede ampliamente los estándares de seguridad requeridos, lo que aporta un nivel adicional de confiabilidad en su desempeño estructural.

Figura 82

Factor de seguridad



Nota. En la imagen proporcionada, se lleva a cabo un análisis del factor de seguridad utilizando la plataforma Ansys Workbench. Fuente: Autor

Finalmente, uno de los aspectos críticos y decisivos en este análisis se relaciona con el factor de seguridad. Este parámetro desempeña una función esencial en asegurar que la estructura del chasis posea la resistencia adecuada para soportar tanto los componentes de la motocicleta como sus ocupantes. Dado que el propietario tiene la capacidad de modificar tanto los elementos constitutivos como la carga de los accesorios y los pasajeros, es imperativo garantizar que el vehículo sea capaz de soportar al menos el doble de las cargas totales consideradas en el análisis. Aunque es improbable que la carga llegue a exceder en más de 1.5 veces las cargas previstas en el análisis, resulta esencial que el chasis posea la suficiente robustez para enfrentar situaciones extremas.

Este enfoque no solo respalda la seguridad en casos de accidente al permitir que el vehículo absorba impactos y experimente una deformación controlada antes de experimentar fracturas, sino que también contribuye a proporcionar un nivel superior de seguridad a los ocupantes del vehículo en tales circunstancias.

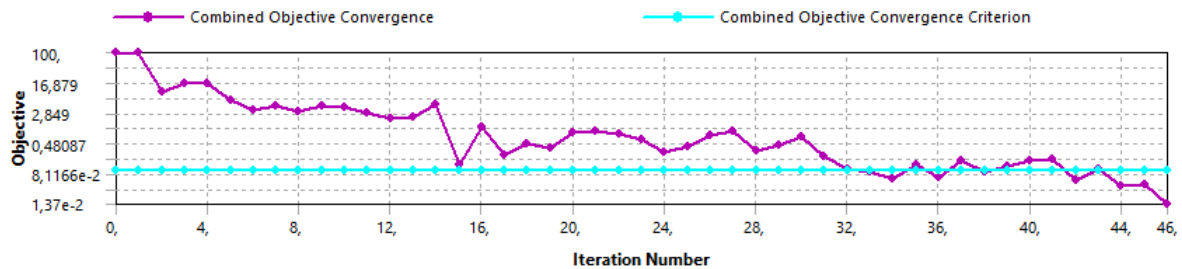
En la Figura 83, se muestra la evolución de los objetivos combinados a lo largo de un proceso de optimización. En las primeras iteraciones, se observa una alta variabilidad en los resultados, pero con el tiempo, el proceso tiende hacia una convergencia satisfactoria. Este comportamiento se extiende desde el inicio del proceso (iteración 0) hasta la iteración 46. A

medida que aumenta el número de iteraciones, se puede apreciar que la solución comienza a converger, alcanzando un estado estabilizado en un tiempo de 32 pasos de soluciones. Esto significa que se realizaron múltiples cálculos para llegar a una solución que satisface los objetivos establecidos.

Finalmente, después de 46 iteraciones combinadas, los valores de los objetivos convergen hacia los niveles deseados, llegando a un estado óptimo en términos de resistencia y carga estructural.

Figura 83

Número de iteraciones en el objetivo de convergencia



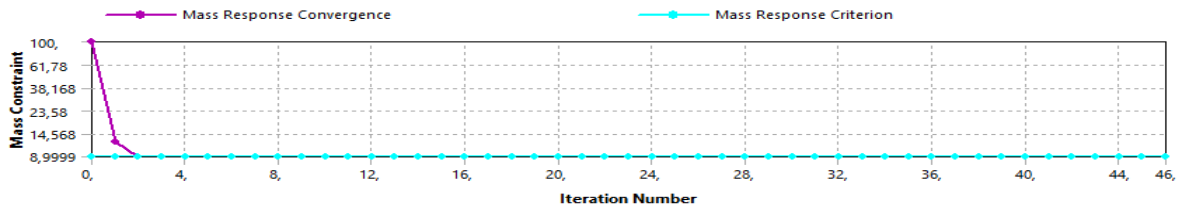
Nota. En la imagen proporcionada se aprecia la representación gráfica del número de iteraciones necesarias para iniciar el proceso de convergencia de la solución. Fuente: Autor

En la Figura 84, se representa la evolución de la respuesta de masa y cómo esta converge durante el proceso de análisis. Las primeras iteraciones, que abarcan desde la iteración 0 hasta la 2, exhiben fluctuaciones notables en la respuesta de masa antes de lograr una convergencia satisfactoria. Es importante destacar que la masa de convergencia se refiere a la manera en que la masa total del sistema se ajusta en relación a ciertos parámetros o condiciones de carga.

El objetivo primordial es garantizar que la respuesta obtenida en el modelo o simulación sea estable y que converja hacia valores consistentes y precisos. Esto se logra mediante el refinamiento de los elementos finitos, el aumento en la discretización y la realización de iteraciones en el análisis.

Figura 84

Número de iteraciones de convergencia en respuesta de la masa



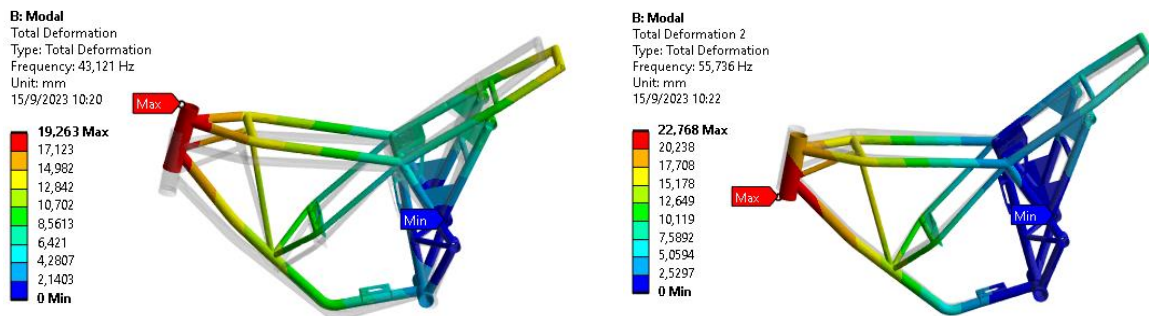
Nota. La figura ilustra el proceso de convergencia a través de la reducción de masa. Fuente: Autor

En esta sección, se enfoca en el análisis de vibraciones, especialmente en los puntos críticos del sistema, abarcando un rango que va desde 1 m/s hasta 20 m/s, equivalente a frecuencias entre 0.5 Hz y 31.8 Hz. La elección de este rango se justifica debido a que la motocicleta, sometida a diversas perturbaciones y regulaciones, puede experimentar vibraciones de baja frecuencia en circunstancias específicas.

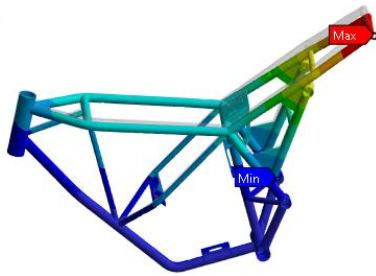
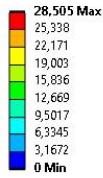
Estas frecuencias críticas son fundamentales para comprender y abordar las características de vibración y resonancia en la motocicleta, lo cual es esencial para su diseño y funcionamiento óptimo, sobre todo en el caso de motocicletas eléctricas que pueden operar a bajas revoluciones. La Figura 85 muestra el análisis modal de frecuencias, destacando valores de 43.12 y 55.73 Hz que se encuentran dentro del rango estudiado. Estos datos son cruciales para la evaluación y el diseño de la motocicleta eléctrica, ya que permiten anticipar y resolver problemas relacionados con vibraciones y resonancias en condiciones críticas de funcionamiento.

Figura 85

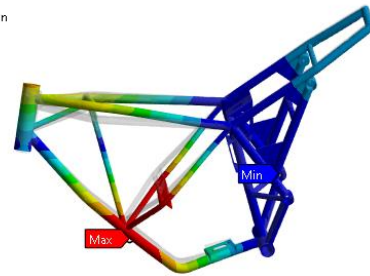
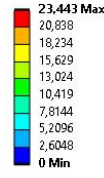
Análisis de vibraciones



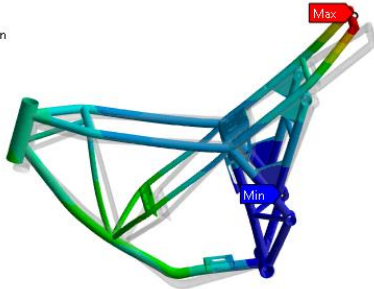
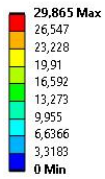
B: Modal
Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Frequency: 104,59 Hz
Unit: mm
15/9/2023 10:23



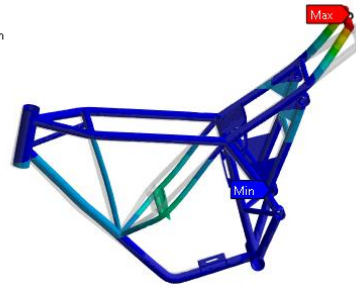
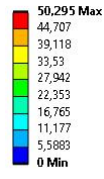
B: Modal
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Frequency: 146,51 Hz
Unit: mm
15/9/2023 10:24



B: Modal
Total Deformation 5
Type: Total Deformation
Frequency: 175,54 Hz
Unit: mm
15/9/2023 10:25



B: Modal
Total Deformation 6
Type: Total Deformation
Frequency: 264,39 Hz
Unit: mm
15/9/2023 10:25



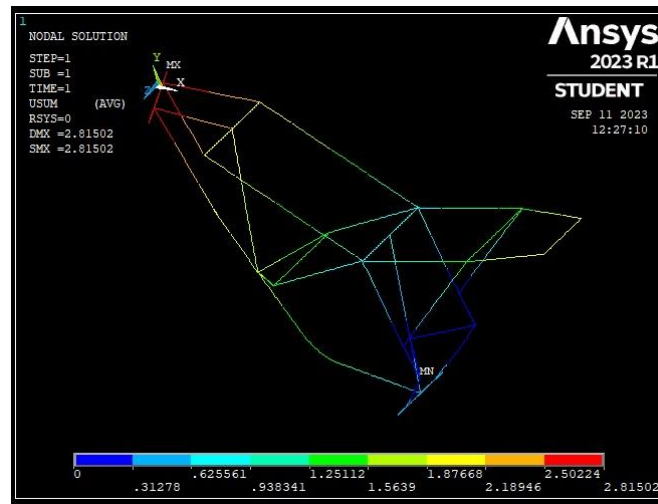
Nota. Se lleva a cabo un análisis de vibraciones utilizando el software Ansys Workbench. Fuente: Autor

6.1 Resultados en ANSYS APDL Y WORKBENCH

Los diagramas de simulación de ANSYS APDL pueden demostrar los resultados de un análisis de elementos finitos, en la Figura 86, deformaciones, de 2,815 mm de desplazamientos, siendo los puntos más críticos que se muestra de color rojo. Además, los diagramas pueden ayudar a visualizar el comportamiento de una estructura o componente bajo diferentes cargas. Mientras que en la Figura 87, muestras las deformaciones en ANSYS WORKBENCH de 2.879 mm de desplazamiento, como se puede apreciar hay poca variación de datos debido a que en ANSYS APDL realiza una malla hexaédrica.

Figura 86

Deformaciones en ANSYS APDL

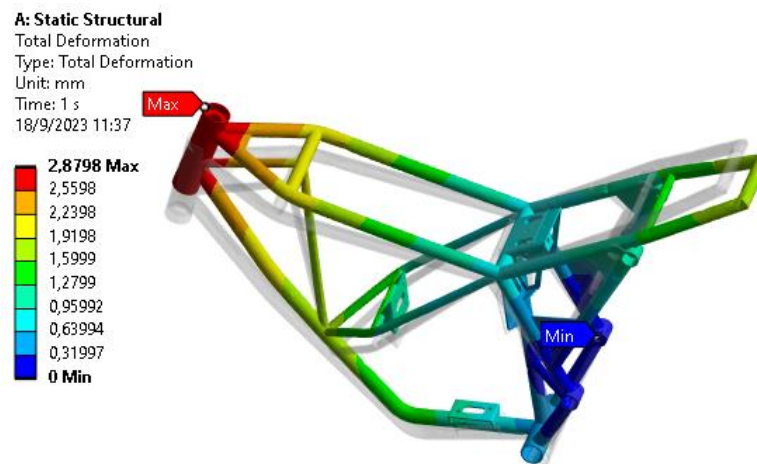


Nota. En la figura actual se representa la deformación mediante la utilización del software Ansys APDL.

Fuente: Autor

Figura 87

Deformación de ANSYS WORKBENCH



Nota. En la figura se ilustra la deformación a través de la utilización del software Ansys Workbench.

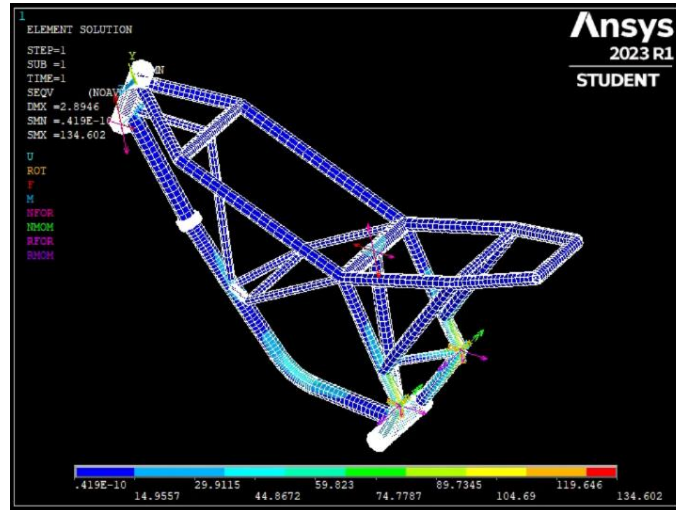
Fuente: Autor

Los diagramas de deformación mediante el esfuerzo de Von Mises en ANSYS APDL como se observa en la Figura 88, deformaciones, de 134.6 MPa. Mientras que en la Figura 89, muestras los esfuerzos en ANSYS WORKBENCH de 166.56 MPa, estos podemos visualizar que los datos de WORKBENCH son relativamente mayores que los datos de APDL, esta

diferencia en las simulaciones se da por los diferentes modelos de diseño que podría ser un factor importante para el análisis de la estructura.

Figura 88

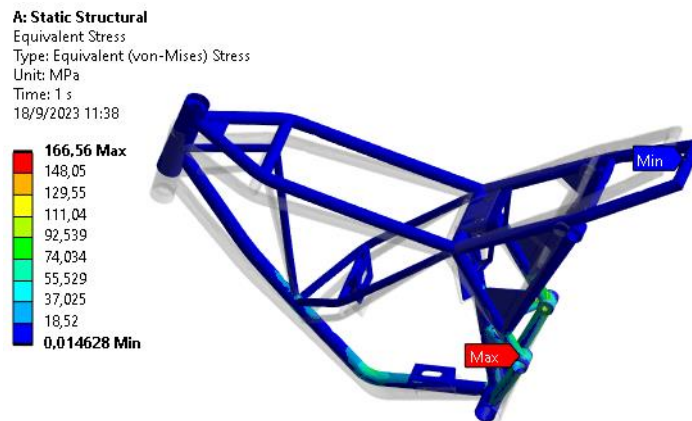
Esfuerzo de Von-Mises ANSYS APDL



Nota. En la figura actual, se representa la distribución de los esfuerzos de Von Mises mediante el empleo del software Ansys APDL. Fuente: Autor

Figura 89

Esfuerzos de Von-Mises en ANSYS WORKBENCH



Nota. En la figura se ilustran los esfuerzos de Von Mises a través del empleo del software Ansys Workbench. Fuente: Autor.

Al efectuar un cuadro comparativo, tal como se presenta en la Tabla 11, proporciona una visión de los resultados en respuesta a un estudio llevado a cabo utilizando las herramientas de simulación ANSYS APDL y Workbench. La elección de estas herramientas se encuentra

fundamentada en la destacada capacidad de ANSYS APDL para otorgar un control más eficaz sobre la malla, lo que posibilita un refinamiento en las zonas de la estructura que experimentan niveles considerables de tensión. Además, ANSYS APDL ofrece la flexibilidad de manipular aspectos geométricos y la aplicación de un control de refinamiento de malla con mayor precisión. Sin embargo, Workbench no permite la alteración de la geometría del modelo.

El desenlace de esta elección se traduce en ANSYS APDL en una representación más precisa y minuciosa del comportamiento del sistema en las áreas de interés. Esto, a su vez, favorece una comprensión más profunda de la respuesta del sistema ante las condiciones de carga y las restricciones impuestas en los límites del dominio.

Tabla 11

Análisis Comparativo entre el Software Ansys APDL y Workbench

Software	Numero de nodos	Número de elementos	Deformaciones (mm)	Esfuerzos (MPa)
Ansys APDL	4389	1468	2,815	134,602
Ansys Workbench	20,943	11,970	2,8798	166,56

Nota. La presente tabla exhibe los resultados comparativos entre Ansys APDL y Workbench.

Fuente: Autor

7. Discusión.

La concepción del chasis desempeña un rol primordial en la estabilidad y protección inherente a la moto eléctrica. La configuración estructural del chasis, además de contribuir a la estética del diseño, debe ser abordada con un enfoque técnico que priorice los análisis estructurales, se eligió el acero negro como material de construcción debido a su disponibilidad en el mercado y su alta resistencia, lo que fortalece la estructura del chasis. Además, se consideró la integración del chasis con la batería, lo que implicó revestir el diseño con una estructura adicional para garantizar la seguridad de la batería.

La batería representa uno de los componentes más cruciales en el contexto de la moto eléctrica, ya que influye directamente en su autonomía y rendimiento. La batería que se aloja en el chasis es de tipo litio, y su capacidad, voltaje, carga y descarga son aspectos de relevancia. Asimismo, se exploró la posibilidad de integrar la batería de manera eficiente con el chasis y el motor.

En el trabajo de Jeyapandiarajan et al., (2018) realizaron un análisis exhaustivo del bastidor de un vehículo, centrándose en sus puntos de suspensión delanteros. Este análisis tuvo en cuenta diversas fuerzas actuantes sobre el chasis, incluyendo la masa del conductor, la batería, el motor y las fuerzas de aceleración. Aunque el objetivo principal del estudio fue garantizar la estabilidad estructural, se sugiere que podrían mejorarse las condiciones con la incorporación de masas concentradas y cargas distribuidas en el componente estructural, tal como se presenta en este trabajo. Esta consideración adicional podría contribuir a una distribución más eficaz de las fuerzas y a una optimización aún mayor de la resistencia y estabilidad del bastidor del vehículo, mediante el análisis de un método de malla adecuado para el chasis, así mismo el considerar los efectos de las vibraciones como cargas de fatiga, son importantes en el diseño, para lo cual se ha definido el análisis de modos de vibración en la estructura, siendo los más críticos para el análisis de la motocicleta.

En la investigación de Singh Thakur et al., (2020) llevaron a cabo una comparación entre dos diseños de prototipos destinados a transformar una motocicleta convencional en una de propulsión eléctrica. Sin embargo, se detectó una limitación en las soluciones propuestas debido a la ausencia de un análisis del comportamiento dinámico necesario para definir las condiciones de trabajo adecuadas. En consecuencia, en este análisis se abordó el comportamiento dinámico

con el objetivo de asegurar un diseño óptimo que cumpla con los requisitos de rendimiento y seguridad.

En el estudio de Ahmed & Gupta, (2022), se analizan las condiciones y limitaciones relacionadas con el proceso de diseño generativo, teniendo en cuenta el material utilizado. A pesar de las notables ventajas del titanio, como su resistencia a la corrosión y su ligereza, su alto costo ha llevado a las motocicletas que emplean este material a posicionarse en la categoría de productos de alta gama. Con el propósito de fomentar la adopción de vehículos eléctricos de dos ruedas y contribuir a la reducción de la contaminación ambiental, se recomienda considerar materiales más económicos. En este contexto, se lleva a cabo un análisis del acero al carbono, un material reconocido por su rentabilidad y una serie de propiedades físicas destacadas, como su resistencia, capacidad para soportar altas temperaturas, resistencia a la tracción, alta maquinabilidad y otras características superiores. El menor costo y las propiedades versátiles del acero lo convierten en una elección ampliamente preferida en la industria automotriz.

Baryshnikova & Strugovshchikov, (2021), enfatizan que el proceso de diseño efectivo implica no solamente la aplicación de la optimización topológica y el diseño generativo, sino principalmente una comprensión profunda de las características de diseño, los parámetros geométricos, las fuerzas externas y las condiciones de carga específicas que afectan a distintos tipos de motocicletas. No obstante, se ha identificado una limitación en las soluciones propuestas debido a que el diseño generativo se define como un procedimiento que emplea algoritmos computacionales con el propósito de explorar una amplia variedad de soluciones de diseño, tomando en consideración restricciones y objetivos particulares. En consecuencia, el objetivo primordial de este enfoque de diseño radica en maximizar la eficiencia estructural y mejorar el rendimiento dinámico de la motocicleta eléctrica. Este cometido se logra mediante el empleo de un software de diseño generativo respaldado por algoritmos avanzados basados en inteligencia artificial y optimización topológica.

8. Conclusiones.

Los aspectos dinámicos que se consideran al abordar la definición de la geometría son altamente efectivos y se ajustan de manera óptima a las condiciones y demandas de trabajo específicas. Esto se debe a que estas variables relacionadas con la dinámica son esenciales y ejercen un control restrictivo fundamental sobre el modelo. Su cuidadosa consideración y ajuste adecuado aseguran que el diseño sea adecuado y capaz de cumplir de manera eficiente con los requisitos y expectativas de rendimiento.

Cuando se lleva a cabo la selección de materiales en la base de datos del software CesEduPack, es común encontrar que no todos los materiales disponibles cumplen con las normativas requeridas. Para abordar esta situación, se realiza la creación de normativas locales específicas que se ajusten a las mismas características y requisitos planteados en la metodología del proyecto. Con este fin, se propone la implementación de la norma NTE INEN 2415, la cual se diseña de manera que sus características sean coherentes y coincidan con las que se obtienen en la fase de selección de materiales. De esta manera, se garantiza que los materiales utilizados en el proyecto cumplan con los estándares y especificaciones necesarios para su correcto desempeño, a pesar de que no todos estén inicialmente en conformidad con las normas establecidas.

La metodología de análisis de elementos finitos ha habilitado la realización de cálculos matemáticos con similitud a datos empíricos, aunque presenta limitaciones inherentes en la abordabilidad de problemas de alta complejidad. Un análisis estructural tradicional está limitado para abordar este tipo de problemas, ya que se trata de un problema multidimensional, donde se dispone de un número alto de grados de libertad en relación a los nodos y elementos de la estructura. Aunque en el documento se ha establecido una validación del método mediante una aproximación analítica, este se limita por la complejidad, requiriendo de ordenadores para abordar problemas complejos.

En el contexto del diseño generativo, uno de sus objetivos primordiales radica en la consecución de la optimización de la reducción de masa, específicamente en el caso de una motocicleta de turismo urbano relacionado a la categoría de la moto y valores promedio de peso. Se ha logrado una disminución de peso del 15% en comparación con lo que se podría considerar

como la masa típica para dicho tipo de vehículo, sin que ello conlleve la necesidad de sacrificar las demás propiedades relevantes para el desempeño y funcionalidad del producto.

En el análisis modal realizado, se observa que las frecuencias de 45 y 55 Hz no presentan una criticidad significativa. Esto se debe a que, debido a las perturbaciones y regulaciones experimentadas por la motocicleta durante su operación a velocidades máximas, las frecuencias en este rango (1 a 20 m/s) tienden a ser bajas. Es por ello, que el análisis estructural se destaca que las frecuencias comienzan a generar deformaciones notables a frecuencias más elevadas, específicamente alrededor de los 264 Hz.

9. Recomendaciones y trabajos futuros.

Como una perspectiva para trabajos futuros, se sugiere la implementación de un enfoque similar al presentado en el estudio actual, aunque este último se ha centrado en la utilización de materiales de composición de acero al carbono AISI 1015. Se plantea la realización de una propuesta análoga, pero dirigida hacia materiales compuestos, con el propósito de validar su eficacia y aplicabilidad.

Tras el ensamblaje de la estructura con sus componentes y la puesta en funcionamiento del vehículo impulsado por un motor eléctrico, es factible llevar a cabo la medición de las deformaciones del chasis utilizando delgas. Este procedimiento permitirá realizar un análisis de fatiga, enfocado en evaluar la vida útil de los puntos de unión y soldaduras, con el propósito de aplicar técnicas de mantenimiento adecuadas.

Realizar pruebas experimentales exhaustivas para detectar posibles fallas por fatiga, considerando el funcionamiento ininterrumpido de la motocicleta. Estas pruebas se destinan a evaluar la resistencia y longevidad de los componentes de la motocicleta en condiciones de uso real, prestando particular atención a la fatiga de materiales y la degradación progresiva que puedan experimentar durante su operación habitual.

10. Bibliografía.

- AEADE. (2022). *Asociación de empresas Automotrices del Ecuador*. <https://www.aeade.net/>
- Ahmad, M. I., & Dorlikar, P. (2021). Design Study of an Electric Motorcycle Chassis Obtained using Topology Optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1128(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1128/1/012013>
- Ahmed, S., & Gupta, M. K. (2022). Investigations on motorbike frame material and comparative analysis using generative design and topology optimization. *Materials Today: Proceedings*, 1440–1446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.040>
- Alarcón, I. (2018, October 11). *Concentración de gases contaminantes*. <https://www.elcomercio.com/tendencias/sociedad/concentracion-gases-contaminantes-china.html>
- Alawadhi, E. M. (2010). *Finite element simulations using ANSYS*. CRC Press.
- Alemán Brito, A. (2020). *Diseño de sistema estructural y suspensión trasera de una motocicleta de competición*.
- Álvaro, V. M. (2020). *Análisis y estudio de diferentes tipos de uniones soldadas para su optimización y mejora*.
- Andersen, P. H., Mathews, J. A., & Rask, M. (2009). Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles. *Energy Policy*, 37(7), 2481–2486. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.032>
- Antunez, J. (2022). Estudio y valoración del procedimiento de soldadura en láminas de aleación de aluminio AW5086. *Revista Ingeniería*, 6(14), 100–123. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.93>
- Arias Duque, A., & Mena Mejía, A. M. (2009). *Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda*.
- Arias Paz, M. (2003). *Motocicletas* (32nd ed.).
- Arnob, F. F., Khan, S. K., & Bhuiyan, H. K. (2022). Design, fabrication and analysis of chassis for electric bike. *International Journal of Innovative Research in Science? Engineering and Technology*, 3(4), 025–031.
- Ashby, M. F. (2016). *Materials Selection in Mechanical Design* (5th ed.).
- AutoCrash. (2018, November 9). *Identifique los acabados de la pintura automotriz*. <https://www.revistaautocrash.com/identifique-los-acabados-de-la-pintura-automotriz/>

- Avila Chaurand, R., Prado León, L. R., González Muñoz, E. L., & Universidad de Guadalajara. Centro de Investigaciones en Ergonomía. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana* (2nd ed.). Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, División de Tecnología y Procesos, Departamento de Producción y Desarrollo, Centro de Investigaciones en Ergonomía.
- Baryshnikova, O. O., & Strugovshchikov, D. V. (2021). Methodology for Effective Design of Motorcycle Structures. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 10(7), 400–405. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.7.400-405>
- Beer, J., & DeWolf, M. (2013). *Mecánica de materiales* (7th ed.).
- Bendsùe, M. P., & Sigmund, O. (1999). Material interpolation schemes in topology optimization. *Springer*, 635–654. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s004190050248>
- Bhise, V. D. (2012). *Ergonomics in the Automotive Design Process*.
- Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9th ed.).
- Casajús, L. (2012, March 1). *Tipos de chasis de motocicleta*. https://www.infomylsa.com/www_infomylsa/Documentos%20PDF/CHASISMOTOS.pdf
- Castillo Gutiérrez, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., & Rodríguez Baracaldo, R. (2018). Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Revista Chilena de Ingeniería*, 26(3), 430–439.
- Chen, X., & Liu, Y. (2015). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*.
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics* (Second).
- Díez Berja, J. A. (2020). *Diseño del sistema de frenado de una motocicleta para circulación en carretera*.
- Dominica. (2021). *Emisiones de CO2*. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/ecuador>
- Erazo Arteaga, V. A. (2022). El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina. *Información Tecnológica*, 33(2), 297–308. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200297>

- Espinosa Naula, E. A., & Román Quevedo, S. X. (2021). *Optimización topológica de un chasis tubular para vehículo eléctrico biplaza*.
- Foale, T. (2002). *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and science*.
www.tonyfoale.com
- Foale, T. (2006). *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and science* (Segunda Edición).
- Fonseca Herreo, L. C., Valdes Solano, D. M., & Alba Maldonado, J. M. (2019). Estimation of informal transport motorcycle emissions in the city of Ocaña, Colombia, as research training strategy for environmental engineering students. *Journal of Physics: Conference Series*, 1408(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1408/1/012014>
- García García, I. (2013). *Diseño y desarrollo de un chasis de una motocicleta de 250cc para la "II Competición Internacional MotoStudent."*
- García Torija, A. I. (2021). *Diseño generativo algoritmos como método de diseño*.
https://oa.upm.es/66899/1/TFG_Ene21_Garcia_Torija_AnaIsabel.pdf
- Habibie, A., & Sutopo, W. (2020). A Literature Review: Commercialization Study of Electric Motorcycle Conversion in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012048>
- Happian Smith, J. (2002). *An Introduction to Modern Vehicle Design*.
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales* (6th ed.).
- ICA. (2023). *Índice de calidad del aire (ICA) en Loja, Ecuador*.
<https://www.calidadaire.net/ecuador/loja.html>
- INEC. (2021). *Instituto Nacional de estadísticas y censos (INEC-2021)*.
https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica de Transporte/ESTRA_2021/2021_TABULADOS ESTRA.xlsx
- IPAC. (2019). *Catálogo*.
- Iparraguirre, L. (2010). *Mecánica básica fuerza y movimiento*.
- ISO 7250. (2017). *Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico*.

- ISO 10392. (2011). *Determination of centre of gravity*.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/2ff5fcee-4fd8-4784-93a5-60dcd6927f50/iso-10392-2011>
- Jelani, K. M., Razip, M. H. M., Nazri, N. A., Sani, M. S. M., & Yasar, M. (2019). Dynamics investigation on motorcycle chassis based on Finite Element (FE) modelling and updating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012103>
- Jeyapandiarajan, P., Kalaiarassan, G., Joel, J., Shirbhate, R., Felix Telare, F., & Bhagat, A. (2018). Design and Analysis of Chassis for an Electric Motorcycle. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13563–13573. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.352>
- Khan, S., Bhuiyan, H. K., & Arnob, F. F. (2022). Design, fabrication and analysis of chassis for electric bike. *International Journal of Innovative Research in Science? Engineering and Technology*, 3(4), 025–031. [https://doi.org/10.35248/ijirset.22.3\(4\).25-3](https://doi.org/10.35248/ijirset.22.3(4).25-3)
- Kudale, S., Diyewar, P., & Vele, N. (2022). Design and Analysis of Electric Bike Chassis Using Glass Fibre Composites. *Materials Science Forum*, 1073, 67–79. <https://doi.org/10.4028/p-np91d4>
- Lizano Núñez, C. D. (2017). *Diseño y construcción de la estructura tubular para la carrocería del prototipo de un auto eléctrico biplaza UTA-CIM17*.
- López Carpes, J. Á. (2017). *Diseño y fabricación de un chasis de una motocicleta de competición usando analogía de plasticidad*.
- Manso Agundez, J. (2019). *Análisis y optimización topológica de un chasis para Formula Student*.
- Mondelo, P. R. (2006). *Ergonomía 3 : Diseño de puestos de trabajo* (E. Gregori Torada & P. Barrau Bombardó, Eds.; 3a. ed.) [Book]. Alfaomega.
- Montesdeoca, R. J. (2022). *Análisis de las prestaciones estructurales de un chasis vehicular tubular de un vehículo eléctrico bi-plaza*.
- Nayak, A. K., Ganguli, B., & Ajayan, P. M. (2023). Advances in electric two-wheeler technologies. *Energy Reports*, 9, 3508–3530. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.008>
- Norma RTE INEN 136. (2017). *Motocicletas*.
<http://www.pudeleco.com/files/Modificatoria%201%20RTE%20136.pdf>

- NTE INEN 2204. (2017). *Gestión Ambiental Aire Vehículos Automotores Límites Permitidos de Emisiones Producidas por Fuentes Móviles Terrestres que Emplean Gasolina.*
- Núñez Gamoneda, Y. (2016). *Diseño de un chasis ligero Monoviga para una motocicleta OFFROAD.*
- Ochoa Palacios, P. J., & Salamea González, V. A. (2016). *Optimización del chasis de la motocicleta "KUNTUR", mediante el uso de un programa computacional "CAE."*
- Pabón, D. (2020). *Diseño y construcción del chasis, suspensión y tren de potencia de una moto eléctrica.*
- Palanivendhan, M., Senthilkumar, S., Chandradass, J., Reddy, V., & Raju, P. (2020). Design and development of hybrid chassis for two wheeler motorcycle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 993(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/993/1/012129>
- Pérez Villanueva, Á. I. (2019). *Diseño y desarrollo de un chasis de motocicleta scooter para una propuesta de transporte alternativo.*
- Ramos García, A. L. (2018). *Metodología de diseño de chasis en aluminio.*
- Rege, S., Khatri, C., Nandedkar, M., & Wagh, N. (2017). Design and analysis of frame for Electric Motorcycle. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(10), 19500–19507. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0610039>
- Scappaticci, L., Bartolini, N., Guglielmino, E., & Risitano, G. (2017). Structural optimization of a motorcycle chassis by pattern search algorithm. *Engineering Optimization*, 49(8), 1373–1387. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1256393>
- Shital, M., Anjali, G., Suraj, D., & Pankaj, W. (2019). *A Review: Design , Analysis & Optimization of E-Bike.* 1597–1599.
- Silva, H. M., Rodrigues, H. L., Novera, J. T., Fernandes, L., & Pontes, A. J. (2021). *2D Heat Transfer Simulation of an Injection Mold: Comparison Between ANSYS Workbench and ANSYS Mechanical APDL.* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1162715/v1>
- Singh Thakur, S., Ankit Roy, Er., Dhakad, S. K., & Alpesh Jain, Er. (2020). Design of Electric Motorcycle. *2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, SCEECS 2020, Prototype I*, 7–10. <https://doi.org/10.1109/SCEECS48394.2020.116>

Tamarit Caudeli, D. (2018). *Diseño y estudio técnico de un chasis de motocicleta de 250c.c. para competición.*

Vogel, C. (2009). *Build your Own Electric Motorcycle.*

Zuluaga Bermúdez, D. A. (2019). *Máquina dobladora de tubos 1 ½".*

11. Anexos

Anexo 1. Cálculos empleando el software Mathcad

Geometría de la motocicleta

p = distancia entre ejes
 d = desplazamiento de horquilla
 ε = Ángulo de ataque
 R_r = radio de la rueda trasera 110/70-17
 R_f = radio de la rueda delantera 90/80-17
 t_r = radio de la sección transversal del neumático trasero
 t_f = radio de la sección transversal del neumático delantero

Parámetro geométricos

ρ_r = radio del círculo central del guiado frontal
 ρ_f = radio del círculo central del guiado posterior
 a_n = normal trail
 b_n = normal posterior trail
 a = trail mecánico

Datos

$p := 1350 \quad mm$
 $a := 100 \quad mm$

$$\varepsilon := \frac{25 \cdot \pi}{180}$$

$R_r := 295.9 \quad mm$
 $R_f := 285.9 \quad mm$
 $t_r := 38.5$
 $t_f := 36$

Ejercicios

$d := R_f \cdot \sin(\varepsilon) - \cos(\varepsilon) \cdot a$
 $d = 30.1958 \quad mm$

$$Trail := \frac{R_f \cdot \sin(\varepsilon) - d}{\cos(\varepsilon)}$$

$$Trail = 100$$

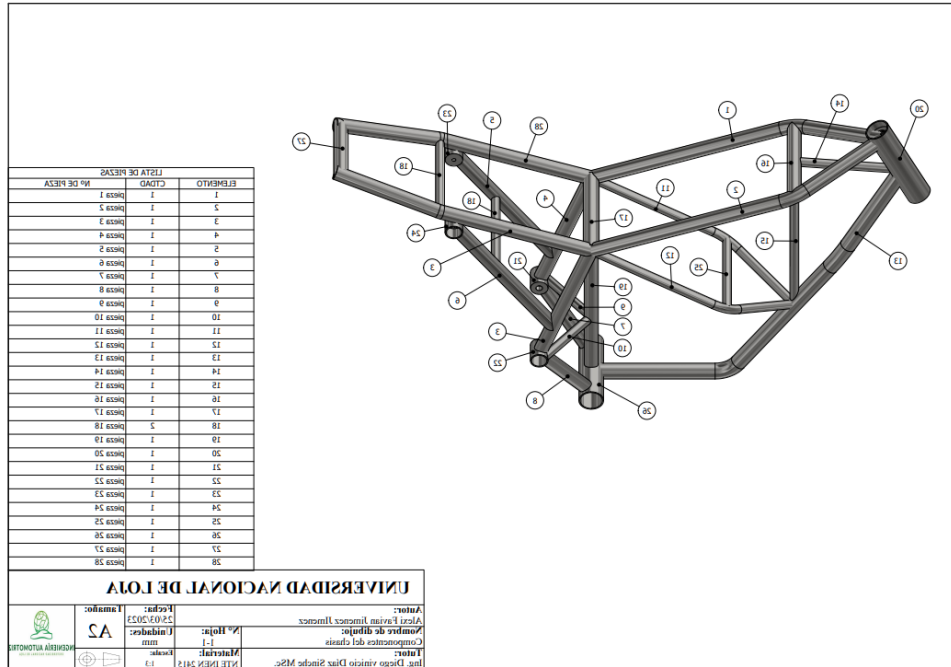
$\rho_r := (R_r - t_r)$
 $\rho_r = 257.4$

$\rho_f := (R_f - t_f)$
 $\rho_f = 249.9$

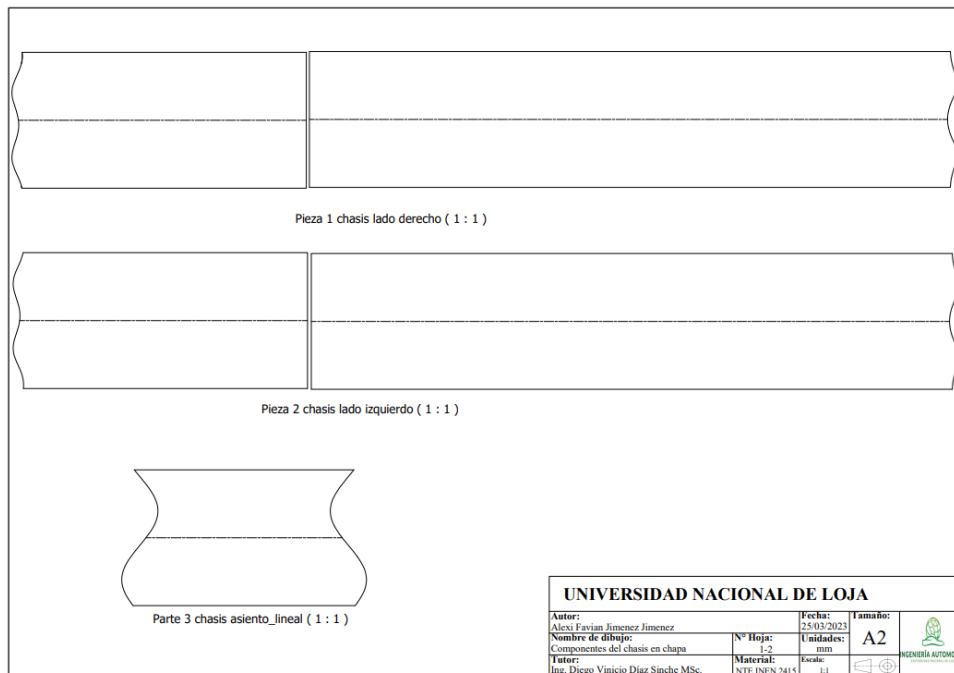
$a_n := R_f \cdot \sin(\varepsilon) - d$
 $a_n = 90.6308$

$b_n := (p + a) \cos(\varepsilon)$
 $b_n = 1314.1463$

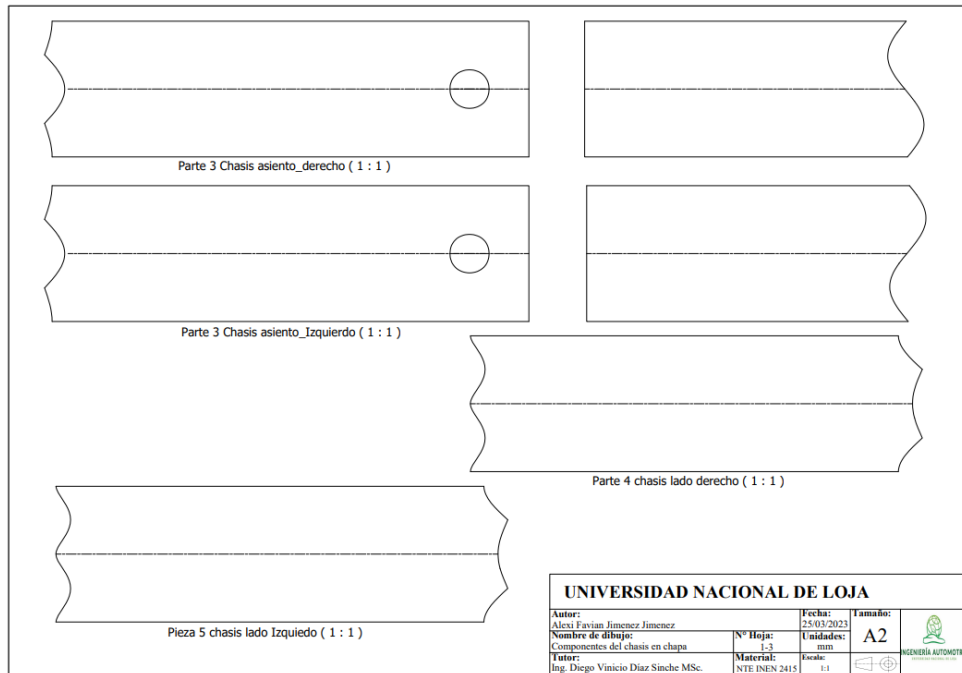
Anexo 2. Piezas de la estructura del chasis



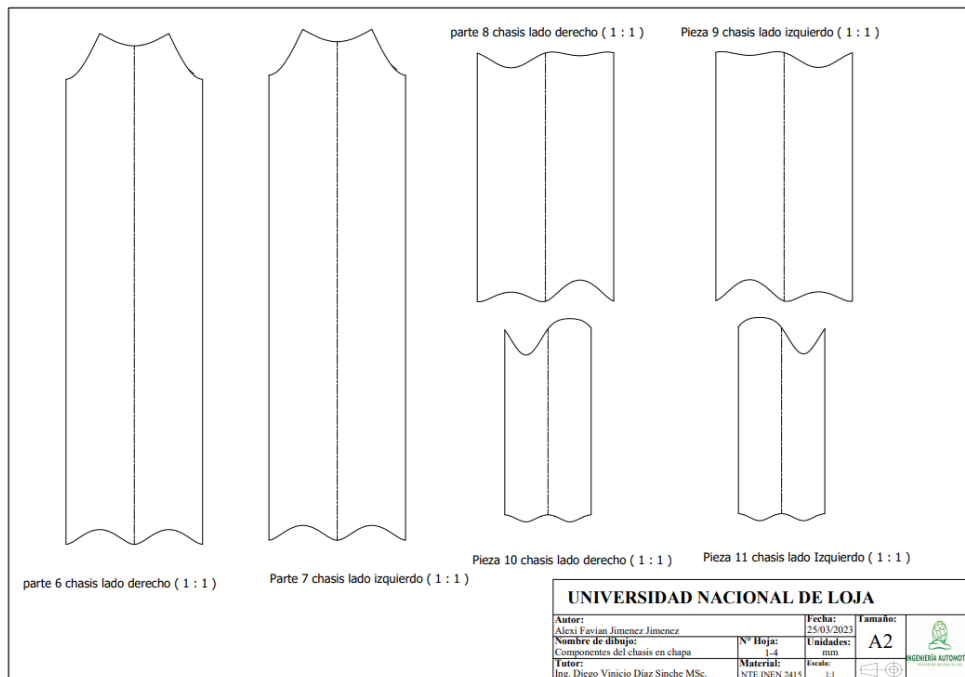
Anexo 3. Elaboración de plantilla de la parte frontal del chasis



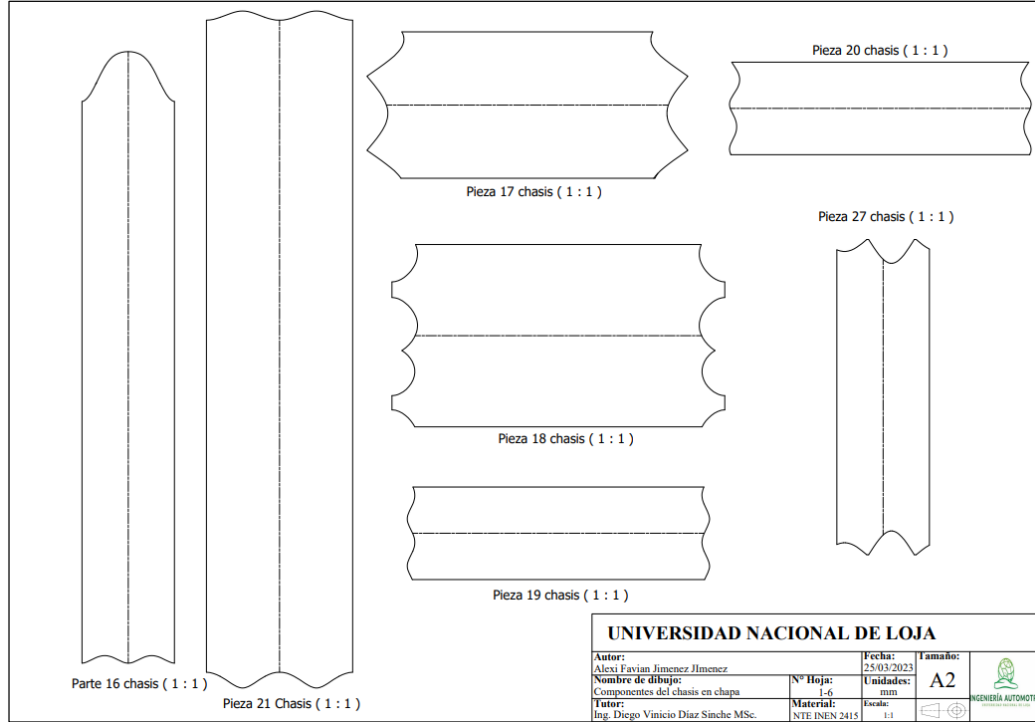
Anexo 4. Elaboración de plantillas de la parte posterior del chasis



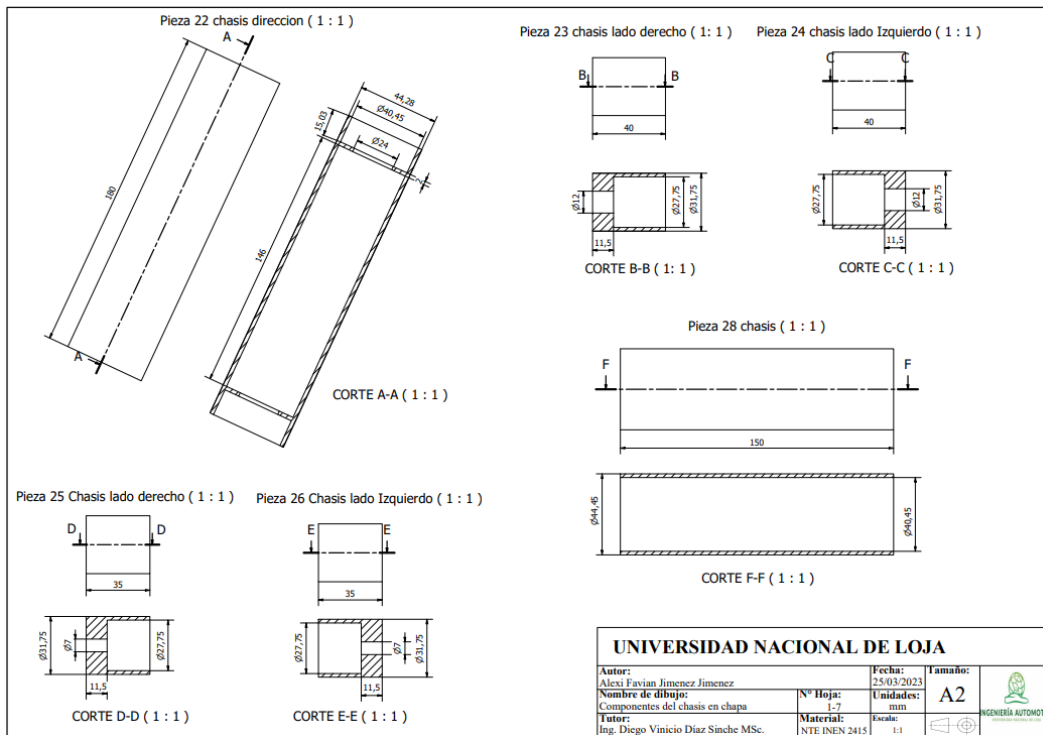
Anexo 5. Elaboración de plantillas de la parte inferior del chasis



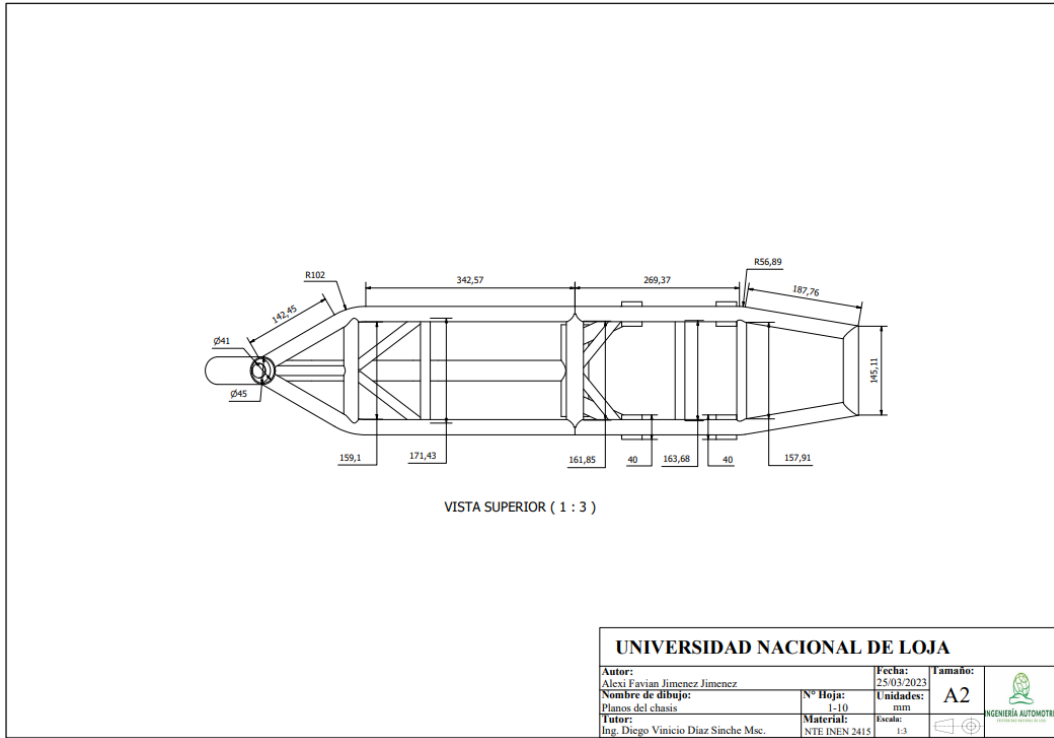
Anexo 6. Elaboración de plantillas de componentes de soporte de la estructura



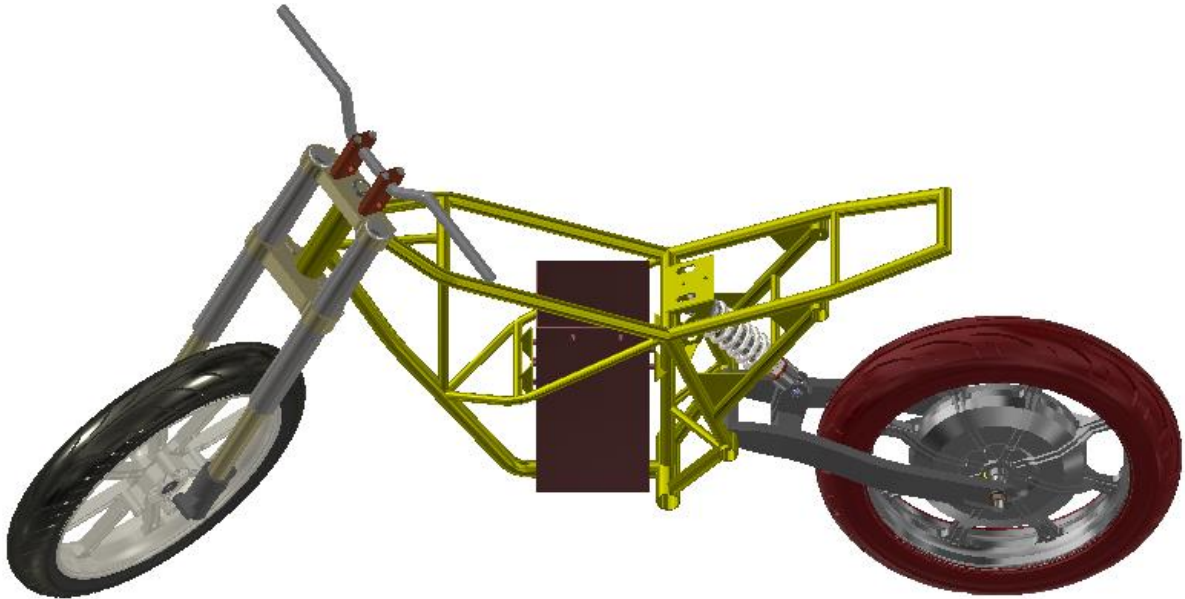
Anexo 7. Planos de componentes de sujeción de la motocicleta



Anexo 10. Plano del chasis vista superior



Anexo 11. Ensamble de componentes en el chasis de la moto eléctrica



Anexo 12. Certificado de la traducción del abstract

Loja, 08 de Noviembre de 2023.

CERTIFICA:

Yo, Lic. Jennifer Michelle Quezada Aguilar, con cedula de identidad 1104131121, docente del área de inglés, con registro 1031-2023-2692899, doy fe que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del trabajo de titulación denominado: **DISEÑO GENERATIVO DEL CHASIS DE UNA MOTO ELÉCTRICA DE TRAYECTO URBANO**, del estudiante Alexi Favian Jiménez Jiménez, con cedula de identidad N° 1105600306, egresado de la carrera: Ingeniería en Mecánica Automotriz

Lo certifico en honor a la verdad y autorizo a la interesada hacer uso de la presente en lo que a sus intereses convenga.



Jennifer Quezada Aguilar
Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés
1104131121